

ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MICRO-TERMOPARES: FABRICAÇÃO, CALIBRAÇÃO
E TESTES DE REPRODUTIBILIDADE

MARIO CALVANI

10679

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO
PAULO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE

= 1970 =

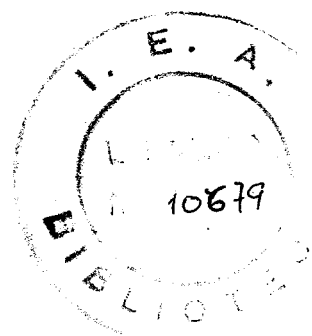
SÃO PAULO - BRASIL

ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MICRO-TERMOPARES: FABRICAÇÃO, CALIBRAÇÃO
E TESTES DE REPRODUTIBILIDADE

MARIO CALVANI

Orientador: Osvaldo Fadigas Fontes Torres



DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO
PAULO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE

= 1970 =

SÃO PAULO - BRASIL



A meus pais

= ∞ =

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer de um modo geral a todos os colegas que nestes dois anos de trabalho, neste Instituto, contribuíram para minha formação na Energia Nuclear.

Ao Prof. Dr. Oswaldo Fadigas Fontes Torres, Diretor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, meu profundo agradecimento pelo incentivo, simpatia e interêsse que sempre demonstrou através das sugestões e orientação do trabalho.

Ainda sou grato aos pesquisadores Eng^o Gildo José da Silva Costa, Eng^o Cleves Eraldo Calado, Bel. Maria Luiza Cruz e Eng^o José Carlos de Almeida; em particular, ao Prof. Dr. Paulo Saraiva de Toledo, Professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo e Chefe da Divisão de Física de Reatores do Instituto de Energia Atômica, pelas discussões e auxílio prestado ao presente trabalho; à Oficina Mecânica do IEA pelos cuidados com os quais executou os serviços; à Srta. Terezinha Caires pelos trabalhos de datilografia e aos componentes da Gráfica do IEA pelos trabalhos de impressão e montagem da Dissertação.

Não posso deixar de expressar meu reconhecimento ao Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni, Diretor do Instituto de Energia Atômica, ao qual devo, pelas possibilidades oferecidas, a realização deste trabalho.

ÍNDICE

	<u>página</u>
Notação	viii
Resumo	1
Introdução	2

PARTE IPRINCÍPIOS GERAIS SÔBRE TERMOMETRIA TERMOELÉTRICA

PI.I	- <u>Efeitos Termoelétricos</u>	5
PI.II	- <u>Efeito Seebeck</u>	5
PI.III	- <u>Efeito Peltier</u>	6
PI.IV	- <u>Efeito Thomson</u>	6
PI.V	- <u>Leis Termoelétricas</u>	7
PI.VI	- <u>Relação entre os Coeficientes Termoelétricos</u>	8

PARTE IIPRINCÍPIOS DE UTILIZAÇÃO DE TERMOPARES

PII.I	- <u>Crêterios para Seleção de Termopares</u>	11
PII.II	- <u>Correção da Junção Fria</u>	11
PII.III	- <u>Compensação da Junção Fria</u>	11
PII.IV	- <u>Ligas Utilizadas para os Termopares</u>	13
PII.V	- <u>F.e.m. de Algumas Ligas Termoelétricas</u>	14
PII.VI	- <u>Faixa de Uso de Alguns Termopares</u>	14
PII.VII	- <u>Efeitos da Radiação</u>	15

PARTE IIIA - TÉCNICAS PARA REALIZAÇÃO DE UM MICRO-TERMOPAR

PIII.A.I	- <u>Desencapamento</u>	18
PIII.A.II	- <u>Secagem da Extremidade</u>	18
PIII.A.III	- <u>Preparação dos Fios para Soldagem</u>	19
PIII.A.IV	- <u>Execução da Soldagem</u>	19

PIII.A.V	- <u>Montagem</u>	19
PIII.A.VI	- <u>Contrôle Elétrico</u>	20
B - <u>TESTES DE REPRODUTIBILIDADE E CALIBRAÇÃO</u>		
PIII.B.I	- <u>Os Aparelhos</u>	21
PIII.B.II	- <u>Reprodutibilidade</u>	21
PIII.B.III	- <u>Escolha da Soldagem (Quadrado Latino, Modelo Misto)</u>	
PIII.B.III.1	- O Delineamento	22
PIII.B.III.2	- Comentários sôbre o Tipo de Amostragem	24
PIII.B.III.3	- Os Termopares	24
PIII.B.III.4	- Chave de Comutação de 16 Canais	25
PIII.B.III.5	- Sequência Operacional	25
PIII.B.III.6	- O Circuito de Medida	25
PIII.B.III.7	- Resultados	25
PIII.B.IV	- <u>Escolha da Conexão (Experimento Simplesmente Casualizado, Modelo Fixo)</u>	
PIII.B.IV.1	-- Comentários sôbre a Amostragem	31
PIII.B.IV.2	- O Delineamento	32
PIII.B.IV.3	- O Circuito de Medida	35
PIII.B.V	- <u>Reprodutibilidade do Conjunto (Blocos Casualizados, Modelo Aleatório)</u>	
PIII.B.V.1	- O Delineamento	35
PIII.B.V.2	- Comentários sôbre a Amostragem	37
PIII.B.V.3	- Sequência Operacional	37
PIII.B.V.4	- O Circuito de Medida	37
PIII.B.V.5	- Resultados	37
PIII.B.VI	- <u>Princípio de Calibração</u>	40
PIII.B.VII	- <u>O Circuito de Medida</u>	41
PIII.B.VIII	- <u>Padrão de Referência</u>	41
PIII.B.IX	- <u>Cronologia da Calibração</u>	41
Conclusões		43
Bibliografia		46
Apêndice I	- <u>Programa Fortran II-D "Quadrados Latinos"</u>	48
Apêndice II	- <u>Programa Fortran II-D "Blocos Casualizados"</u>	53

ÍNDICE DAS TABELASpágina

Tabela 1 - Resposta em mV correspondente a algumas temperaturas para termopares de uso mais comum com junção de referência a 0 °C	14
Tabela 2 - Faixa de uso de alguns termopares	14
Tabela 3 - Quadrado Latino no caso de solda por descarga de capacitores; leituras em mV	25
Tabela 4 - Quadrado Latino no caso de solda oxi-acetilênica; leituras em mV	28
Tabela 5 - Resposta em mV de 4 termopares, para uma mesma temperatura a medir e de referência, usando diferentes conexões	32
Tabela 6 - Blocos Casualizados, resposta em mV de 4 termopares (tratamento) em 4 temperaturas (blocos)	38
Tabela 7 - Resultados da calibração dos termopares de Cromel-Alumel, sem recozimento, com a junção de referência a 0 °C	63
Tabela 8 - Resultados da calibração dos termopares de Cromel-Alumel, com recozimento, com a junção de referência a 0 °C	65

ÍNDICE DAS FIGURAS

	<u>página</u>
Figura 1 - Efeito Seebeck	56
Figura 2 - Efeito Peltier	56
Figura 3 - Efeito Thomson	56
Figura 4 - Lei dos Circuitos Homogêneos	57
Figura 5 - Lei dos Metais Intermediários	57
Figura 6 - Lei das Temperaturas Sucessivas ou Intermediárias	57
Figura 7 - Lei da Aditividade da f.e.m. para Metais	57
Figura 8 - Termopares com Extensão	58
Figura 9)	
Figura 10) - Operações de Desencapamento	58
Figura 11)	
Figura 12 - Preparação dos Fios para Solda	59
Figura 13)	
Figura 14) - Execução da Soldagem	59
Figura 15)	
Figura 16 - Possíveis Aspectos da Solda no Ensaio Visual	59
Figura 17 - Elementos Termoelétricos Trançados e Paralelos	60
Figura 18 - Micro-plug Radial	60
Figura 19 - Contrôles da Continuidade dos Condutores	60
Figura 20 - Contrôles do Isolamento	60
Figura 21 - Esquema do Circuito de Medida para Aplicação do Delinea- mento em Quadrados Latinos	61
Figura 22 - Esquema do Circuito de Medida para Aplicação do Delinea- mento em Blocos Casualizados, Experimentação Simplesmen- te Casualizada e para Calibração	62
Figura 23 - F.e.m. em Função da Temperatura	64
Figura 24 - F.e.m./ t_{68} em Função de t_{68}	66

NOTAÇÃO

<u>Símbolo</u>	<u>Unidade</u>	<u>Item</u>
$W(T_{68})$	-	Razão de resistência definida por $R(T_{68})/R(275,15 \text{ } ^\circ\text{K})$
R	Ohm	Resistência
T_{68}	$^\circ\text{K}$	Temperatura (I.P.T.S. 68)
t_{68}	$^\circ\text{C}$	Temperatura (I.P.T.S. 68)
$E(t_{68})$	Volt	F.e.m. de um termopar padrão de Pt/Pt ₉₀ -Rh ₁₀ quando uma junção está à temperatura $t_{68} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ e a outra à temperatura t_{68}
$L_\lambda(T_{68})$	Joule	Concentração espectral, na temperatura T_{68} , da radiação do corpo negro para um comprimento de onda λ
$E_{t_{68}}^{t'_{68}}(A,B)$	Volt	F.e.m. do par A,B cujas junções estão na temperatura t_{68} e t'_{68} , onde $t_{68} < t'_{68}$; A indica o condutor que tem maior poder termoelétrico absoluto
α_{ab}	Volt/ $^\circ\text{C}$	Coefficiente de Seebeck para o par (A,B)
Δt_{68}	$^\circ\text{C}$	Gradiente de temperatura
Q	Joule	Quantidade de calor liberada ou absorvida
π_{ab}	Volt	Coefficiente de Peltier para o par (A,B)
I	Ampere	Corrente
τ	Segundo	Tempo
q	Coulomb	Carga
σ	Volt/ $^\circ\text{C}$	Coefficiente de Thomson
Y_{ijk}	-	Observação experimental, onde cada índice corresponde ao nível de um fator
μ	-	Média geral
α	-	Efeito da linha
β	-	Efeito da coluna
γ	-	Efeito do tratamento

<u>Símbolo</u>	<u>Unidade</u>	<u>Item</u>
θ	-	Efeito médio do bloco
ϵ	-	Erro
G.L.	-	Graus de liberdade
Q.M.	-	Quadrados médios
E [Q.M.]	-	Espectância dos quadrados médios
F	-	F de Snedcor

RESUMO

Este trabalho apresenta uma série de considerações teóricas sobre os efeitos termoelétricos e critérios para a escolha e uso de termopares.

Apresenta-se ainda, neste trabalho, a descrição das técnicas para a realização de um micro-termopar como também o arranjo experimental para a calibração dos mesmos numa faixa de 0 °C até 100 °C e a região de 95% de confiança para as temperaturas.

A reprodutibilidade dos termopares foi verificada, na impossibilidade de um ensaio não destrutivo por Raios X, por meio de testes de Análise de Variância em "Quadrados Latinos, Modelo Misto; Experimento Simplesmente Casualizado, Modelo Fixo; Blocos Casualizados, Modelo Aleatório", sendo que é apresentada a listagem em Fortran II-D do primeiro e do último delineamento.

Pretende-se usar, inicialmente, estes resultados para registrar os gradientes de temperatura na secção de teste de um loop termo-hidráulico e mais tarde para fabricação de baterias termoelétricas como detetores de neutrons para controle automático de reatores.

INTRODUÇÃO

Medidas precisas de temperatura interessam à maior parte dos trabalhos técnicos e científicos. O problema destas medidas tem sido resolvido satisfatoriamente em todas as faixas de temperatura.

A faixa mais usada é aquela que vai desde o ponto de ebulição do oxigênio ($-182,962^{\circ}\text{C}$) até o ponto de solidificação do ouro ($1064,43^{\circ}\text{C}$).

Neste intervalo, os valores numéricos da temperatura no equilíbrio de fase de algumas substâncias, têm sido tomados como pontos fixos de definição na Escala Internacional de Temperatura (IPTS-68)⁽²⁾,

Estado de Equilíbrio	Temperatura K	Temperatura $^{\circ}\text{C}$
-Equilíbrio entre a fase líquida e gasosa do oxigênio (ponto de ebulição do oxigênio)	90,188	-182,962
-Equilíbrio entre a fase sólida, líquida e gasosa da água (ponto triplo da água)*	273,16	0,01
-Equilíbrio entre a fase líquida e gasosa da água (ponto de ebulição da água)	373,15	100
-Equilíbrio entre a fase sólida e líquida do zinco (ponto de solidificação do zinco)	692,73	419,58
-Equilíbrio entre a fase sólida e líquida da prata (ponto de solidificação da prata)	1235,08	961,93
-Equilíbrio entre a fase sólida e líquida do ouro (ponto de solidificação do ouro)	1337,58	1064,43

As temperaturas entre estes pontos são medidas por meio de instrumentos especiais e de acordo com regras de interpolação estabelecidas.

* Exceto para o ponto triplo da água, os valores de temperatura são associados aos estados de equilíbrio na pressão $p_0 = 1 \text{ atm. padrão } (101325 \text{ N/m}^2)$.

As temperaturas entre $-182,962\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ponto de ebulição do oxigênio) e $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ponto de solidificação do antimônio) são determinadas por meio de termômetros de resistência de platina. A pureza e as condições físicas do termômetro devem ser tais que a razão das resistências elétricas $W(T_{68})$, definida por⁽²⁾⁽⁶⁾

$$W(T_{68}) = R(T_{68})/R(273,15\text{ K}) \quad (1)$$

seja igual ou superior a 1,39250 em $T_{68} = 373,15\text{ K}$.

No intervalo entre $-182,962\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ usa-se a seguinte equação de interpolação:

$$\Delta W(T_{68}) = A t_{68} + C t_{68}^3 (t_{68} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

onde $t_{68} = T_{68} - 273,15\text{ K}$ e as constantes são determinadas a partir de medidas de resistência no ponto de ebulição do oxigênio e ponto de ebulição da água em 1 atmosfera padrão.

No intervalo entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ é usada a seguinte equação:

$$W(t') = 1 + A t' + B t'^2 \quad (3)$$

onde

$$W(t') = R(t')/R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$$

t' é definida pela equação

$$t' = \frac{1}{\alpha} \left[W(t') - 1 \right] + \delta \left(\frac{t'}{100\text{ }^{\circ}\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100\text{ }^{\circ}\text{C}} - 1 \right)$$

e t_{68} é definida por

$$t_{68} = t' + 0,045 \left(\frac{t'}{100\text{ }^{\circ}\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100\text{ }^{\circ}\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419,58\text{ }^{\circ}\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{630,74\text{ }^{\circ}\text{C}} - 1 \right)^{\circ}\text{C}$$

e as constantes são determinadas por medidas da resistência no ponto de ebulição da água e ponto de solidificação do zinco em 1 atmosfera padrão.

As temperaturas compreendidas entre $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ são determinadas por meio de termopares de platina/platina-10% ródio e a equação de interpolação usada é a seguinte:

$$E(t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2 \quad (4)$$

e as constantes são determinadas a partir de medidas de f.e.m. do termopar no ponto de solidificação do antimônio, da prata e do ouro.

As temperaturas acima de 1064,43 °C são medidas por meio de pirômetros óticos os quais comparam a intensidade de radiação do corpo negro na temperatura desconhecida com a intensidade de radiação do corpo negro no ponto de solidificação do ouro:

$$\frac{L_{\lambda}(T_{68})}{L_{\lambda}(T_{68}(\text{Au}))} = \frac{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}(\text{Au})}\right] - 1}{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}}\right] - 1} \quad (5)$$

onde $L_{\lambda}(T_{68})$ e $L_{\lambda}(T_{68}(\text{Au}))$ são a concentração espectral na temperatura T_{68} e no ponto de solidificação do ouro, $T_{68}(\text{Au})$, da radiação do corpo negro para um comprimento de onda λ .

Todos os outros instrumentos para medidas de temperatura são calibrados a partir de instrumentos por sua vez calibrados com os pontos de referência.

Os termômetros termoelétricos (termopares) formam a classe de instrumentos para medida de temperatura mais usados universalmente. A sua extensividade é devida a uma série de vantagens que oferecem em relação aos outros termômetros:

linearidade de resposta

alta f.e.m. térmica

baixa inércia térmica

resistência mecânica

fácil manuseio

baixo custo

PARTE IPRINCÍPIOS GERAIS SÔBRE TERMOMETRIA TERMOELÉTRICAPI.I - Efeitos Termoelétricos⁽¹⁷⁾

Os efeitos termoelétricos ocorrem na presença de correntes elétrica e térmica.

Considerando, por simplicidade, que os materiais são isotrópicos e que não há campo magnético transversal, distinguimos três efeitos:

- o efeito Seebeck (1822) que relata a f.e.m. desenvolvida por um circuito constituído de dois condutores diferentes cujas junções não estão à mesma temperatura;

- o efeito Peltier*(1834) que se refere à liberação ou absorção de calor nas junções quando uma corrente elétrica flui de um condutor para outro;

- o efeito Thomson*(1856) que se refere à liberação ou absorção de calor num condutor homogêneo, submetido a um gradiente de temperatura, quando é atravessado por uma corrente elétrica.

PI.II - Efeito Seebeck

Vamos considerar um circuito constituído de dois condutores diferentes e homogêneos A e B, Fig.1; se uma das junções do par (A,B) é mantida à temperatura t_{68} e a outra à temperatura mais alta t'_{68} , uma corrente contínua fluirá no circuito. A f.e.m. que produz esta corrente é chamada de f.e.m. térmica de Seebeck, $E_{t_{68}}^{t'_{68}}(A,B)$. O sinal de E é convencionalmente definido como positivo se a corrente flui de A para B na junção à temperatura t_{68} . A indica, nesse caso, o condutor que diz-se ter maior poder termoelétrico absoluto, isto é, que é positivo em relação ao outro.

* Os efeitos Peltier e Thomson são fenômenos reversíveis.

Nestas condições a f.e.m. termoelétrica $E_{68}^{t_1}(A,B)$ no circuito é proporcional à diferença de temperatura Δt_{68} entre as duas junções⁽⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾

$$E_{68}^{t_1}(A,B) = \alpha_{ab} \Delta t_{68} \quad (6)$$

Denomina-se α de "Coeficiente de Seebeck" e exprime a f.e.m. por grau de diferença da temperatura para um dado par termoelétrico.

PI.III- Efeito Peltier

Os fenômenos termoelétricos incluem também o efeito Peltier, Fig. 2, segundo o qual, se fizermos passar uma corrente elétrica através das junções de dois condutores diferentes e homogêneos A e B, uma quantidade de calor é liberada ou absorvida pelas junções dependendo do sentido da corrente.

Se a corrente flui no mesmo sentido da corrente produzida pelo efeito Seebeck, na junção quente é absorvido calor, ao passo que na fria é liberado calor.

Nestas condições, o calor liberado ou absorvido numa junção é proporcional à quantidade de carga que atravessa a junção

$$Q = \pi_{ab} I \tau = \pi_{ab} q \quad (7)$$

Denomina-se π de "Coeficiente de Peltier" que varia com a natureza dos condutores e a temperatura e é numericamente igual à quantidade de calor liberada ou absorvida numa junção pela passagem através dela da unidade de carga.

PI.IV- Efeito Thomson

Vamos supor agora um condutor homogêneo A aquecido no centro a uma temperatura t_{68}^1 , mantendo suas extremidades P_1 e P_2 à temperatura t_{68} , Fig. 3. Ao se fazer passar uma corrente contínua através do condutor, os

pontos P_1 e P_2 , que estavam a uma temperatura $t_{68} < t'_{68}$ quando não havia corrente, mudarão sua temperatura para $t_{68} + \Delta t_{68}$ e $t_{68} - \Delta t_{68}$ respectivamente quando a corrente flui num sentido e para $t_{68} - \Delta t_{68}$ e $t_{68} + \Delta t_{68}$ quando a corrente é invertida. Logo, a passagem de corrente, num condutor com gradiente de temperatura constante ao longo do seu comprimento, produz, além do calor Joule, uma liberação ou absorção de calor dependendo do sentido da corrente elétrica. Tal quantidade de calor é experimentalmente verificada ser proporcional à quantidade total de carga que atravessa o condutor e ao gradiente de temperatura ⁽⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾

$$Q = \sigma I \tau \Delta t_{68} = \sigma q \Delta t_{68} \quad (8)$$

Denomina-se σ de "Coeficiente de Thomson" e representa a quantidade de calor liberada ou absorvida entre dois pontos de um condutor homogêneo entre os quais há uma diferença de temperatura de um grau, quando da passagem da unidade de carga.

Pl. V - Leis Termoelétricas

Os numerosos trabalhos sobre circuitos termoelétricos, nos quais foram realizadas medidas precisas de corrente, resistência e f.e.m. resultaram no estabelecimento de conceitos básicos. Estes conceitos podem ser resumidos em quatro leis fundamentais:

- Lei dos Circuitos Homogêneos

Se uma junção de dois metais homogêneos e diferentes é mantida a uma temperatura t_{68} e a outra junção a uma temperatura t'_{68} , a f.e.m. desenvolvida independe da distribuição de temperatura ao longo dos fios, Fig.4.

- Lei dos Metais Intermediários

Se um circuito termoelétrico, cujas junções estão às temperaturas t_{68} e t'_{68} , se introduz um terceiro fio de metal diferente mantido a uma mesma temperatura constante t''_{68} , a f.e.m. não se altera, Fig.5.

- Lei das Temperaturas Sucessivas ou Intermediárias

Se dois metais homogêneos, constituindo um circuito termoelétrico, produzem uma f.e.m. $E_{68}^I(A,B)$ quando as junções estão na temperatura t_{68} e t_{68}^I e uma f.e.m. $E_{68}^{II}(A,B)$ quando as junções estão na temperatura t_{68}^I e t_{68}^{II} , a f.e.m. desenvolvida quando as junções estiverem na temperatura t_{68} e t_{68}^{II} será

$$E_{68}^{III}(A,B) = E_{68}^I(A,B) + E_{68}^{II}(A,B) \quad (9)$$

Em outras palavras, as f.e.m. são aditivas para intervalos de temperatura, Fig. 6.

- Lei da Aditividade das f.e.m. para Metais

As f.e.m. são aditivas para diferentes metais mantidas ambas as junções nas mesmas temperaturas, Fig. 7.

$$E_{68}^I(A,B) = E_{68}^I(A,C) + E_{68}^I(C,B) \quad (10)$$

PI.VI - Relação entre os Coeficientes Termoelétricos

Consideremos o circuito termoelétrico constituído pelo par (A,B) cujas junções se encontram às temperaturas t_{68} e $t_{68} + dt_{68}$ tal que a corrente flua de A para B na junção à temperatura t_{68} . Nestas condições aparece no circuito uma f.e.m. Seebeck dada por $(\alpha_{ab} dt_{68})$. Quando a carga elétrica q atravessa o circuito, o trabalho elétrico liberado é $(\alpha_{ab} dt_{68} q)$. Ao mesmo tempo, na junção quente há uma absorção de calor Peltier $(\pi_{ab} + d\pi_{ab})q$ e na junção fria uma liberação de calor Peltier $(-\pi_{ab} q)$, sendo π_{ab} o coeficiente de Peltier correspondente à temperatura t_{68} . No condutor A há também uma absorção de calor Thomson $(\sigma_a dt_{68} q)$ e no condutor B uma liberação de calor Thomson $(-\sigma_b dt_{68} q)$. Pela primeira lei da termodinâmica⁽⁸⁾⁽¹⁹⁾

$$\alpha_{ab} q dt_{68} = \pi_{ab} q + \pi_{ab} q dt_{68} - \pi_{ab} q + \sigma_a q dt_{68} - \sigma_b q dt_{68} \quad (11)$$

De onde, dividindo por $q dt_{68}$ e desenvolvendo obtemos o poder termoelétrico do par (A,B) expresso como

$$\alpha_{ab} = \frac{d\pi_{ab}}{dt_{68}} + \sigma_a - \sigma_b \quad (12)$$

Por outro lado, pode ser demonstrado, através da segunda lei da termodinâmica que

$$\pi_{ab} = \alpha_{ab} T_{68} \quad (13)$$

Diferenciando em relação à temperatura a equação (13), que nos dá o efeito Peltier em função do poder termoelétrico do par (A,B) e sua temperatura, vem

$$\frac{d\pi_{ab}}{dt_{68}} = \alpha_{ab} + T_{68} \frac{d\alpha_{ab}}{dt_{68}} \quad (14)$$

e substituindo $d\pi_{ab}/dt_{68}$ da equação (14) por $d\pi_{ab}/dt_{68}$ da equação (12), vem

$$\frac{d\alpha_{ab}}{dt_{68}} = -\frac{\sigma_a}{T_{68}} + \frac{\sigma_b}{T_{68}} \quad (15)$$

As equações (13) e (15) relacionam os três fenômenos termoelétricos ao mesmo tempo e são conhecidas como relações de Kelvin.

Se agora integrarmos a equação (15), temos

$$\alpha_{ab} = \int_0^{T_{68}} \frac{\sigma_b}{T_{68}} dT_{68} - \int_0^{T_{68}} \frac{\sigma_a}{T_{68}} dT_{68} \quad (16)$$

Se o poder termoelétrico absoluto de um condutor é definido como

$\alpha = \int_0^{T_{68}} \frac{\sigma}{T_{68}} dT_{68}$, da equação (16) vem que o poder termoelétrico de um par (A,B), α_{ab} , é a soma algébrica dos poderes termoelétricos absolutos α_a e α_b

$$\alpha_{ab} = \alpha_b - \alpha_a \quad (17)$$

Da equação (17) é óbvio que, uma vez conhecido o poder termoelétrico para um condutor metálico, o mesmo pode ser determinado para qualquer condutor a qualquer temperatura, simplesmente determinando experimentalmente o seu poder termoelétrico em relação ao condutor conhecido.

PARTE IIPRINCÍPIOS DE UTILIZAÇÃO DE TERMOPARESPII.I - Critérios para Seleção de Termopares

De um circuito termoelétrico exige-se que:⁽¹⁾

- a) a f.e.m. cresça continuamente com o aumento da temperatura na faixa de utilização do termopar;
- b) a f.e.m. desenvolvida seja tal que possa ela ser medida com razoável precisão;
- c) as propriedades termoelétricas não se alterem durante a calibração e uso, quer em virtude de mudanças internas, que em virtude de contaminação;
- d) os metais ou ligas constituintes do termopar sejam resistentes à oxidação e corrosão;
- e) os materiais possam ser produzidos com grande reprodutibilidade de suas propriedades.

PII.II - Correção da Junção Fria

Nos terminais de um termopar, cuja junção fria está a uma temperatura t_{68} , diferente da temperatura de referência t_{68}^0 com a qual foi calibrado, $E_{t_{68}}^{t_{68}^i}$ é medida tal que

$$E_{t_{68}}^{t_{68}^i} = E_{t_{68}^0}^{t_{68}^i} - E_{t_{68}^0}^{t_{68}} \quad (18)$$

A temperatura da junção quente pode ser levantada da curva $E_{t_{68}^0}^{t_{68}^i} = f(t_{68})$ adicionando a f.e.m. correspondente à temperatura t_{68} ao valor medido de $E_{t_{68}}^{t_{68}^i}$.

PII.III - Compensação da Junção Fria

Muitas vezes os termopares são estendidos por materiais (P e Q)

muito diferentes dos que compõem o termopar e a partir de uma junção onde a temperatura t_{68}^j é maior que a temperatura de referência t_{68}^o . Um tal circuito, Fig. 13, gera uma f.e.m. E, que pode ser decomposta nas tensões Peltier e Thomson.⁽²⁰⁾

$$E = \pi_{qp}(t_{68}^o) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^o}(P) + \pi_{pa}(t_{68}^j) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(A) + \pi_{ab}(t_{68}^j) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(B) + \pi_{bq}(t_{68}^j) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(Q) \quad (19)$$

Aplicando a lei dos metais intermediários, temos:

$$\pi_{pa}(t_{68}^j) = \pi_{pq}(t_{68}^j) + \pi_{qa}(t_{68}^j) \quad \text{e} \quad \pi_{bq}(t_{68}^j) = \pi_{ba}(t_{68}^j) + \pi_{aq}(t_{68}^j) \quad (20)$$

E substituindo na equação para E

$$E = \pi_{qp}(t_{68}^o) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^o}(P) + \pi_{pq}(t_{68}^j) + \pi_{qa}(t_{68}^j) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(A) + \pi_{ab}(t_{68}^j) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(B) + \pi_{ba}(t_{68}^j) + \pi_{aq}(t_{68}^j) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(Q) \quad (21)$$

$$E = \left[\pi_{ab}(t_{68}^j) - \pi_{ab}(t_{68}^j) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(B) - \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(A) \right] + \left[\pi_{pq}(t_{68}^j) - \pi_{pq}(t_{68}^o) + \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(Q) - \sigma_{t_{68}^j}^{t_{68}^o}(P) \right]$$

O primeiro termo entre parêntesis representa $E_{t_{68}^j}^{t_{68}^j}(A,B)$ e o segundo representa $E_{t_{68}^j}^{t_{68}^o}(P,Q)$, portanto

$$E = E_{t_{68}^j}^{t_{68}^i}(A,B) + E_{t_{68}^o}^{t_{68}^j}(P,Q) \quad (22)$$

mas pela equação (18)

$$E_{t_{68}^j}^{t_{68}^i}(A,B) = E_{t_{68}^o}^{t_{68}^i}(A,B) - E_{t_{68}^o}^{t_{68}^j}(A,B) \quad (23)$$

substituindo a (23) na (22)

$$E = E_{t_{68}^o}^{t_{68}^i}(A,B) - \left[E_{t_{68}^o}^{t_{68}^j}(A,B) - E_{t_{68}^o}^{t_{68}^j}(P,Q) \right] = E_{t_{68}^o}^{t_{68}^i}(A,B) - \Delta E \quad (24)$$

onde ΔE é a correção necessária para cada P e Q. Portanto se a escolha dos materiais é tal que $\Delta E = 0$ a compensação da junção fria está feita.

PII.IV - Ligas mais utilizadas para os Termopares⁽⁹⁾

Cromel	liga de Níquel e Cromo cujas percentagens extremas são 10% Cr 90% Ni
Alumel	94,5% Ni 2,0% Al 1,0% Si 2,5% Mn
Ferro puro	
Constantan	liga de Cobre e Níquel cujas percentagens extremas são 40% Cu 60% Ni 60% Ni 40% Cu
Platina-Rhódio	90% Pt 10% Rh
Platina pura	

Em casos especiais outras combinações de metais podem ser usadas para constituir circuitos termoelétricos.^{(9)(g)}

PII.V - F.E.M. de algumas Ligas Termoelétricas

Comparando a f.e.m. das ligas do item anterior em relação à platina, tem-se em ordem decrescente:⁽⁹⁾

f.e.m. positiva	{ Cromel Ferro Platina-Rhodio
f.e.m. negativa	{ Alumel Níquel Constantan

Na Tab. 1 são apresentados alguns valores de f.e.m. dada pelos termopares mais utilizados. F.e.m. em mV.⁽³⁾

temp. °C termopar	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
Pt/Pt-Rh	0,64	1,43	2,31	3,24	4,22
Cr/Constantan	6,05	13	20,4	38	35,6
Cromel/Alumel	4,10	8,13	12,21	16,39	20,64
Cu/Constantan	4,28	9,29	14,86		

Tab.1: Resposta em mV para junção de referência a 0 °C.

A f.e.m. do par Ni-Cr/Ni é próxima da do Cromel-Alumel.

PII.VI - Faixa de uso de alguns Termopares⁽³⁾

Termopar	Faixa normal de uso	Temp. Lim.	Max. f.e.m. desenv. c/referência em 0°C
Pt/Pt-Rh	0 °C até 1450 °C	1700 °C	17 mV
Cromel/Alumel	-200 °C até 1200 °C	1360 °C	50 mV
Fe/Constantan	-200 °C até 750 °C	1000 °C	44 mV
Cu/Constantan	-200 °C até 350 °C	600 °C	18 mV

Tab.2. Faixa normal de uso e temperatura limite em °C, f.e.m. desenvolvida em mV com referência em 0 °C.

P.II.VII - Efeitos da Radiação

O controle de temperatura em um reator de potência ou uma pila é uma das operações de maior responsabilidade e, portanto, deve ser efetuada com a máxima precisão por meio de instrumentos que forneçam as respostas desejadas.

Nestas condições experimentais, dá-se preferência aos termopares para medição de temperatura, pois apresentam grande vantagem sobre os termômetros de resistência quando expostos em um campo de radiação por apresentarem exposta uma superfície muito menor. Ainda assim, a absorção de tal radiação resultará em uma alteração da curva característica dos termopares como consequência dos: ⁽¹¹⁾⁽¹⁶⁾⁽²²⁾

- 1) Efeitos devidos às transmutações
- 2) efeitos devidos aos raios γ
- 3) efeitos devidos aos neutrons
- 4) efeitos diversos, não nucleares, devidos à exposição dos materiais às altas temperaturas

Logo, a escolha dos materiais constituintes dos termopares, submetidos à radiação, deverá ser feita em função de sua composição isotópica, secção de choque eficaz de absorção aos neutrons, duração de vida, tempo de irradiação, fluxo neutrônico.

As alterações maiores resultam da absorção de neutrons que se traduzem em transmutações dos elementos constituintes dos termopares. Estas implicam numa alteração das propriedades físico-químicas e, particularmente, da resistividade.

Logo, haverá um desvio na curva característica f.e.m. contra temperaturas, principalmente, para temperaturas elevadas.

Portanto, não poderemos mais fazer uso da curva de calibração do termopar não irradiado depois de algum uso do mesmo num campo de radiação.

O cromel, em particular, é um material bastante estável ao fluxo neutrônico devido ao alto teor de níquel, elemento que possui um grande número de isótopos estáveis.

O alumel por uma razão idêntica também é muito estável.

Podemos assim, afirmar que os termopares cromel-alumel são os mais adaptáveis para trabalhos nestas condições porque a sua curva de calibração f.e.m. contra temperaturas é a mais estável sob bombardeio neutrônico.

O cobre, ao contrário, sofre uma grande transformação; em 20 anos 1/5 do cobre transforma-se em níquel e zinco.

A platina é muito estável por possuir um número muito grande de isótopos que não são radioativos.

O rhodio da platina mais 10% rhodio em uma dezena de anos transforma-se quase completamente em palladium.

Não menos destrutivo é o bombardeio por raios γ presentes no núcleo do reator.

Tais raios γ agem diretamente sobre a estrutura cristalina do elemento de medida alterando as propriedades termoelétricas. Como consequência teríamos um aumento do tempo de resposta além de uma diminuição do coeficiente angular da curva de calibração.

Outro problema causado pelos raios γ é o superaquecimento da solda quente. Este poderá a longo prazo modificar as propriedades termoelétricas por causa do recozimento. Por outro lado, o aquecimento provocado pela radiação γ fará com que a f.e.m. produzida seja bem maior que a correspondente à temperatura do ambiente a medir.

Sejam os raios γ como os neutrons podem ser catalisadores por certas reações. O efeito da radiação como catalisador provoca a deterioração da bañha de isolamento e de proteção.

É importante observar que as colisões elásticas dos neutrons rápidos produzem, nos termopares, os mesmos efeitos dos raios γ .

PARTE III

A. TÉCNICAS PARA REALIZAÇÃO DE UM MICRO TERMOPAR

PIII.A.I - Desencapamento

O desencapamento dos elementos termoelétricos foi executado manualmente e mostrou-se uma operação que exige um grande cuidado devido ao pequeno diâmetro dos condutores e à grande aderência do isolamento.

Tornou-se conveniente evitar, durante o desencapamento, todos os efeitos mecânicos a não ser os de compressão e tração.

Os instrumentos necessários se limitaram a um alicate de boa qualidade, robusto e a bicos lisos.

As operações de desencapamento foram na ordem seguinte:

- segurase o condutor numa mão, na outra o alicate e prende-se a extremidade do elemento termoelétrico num comprimento de 7 a 8 mm entre os bicos, Fig. 9;
- Exerce-se uma série de pressões alternadas, transversais para rachar o isolamento e dirigidas segundo os eixos xx' e yy' a 90° , Fig. 10
- faz-se efetuar ao elemento termoelétrico uma série de movimentos alternados de cerca de 20° de um lado e do outro do eixo. Durante esta operação o alicate fica imóvel. Depois de alguns ciclos deste movimento o isolamento se rompe, Fig. 11.

PIII.A.II - Secagem da extremidade

Desde que a extremidade do termopar se encontra em presença de umidade devido aos inúmeros contactos com as mãos, a resistência elétrica do isolamento fica consideravelmente diminuída. Portanto, tornou-se necessário secar a extremidade antes de qualquer operação e se assegurar que a resistência do isolamento fosse pelo menos 100 megohms.

A secagem foi realizada aproximando-se a extremidade do termopar a cerca de 5 cm da chama de um bico de Bunzen e com um movimento muito lento deslocando-a até que entrasse em contacto com a chama.

PIII.A.III - Preparação dos Fios para Solda

Os condutores foram torcidos o mais perto possível do isolamento e cortados num comprimento de cerca 1,5 mm por meio de uma tesoura, verificando-se, antes de cortar, se a operação estava correta, Fig. 12.

PIII.A.IV - Execução da Soldagem

A soldagem da junção quente foi executada em chama oxi-acetilênica com uma pressão do oxigênio levemente maior que a do acetileno e uma vazão mínima compatível com a estabilidade da chama a fim de obter-se não uma chama redutora mas uma chama oxidante com o aspecto seguinte: um dardo bem curto (2 a 3 mm) da cor azul claro e um segundo dardo maior (10 a 15 mm) da cor griz-azulada envolvendo o primeiro, Fig. 13.

Por facilidade operacional o bico foi fixado numa mesa, de maneira que a chama fosse dirigida horizontalmente.

A extremidade retorcida do termopar foi recoberta com fluxo Macam, Fig. 14, e finalmente levada na chama, em P, justamente na frente do primeiro dardo, na parte oxidante, Fig. 15.

A Operação dura uma fração de segundo, então, forma-se uma pequena esfera que terá que ser regular. Se é obtida uma solda irregular, a observação foi feita na lupa, Fig. 16, então recomeça-se a operação desde o desencapamento.

PIII.A.V. - Montagem

Executada a solda, o termopar foi introduzido numa bainha de aço

inox de 1,5 mm de diâmetro externo e 200 mm de comprimento em duas opções.

- a) Junção Quente Isolada: neste caso uma extremidade da bainha foi previamente fechada por fusão no bico oxi-acetilênico e reduzida a um diâmetro final de 1,1 mm por um comprimento de 40 mm. A junção quente recebeu uma camada de verniz isolante GE e após a secagem o termopar foi introduzido na bainha.
- b) Junção Quente Não Isolada: neste caso o termopar foi montado na bainha logo após a soldagem e o fechamento foi executado por fusão da bainha sobre a junção quente.

Ambas as versões foram montadas com os elementos termoelétricos trançados ou paralelos, Fig. 17.

Na extremidade livre da bainha, fechada com araldite a fim de evitar a penetração de umidade, foi colocado um suporte rosquiado para facilitar a colocação e manuseio. Tal suporte foi soldado na bainha com estanho usando como desencapante HCl e uma base NaOH (1N).

À extremidade livre do termopar foi soldado um micro plug radial, Fig. 18.

PIII.A.VI - Contrôle Elétrico

Uma vez montado o termopar na bainha foi verificado para todas as versões:

1. que a continuidade dos condutores termoelétricos fosse realizada, Fig. 19.
2. que a resistência do isolamento, para a opção a, entre a bainha e os condutores fosse pelo menos 100 megohms, Fig. 20.

Para tanto foi usado um megohmetro da Evereshed & Vignoles Ltd. Nº 1026964 (500 V).

B. CALIBRAÇÃO E TESTE DE REPRODUTIBILIDADE

PIII.B.I - Os Aparelhos

1. Termômetro Digital de Quartzo	Marca "hp"	Mod. 280 IA
2. Impressora	Marca "hp"	Mod. R86 562A
3. Banho Termostático	Marca Haake	Mod. FT
4. Termostato	Marca Haake	Mod. TP41
5. Potenciômetro	Marca Leeds & Northrup	Mod. K 5
6. Galvanômetro	Marca Leeds & Northrup	Mod. 9834-1
7. Pilha padrão	Marca Eppley	Mod. Nº 100, 1.01937V em 23°C
8. Voltímetro Digital	Marca Dynamco	Mod. DM 20225

PIII.B.II - Reprodutibilidade

Para conciliar o problema econômico, os meios disponíveis e a precisão exigida dos micro-termopares, surgiram sérios problemas no que diz respeito à reprodutibilidade⁽¹⁾.

De fato, a tecnologia de solda da junção quente requer cuidados especiais quer seja realizada por descarga de capacitores ou bico oxi-acetilênico. Problemas de cristalização, inclusão de escórias e oxidação alteram sensivelmente a resposta dos termopares.

Se a solda por descarga de capacitores é mais simples que a oxi-acetilênica, por outro lado, é mais cara e de mais difícil manutenção, mas, seja qual for o tipo de solda, o teste mais comum da junção quente é por difração de Raios X.

Ainda, como os termopares iriam se destinar a medidas de temperaturas de fontes afastadas do instrumento de medida, se apresentaram duas opções: ou usar o termopar até o ponto de referência, com o prejuízo econômico que iria

acarretar ou recorrer a extensões. Neste último caso a conexão podia ser realizada por um plug ou soldada.

Para se obter o ponto de otimização recorreu-se aos delineamentos em "QUADRADOS LATINOS", "EXPERIMENTO SIMPLEMENTE CASUALIZADO" e "BLOCOS CASUALIZADOS".

PIII.B.III - Escolha da Solda (Quadrados Latinos, Modelo Misto)

PIII.B.III.1 - O Delineamento⁽¹⁴⁾

Os delineamentos em Quadrados Latinos se destinam a reduzir o erro experimental. São indicados quando existem duas fontes assinaláveis de erro a serem eliminadas.

Este tipo de delineamento em princípio é semelhante ao em "Blocos Casualizados", mas em um arranjo em "Quadrados Latinos" a disposição dos tratamentos é de tal maneira que nos permita usar simultaneamente dois grupos cruzados de unidades experimentais, correspondendo às linhas e colunas do quadrado.

Os tratamentos são sujeitos à dupla restrição que cada tratamento ocorre uma e uma só vez em cada coluna e em cada linha. Então as diferenças entre as linhas e colunas podem ser eliminadas pela comparação experimental.

O processo apropriado de casualização, necessário para garantir a validade do teste de significância aplicado ao experimento, consiste em tomar um arranjo quadrado o qual satisfaça às condições de um "Quadrado Latino", rearranjar as linhas ou colunas ou ambas e então designar os tratamentos ao acaso.

A análise de um delineamento em "Quadrados Latinos" depende de um certo número de hipóteses. Vamos supor que cada uma das observações Y_{ijk} correspondente ao i -ésimo nível do fator L, j -ésimo nível do fator C, k -ésimo nível do fator t, seja dada por

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \epsilon_{ijk}$$

onde

μ é a média geral

α_i são o efeito médio da linha e são independentemente $N(0, \sigma_{\alpha_i}^2)$

β_j são constantes fixas tais que $\sum \beta_j = 0$ e representam o efeito médio da coluna

γ_k são o efeito médio do tratamento e são independentemente $N(0, \sigma_{\gamma_k}^2)$

ϵ_{ijk} são independentes e representam o erro com distribuição $N(0, \sigma^2)$

A hipótese nula, H_0 , que nos interessa

$$H_0 : \sigma_{\gamma_k}^2 = 0$$

é testada pela razão S_t^2/S_R^2 distribuída com $F[(n-1), (n-1)(n-2)]$.

O quadro de análise de variância é ⁽¹⁸⁾

FONTE DE VARIAÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	G.L.	Q.M.	E [Q.M.]	F
Entre tratamento	$SQt = \frac{\sum_k T_{\dots k}^2}{n} - \frac{T^2}{n^2}$	n - 1	$S_t^2 = \frac{SQt}{n-1}$	$\sigma^2 + n \sigma_{\gamma_k}^2$	$F_t = \frac{S_t^2}{S_R^2}$
Entre linhas	$SQL = \frac{\sum_i T_{i \dots}^2}{n} - \frac{T^2}{n^2}$	n - 1	$S_L^2 = \frac{SQL}{n-1}$	$\sigma^2 + n \sigma_{\alpha_i}^2$	$F_L = \frac{S_L^2}{S_R^2}$
Entre colunas	$SQC = \frac{\sum_j T_{\dots j}^2}{n} - \frac{T^2}{n^2}$	n - 1	$S_C^2 = \frac{SQC}{n-1}$	$\sigma^2 + \frac{n}{n-1} \sum_j \beta_j^2$	$F_C = \frac{S_C^2}{S_R^2}$
Resíduo	$SQR = SQT - SQt - SQL - SQC$	(n-1)(n-2)	$S_R^2 = \frac{SQR}{(n-1)(n-2)}$	σ^2	
Total	$SQT = \sum_{ijk} y_{ijk}^2 - \frac{T^2}{n^2}$	n ² - 1			

onde

$T_{i..}$ = total das linhas

$T_{.j.}$ = total das colunas

$T_{..k}$ = total dos tratamentos

$T_{...}$ = total geral

PIII.B.III.2 - Comentários sôbre o Tipo de Amostragem

Para testar os dois tipos de solda realizável, 24 termopares foram soldados com descarga de capacitores. Os mesmos, após realizado o teste, tiveram a solda cortada e novamente foram soldados com chama oxí-acetilênica.

Em ambos os casos foram sorteados, ao acaso, 4 termopares e classificados com as letras A,B,C e D, tomando-se esta amostra de 4 como representativa da população.

Para os 4 termopares foi medida a resposta em cada nível de temperatura a medir e em cada nível de temperatura de referência de acôrdo com o "Quadrado Latino" sorteado.

PIII.B.III.3 - Os Termopares

Os termopares utilizados no experimento são todos de Cromel-Alumel com diâmetro de 0,3 mm.

Por meio de um suporte foram colocados num banho termostático a uma profundidade de 10 cm em volta de um transdutor de quartzo do termômetro digital.

O segundo canal do termômetro de quartzo foi utilizado para controle da fonte de referência.

Uma extensão de cobre soldada no termopar liga a junção de referência com os aparelhos de medida através de uma chave seletora de 16 canais.

PIII.B.III.4 - Chave de Comutação de 16 Canais

A escolha deste comutador foi ditada pelos três motivos seguintes:

- a) evitar as forças termoelétricas parasitas provocadas por apertos e desapertos repetidos não uniformes dos fios nos bornes dos aparelhos de medida;
- b) minimizar o tempo de medida;
- c) anular os riscos de erro por permutações involuntárias dos fios.

PIII.B.III.5 - Sequência Operacional

- a) ligação da impressora para observar a variação de temperatura durante a operação;
- b) leitura no voltímetro digital da f.e.m. dos 4 termopares para se obter rapidamente o valor aproximado;
- c) balanceamento da ponte para leitura da f.e.m. dos termopares.

PIII.B.III.6 - O Circuito de Medida

O circuito de medida está esquematizado na Fig. 21.

PIII.B.III.7 - Resultados

1º caso: Solda por descarga de capacitores.

Os resultados obtidos estão expressos na Tab.3

		junção fria			
		I	II	III	IV
junção quente	1	A 1,297	B 0,413	C 0,198	D 0,200
	2	B 1,700	A 0,815	D 0,713	C 0,497
	3	C 2,381	D 1,623	A 1,563	B 1,458
	4	D 3,374	C 2,304	B 2,385	A 2,312

Tab. 3. Solda por descarga de capacitores; leituras em mV.

A análise de variância foi

QUADRADO LATINO SORTEADO

	I	II	III	IV
1	A	B	C	D
2	B	A	D	C
3	C	D	A	B
4	D	C	B	A

A, B, C, D, TERMOPARES, MODELO ALEATORIO.

I, II, III, IV, FONTES DE REFERENCIA, MODELO FIXO.

1, 2, 3, 4, TEMPERATURAS, MODELO ALEATORIO.

	I	II	III	IV
1	.12970000E+01	.41300000E+00	.19800000E+00	.20000000E+00
2	.17000000E+01	.81500000E+00	.71300000E+00	.49700000E+00
3	.23810000E+01	.16230000E+01	.15630000E+01	.14580000E+01
4	.33740000E+01	.23040000E+01	.23850000E+01	.23120000E+01

SL	TI	SQ
.21080000E+01	.11109160E+01	.19319820E+01
.37250000E+01	.34689062E+01	.43096030E+01
.70250000E+01	.12337656E+02	.12872023E+02
.10375000E+02	.26910155E+02	.27725861E+02

SC .87520000E+01 .51550000E+01 .48590000E+01 .44670000E+01

TJ .19149376E+02 .66435062E+01 .59024702E+01 .49885222E+01

SRA

SRB

SRC

SRD

.59870000E+01 .59560000E+01 .53800000E+01 .59100000E+01

TKA

TKB

TKC

TKD

.89610422E+01 .88684840E+01 .72361000E+01 .87320250E+01

SOMATORIA DOS TI = .43827633E+02

SOMATORIA DOS TJ = .36683874E+02

SOMATORIA DOS TK = .33797651E+02

SOMATORIA DOS SQ = .46839469E+02

SRH+SRB+SRC+SRD = SSL = SSC = .23233000E+02

TI = SL**2/4.

TJ = SC**2/4.

SQ...SOMA DOS QUADRADOS DOS ELEMENTOS DAS LINHAS.

SL...SOMA DOS ELEMENTOS DAS LINHAS.

SC...SOMA DOS ELEMENTOS DAS COLUNAS.

SRA...SOMA RESPOSTA TERMOPARES A.

SRB...SOMA RESPOSTA TERMOPARES B.

SRC...SOMA RESPOSTA TERMOPARES C.

SRD...SOMA RESPOSTA TERMOPARES D.

TK(A)(B)(C)(D) = SR(A)(B)(C)(D)**2/4.

FONTE DE VARIACAO	S.D.Q.	G.L.	Q.M.	F.
ENTRE TRATAMENTOS	.61884000E-01	3	.20628000E-01	.67082926E+02
ENTRE LINHAS	.10091866E+02	3	.33639553E+01	.10939692E+05
ENTRE COLUNAS	.29481070E+01	3	.98270233E+00	.31957799E+04
RESIDUO	.18450000E-02	6	.30750000E-03	
TOTAL	.13103702E+02			

Da tabela de distribuição de F de Snedcor com $\alpha = 1\%$ temos

$$F_{\text{tab.}}(3,6) = 9,78$$

$$F_{\text{calc.}}(3,6) = 67,08$$

Sendo $F_{\text{calc.}}(3,6)$ maior que $F_{\text{tab.}}(3,6)$, conclue-se que a hipótese dos termopares não diferirem entre si é rejeitada no nível 1%.

2º caso: Solda por chama oxí-acetilênica.

Os resultados obtidos estão expressos na Tab. 4

		junção fria			
		I	II	III	IV
junção quente	1	A 1,362	B 0,403	C 0,319	D 0,238
	2	B 1,611	A 0,642	D 0,560	C 0,479
	3	C 2,273	D 1,280	A 1,199	B 1,123
	4	D 3,182	C 2,181	B 2,021	A 2,031

Tab. 4. Solda oxí-acetilênica; leituras em mV.

A análise de variância foi

QUADRADO LATINO SORTEADO

	I	II	III	IV
1	A	B	C	D
2	B	A	D	C
3	C	D	A	B
4	D	C	B	A

A, B, C, D, TERMOPARES, MODELO ALEATORIO.

I, II, III, IV, FONTES DE REFERENCIA, MODELO FIXO.

1, 2, 3, 4, TEMPERATURAS, MODELO ALEATORIO.

	I	II	III	IV
1	.13620000E+01	.40300000E+00	.31900000E+00	.23800000E+00
2	.16110000E+01	.64200000E+00	.56000000E+00	.47900000E+00
3	.22730000E+01	.12800000E+01	.11990000E+01	.11220000E+01
4	.31820000E+01	.21810000E+01	.20210000E+01	.20310000E+01
	SL	TI		SQ
	.23220000E+01	.13479210E+01		.21758580E+01
	.32920000E+01	.27093160E+01		.35505260E+01
	.58740000E+01	.86259690E+01		.95014140E+01
	.94150000E+01	.22160556E+02		.23091287E+02

SC .84280000E+01 .45060000E+01 .40990000E+01 .38700000E+01

TJ .17757796E+02 .50560090E+01 .42004502E+01 .37442250E+01

SRA

SRB

SRC

SRD

.52340000E+0101 .51570000E+01 .52520000E+01 .52600000E+01

TKA

TKB

TKC

TKD

.68486890E+01 .66486622E+01 .68958760E+01 .69169000E+01

SOMATORIA DOS TI = .34843762E+02

SOMATORIA DOS TJ = .30778480E+02

SOMATORIA DOS TK = .27310127E+02

SOMATORIA DOS SQ = .38319085E+02

SRH+SRB+SRC+SRD = SSL = SSC = .20903000E+02

TI = SL**2/4.

TJ = SC**2/4.

SQ...SOMA DOS QUADRADOS DOS ELEMENTOS DAS LINHAS.

SL...SOMA DOS ELEMENTOS DAS LINHAS.

SC...SOMA DOS ELEMENTOS DAS COLUNAS.

SRA...SOMA RESPOSTA TERMOPARES A.

SRB...SOMA RESPOSTA TERMOPARES B.

SRC...SOMA RESPOSTA TERMOPARES C.

SRD...SOMA RESPOSTA TERMOPARES D.

TK(A)(B)(C)(D) = SR(A)(B)(C)(D)**2/4.

FONTE DE VARIACAO	S.D.Q.	G.L.	Q.M.	F.
ENTRE TRATAMENTOS	.16650000E-02	3	.55500000E-03	.91483517E+00
ENTRE LINHAS	.75353000E+01	3	.25117666E+01	.41402746E+04
ENTRE COLUNAS	.34700180E+01	3	.11566726E+01	.19066032E+04
RESIDUO	.36400000E-02	6	.60666666E-03	
TOTAL	.11010623E+02			

Como $F_{\text{calc.}}(3,6)$ é menor que 1, conclue-se imediatamente que a hipótese dos termopares não serem diferentes não pode ser rejeitada.

PIII.B.IV - Escolha da Conexão (Experimento Simplesmente Casualizado, Mod. Fixo)

PIII.B.IV.1 - Comentários sobre a amostragem

Com a finalidade de reduzir o custo dos termopares tornou-se necessário o uso de extensões bem como de uma conexão que satisfizesse ao mesmo tempo a certos requisitos como praticabilidade, economia e não introduzisse erros nas medidas. Para tanto tomaram-se 4 termopares com junção quente soldada com chama oxi-acetilênica e a cada um foi associada uma extensão com um tipo de conexão classificada com as letras A, B, C e D da maneira seguinte:

Conexão A: a fonte de referência é atingida pelo termopar sem extensão

Conexão B: a fonte de referência é atingida através de uma extensão de cobre soldada com prata, num termopar de 40 cm de comprimento

Conexão C: a fonte de referência é atingida através de uma extensão de cobre ligada a um termopar de 40 cm por meio de um plug comum

Conexão D: a fonte de referência é atingida através de uma extensão de cobre ligada a um termopar de 40 cm por meio de um micro-plug radial.

PIII.B.IV.2 - O delineamento⁽²¹⁾

Para determinar a conexão a ser usada foi ensaiado um "Experimento Simplesmente Casualizado", modelo fixo. Fixou-se uma temperatura e foram levantadas 10 medidas da resposta dos termopares com as várias conexões,

Os resultados estão expressos na Tab.5

		resposta em mV									
conexões	A	2,431	2,431	2,432	2,430	2,433	2,431	2,430	2,432	2,430	2,431
	B	1,902	1,989	2,381	1,940	1,991	2,394	2,401	1,873	2,195	1,986
	C	2,321	2,080	2,103	2,285	1,979	2,076	1,894	2,230	2,168	2,341
	D	2,430	2,432	2,430	2,431	2,432	2,431	2,433	2,432	2,433	2,431

Tab. 5. Resposta dos termopares, para uma mesma temperatura, usando diferentes conexões.

A análise de um delineamento simplesmente casualizado depende de um certo número de hipóteses. Vamos supor que cada uma das observações Y_{ji} , correspondente à j -ésima repetição do i -ésimo tratamento, seja dada por⁽⁷⁾⁽¹⁴⁾

$$Y_{ji} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ji}$$

onde

μ é a média geral

α_i são constantes fixas tais que $\sum \alpha_i = 0$ e representam o efeito médio das linhas

ε_{ji} são independentes e representam o erro com distribuição $N(0, \sigma^2)$

A hipótese nula, H_0 , que nos interessa

$$\text{todos os } \alpha_i = 0$$

é testada pela razão S_E^2/S_R^2 distribuída com $F[(k-1), (kn-k)]$.

A análise de variância é ⁽¹⁸⁾

FONTES DE VARIAÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	G.L.	Q.M.	E [Q.M.]	F
Entre plugs	$SQE = \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{n}$	$k - 1$	$\frac{SQE}{k-1} = S_E^2$	$\sigma^2 + \frac{n}{k-1} \sum_{i=1}^k \alpha_i$	$F = \frac{S_E^2}{S_R^2}$
Resíduo	SQR = por diferença	$kn - k$	$\frac{SQR}{kn-k} = S_R^2$		
Total	$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ji}^2 - \frac{T^2}{n}$	$kn - 1$			

Quadro prático para o cálculo da análise de variância ⁽¹⁸⁾

	A		B		C		D		
	x_A	x_A^2	x_B	x_B^2	x_C	x_C^2	x_D	x_D^2	
	2,431	5,910	1,902	3,617	2,321	5,387	2,430	5,905	
	2,431	5,910	1,989	3,956	2,080	4,326	2,432	5,915	
	2,432	5,915	2,381	5,669	2,103	4,422	2,430	5,905	
	2,430	5,905	1,940	3,763	2,285	5,221	2,431	5,910	
	2,433	5,919	1,991	3,964	1,979	3,916	2,432	5,915	
	2,431	5,910	2,394	5,731	2,076	4,309	2,431	5,910	
	2,430	5,905	2,401	5,764	1,894	3,587	2,433	5,919	
	2,432	5,915	1,873	3,508	2,230	4,972	2,432	5,915	
	2,430	5,905	2,195	4,818	2,168	4,700	2,433	5,919	
	2,431	5,910	1,986	3,944	2,341	5,480	2,431	5,910	
									$\frac{T^2}{n} = 207,731$
T_i	24,311		21,052		21,477		24,315		$T = 91,155$
$\sum_{j=1}^{n_i} x_{ji}^2$		59,102		44,734		46,320		59,123	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ji}^2 = 209,279$
$\frac{T_i^2}{n_i}$	59,102		44,319		46,126		59,122		$\sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} = 208,669$

O nosso quadro de análise de variância fica

FONTE DE VARIACÃO	SOMA DOS QUADRADOS	G.L.	Q.M.	$E[\bar{Q.M.}]$	F
Entre plugs	0,938	3	0,312	$\sigma^2 + \frac{10}{3} \sum_{i=1}^k \alpha_i$	19,50
Resíduo	0,610	36	0,016		
Total	1,548	39			

Da tabela de distribuição de F de Snedcor com $\alpha = 1\%$ temos

$$F_{\text{tab.}}(3,30) = 4,51$$

como

$$F_{\text{calc.}}(3,36) = 19,50 > F_{\text{tab.}}(3,30)$$

logo rejeitamos H_0 , os plugs não podem ser considerados iguais no nível 1%.

É necessário agora determinarmos quais são as amostras diferentes. Para tanto foi usado o método de Scheffé⁽¹⁸⁾ que tem a vantagem de utilizar os próprios elementos do quadro de análise de variância.

$$\Delta_{1\%} = \sqrt{S_R^2 \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right)} \sqrt{(k-1) F_{1\%}(k-1, kn-k)} = \sqrt{0,016 \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{10} \right)} \sqrt{3 \times 4,43} = 0,206$$

Apenas as amostras cujas médias diferem de mais de 0,206 é que são significativamente diferentes. Portanto resulta $A = D$, $B = C$ e $A, D \neq B, C$.

PIII.B.IV.3 - O Circuito de Medida

O circuito de medida está esquematizado na Fig. 22.

PIII.B.V - Reprodutibilidade do Conjunto "Blocos Casualizados, Modelo Aleatório"

PIII.B.V.1 - O Delineamento ⁽¹⁰⁾

O delineamento em Blocos Casualizados apresenta-se conveniente para tal experimento uma vez que se conhece uma fonte assinalável de erro no experimento (níveis de temperatura) e, pode-se assim evitar esta fonte de erro experimental, aumentando a precisão das comparações entre os vários termopares, eliminando destas comparações as diferenças grosseiras entre blocos.

A máxima precisão é obtida tendo em vista dois aspectos a saber:

- a) tornar máximas as diferenças gerais entre blocos
- b) tornar máximas as diferenças gerais no mesmo bloco

O controle local é representado pelos blocos, cada um dos quais inclui todos os tratamentos.

Dentro de cada bloco os tratamentos são atribuídos às parcelas inteiramente ao acaso.

A análise de um delineamento por Blocos Casualizados depende de um certo número de hipóteses. Vamos supor que cada uma das observações é a soma de quatro componentes, isto é, seja Y_{ij} a observação do i -ésimo tratamento no j -ésimo bloco, então

$$Y_{ij} = \mu + \gamma_i + \theta_j + \varepsilon_{ij}$$

onde

μ é a média geral

γ_i são o efeito médio do tratamento e são independentemente $N(0, \sigma_{\gamma_i}^2)$

θ_j são o efeito médio do bloco e são independentemente $N(0, \sigma_{\theta_j}^2)$

ϵ_{ij} são independentemente o erro com distribuição $N(0, \sigma^2)$

A hipótese nula, H_0 , que nos interessa

$$H_0 : \sigma_{\gamma_i}^2 = 0$$

é testada pela razão S_t^2/S_R^2 distribuída com $F[(k-1), (k-1)(m-1)]$

O quadro de análise de variância é ⁽¹⁸⁾

FONTE DE VARIAÇÃO	SOMA DOS QUADRADOS	G.L.	Q.M.	E[Q.M.]	F
Entre tratamento	$SQt = \frac{\sum_i T_{i.}^2}{m} - \frac{T_{..}^2}{mk}$	$k - 1$	$S_t^2 = \frac{SQt}{k-1}$	$\sigma^2 + m \sigma_{\gamma_i}^2$	$F_t = \frac{S_t^2}{S_R^2}$
Entre blocos	$SQB = \frac{\sum_j T_{.j}^2}{k} - \frac{T_{..}^2}{mk}$	$m - 1$	$S_B^2 = \frac{SQB}{m-1}$	$\sigma^2 + k \sigma_{\theta_j}^2$	$F_B = \frac{S_B^2}{S_R^2}$
Resíduo	$SQR = SQt - SQB$	$(k-1)(m-1)$	$S_R^2 = \frac{SQR}{(k-1)(m-1)}$	σ^2	
Total	$SQT = \sum_{ij} Y_{ij}^2 - \frac{T_{..}^2}{mk}$	$mk - 1$			

onde

$T_{i.}$ = total dos tratamentos

$T_{.j}$ = total dos blocos

$T_{..}$ = total geral

PIII.B.V.2 - Comentários sôbre a Amostragem

Quatro termopares foram sorteados ao acaso de uma população de 24 e a cada um foi associada ao acaso uma extensão de cobre conectada por um micro-plug radial. A extremidade livre da extensão foi ligada à chave de comutação. Uma única outra extensão de cobre, na qual é intercalado um par de cromel-alumel de 20 cm soldado com prata, liga a saída da chave, através dos tubos de Dewar, com a entrada dos aparelhos de medida.

PIII.B.V.3 - Sequência Operacional

Para evitar o efeito de pequenas variações de temperatura devidas às oscilações do sistema termostático, nos impomos não passar de trinta segundos para as operações necessárias para cada levantamento que, cronologicamente, uma vez estabilizada a temperatura desejada, foram:

- a) ligação da impressora para observação da variação de temperatura durante a operação;
- b) leitura no voltímetro digital da f.e.m. dos 4 termopares;
- c) balanceamento da ponte para leitura da f.e.m. dos 4 termopares.

PIII.B.V.4 - O Circuito de Medida

O circuito de medida está esquematizado na Fig. 22.

PIII.B.V.5 - Resultados

Os termopares foram sorteados de uma população de 24 elementos e numerados de 1 a 4.

O banho termostático foi deixado estabilizar-se em 4 temperaturas ao acaso, sucessivamente e durante uma hora cada. Assim sendo, foi medida a f.e.m. para cada par em cada temperatura, obtendo o seguinte quadro

		blocos			
		I	II	III	IV
termopares	1	0,958	1,306	1,845	3,254
	2	0,960	1,307	1,846	3,255
	3	0,959	1,305	1,847	3,256
	4	0,959	1,307	1,845	3,254

Tab. 6. Blocos Casualizados, Resposta em mV de quatro termopares (tratamento) em quatro níveis de temperatura (blocos).

A análise de variância foi

BLOCOS CASUALIZADOS

	I	II	III	IV
1	.95800000E+00	.13060000E+01	.18450000E+01	.32540000E+01
2	.96000000E+00	.13070000E+01	.18460000E+01	.32550000E+01
3	.95900000E+00	.13050000E+01	.18470000E+01	.32560000E+01
4	.95900000E+00	.13070000E+01	.18450000E+01	.32540000E+01
	SL	TI	SQ	SML
	.73630000E+01	.13553442E+02	.16615941E+02	.18407500E+01
	.73680000E+01	.13571856E+02	.16632590E+02	.18420000E+01
	.73670000E+01	.13568172E+02	.16635651E+01	.18417500E+01
	.73650000E+01	.13560806E+02	.16620471E+02	.18412500E+01
SC	.38360000E+01	.52250000E+01	.73830000E+01	.13019000E+02
TJ	.36787240E+01	.68251562E+01	.13627172E+02	.42373590E+02

SOMATORIA DOS TI = .54254276E+02

SOMATORIA DOS TJ = .66504642E+02

SOMATORIA DOS SQ = .66504653E+02

I, II, III, IV, TEMPERATURAS, MODELO ALEATORIO.

1, 2, 4, TERMOPARES, MODELO ALEATORIO.

TI = SL**2/4.

TJ = SC**2/4.

SQ...SOMA DOS QUADRADOS DOS ELEMENTOS DAS LINHAS.

SL...SOMA DOS ELEMENTOS DAS LINHAS.

SC...SOMA DOS ELEMENTOS DAS COLUNAS.

FONTE DE VARIACAO	S.D.Q	G.L	Q.M.	F.
ENTRE TRATAMENTOS	.40000000E-05	3	.13333333E-05	.17142856E+01
ENTRE BLOCOS	.12250370E+02	3	.40834566E+01	.52501585E+07
RESIDUOS	.70000000E-05	9	.77777777E-06	
TOTAL	.12250381E+02	15		

Da tabela de distribuição F de Snedcor com $\alpha = 5\%$ temos

$$F_{\text{tab.}}(3,9) = 3,86$$

e

$$F_{\text{calc.}}(3,9) = 1,71$$

Sendo $F_{\text{calc.}}(3,9)$ menor que $F_{\text{tab.}}(3,9)$ conclue-se que a hipótese dos termopares não diferirem entre si não pode ser rejeitada no nível 5%.

PIII.B.VI - Princípio de Calibração

A junção quente de 4 termopares foi colocada num banho termostático em volta do transdutor de quartzo. Cada extremidade livre foi conectada por micro-plug radial a uma extensão de cobre ligada a uma chave seletora. Na saída da chave foi conectada uma única outra extensão de cobre na qual foi intercalado 20 cm do par Cromel-Alumel soldado com prata, sendo 2 das soldas passantes, cada, num tubo de Dewar. O terminal desta extensão foi ligado ao potenciômetro e ao voltímetro digital.

A temperatura t_{68} , medida por meio do termômetro de quartzo, foi registrada na impressora cada vez que se fizesse um levantamento.

PIII.B.VII - O Circuito de Medida

O circuito de medida está esquematizado na Fig. 22.

PIII.B.VIII - Padrão de Referência

O termômetro de quartzo foi previamente calibrado apenas no ponto do gelo fundente pois, entre 0 °C e 100 °C, o fator de calibração, as correções aritméticas especificadas na carta de calibração, a histerese e a linearidade do transdutor de quartzo, garantem medidas de temperatura com um erro de apenas $\pm 0,003$.

Para a obtenção do ponto 0 °C foi usado um tubo de Dewar de 25 cm de altura e 8 cm de diâmetro interno com uma mistura de água bi-destilada e gelo finamente moído e compactado. Uma hora após a preparação foi introduzido o transdutor de quartzo bem como a junta fria dos termopares, no centro do tubo de Dewar e a 10 cm da superfície da mistura. O conjunto foi agitado por subsistir entre a mistura e os elementos sensores um pouco de ar que diminua o contacto térmico.

PIII.B.IX - Cronologia da Calibração

Nos impomos efetuar a calibração de 2 em 2 graus centígrados entre 0 °C e 100 °C, contudo, o acréscimo $\Delta t_{68} = 2$ °C não pôde ser repetido constantemente devido à dificuldade no ajuste da potência dissipada no banho termostático.

Foram considerados válidos somente os conjuntos de medidas levantados após constatar a ausência de desvio na temperatura durante o tempo de operação.

Uma primeira calibração desenrolou-se durante 10 dias, em 60 horas. Os resultados estão expressos na Tab. 7. Nesta tabela estão resumidas:

- a) a temperatura registrada na impressora do termômetro de quartzo, em °C;
- b) a média aritmética dos valores de f.e.m. dos 4 termopares, em mV.

Uma segunda calibração, após um recozimento de 300 horas em 500°C, foi efetuada, apenas para 8 pontos, durante 2 dias em 12 horas.

Os resultados, bem como f.e.m./t₆₈, estão resumidos na Tab. 8.

Para cada temperatura foi levantada a f.e.m. dos 4 termopares e registrada a temperatura do banho termostático na impressora do termômetro de quartzo numa operação que não passa de 30 segundos.⁽¹⁵⁾

CONCLUSÕES

Os delineamentos usados neste trabalho permitiram determinar, com sucesso, uma técnica de fabricação de micro-termopares que garantisse a reprodutibilidade dos mesmos, como também, permitisse obter uma curva de calibração entre 0 °C e 100 °C com uma região de 95% de confiança de $\pm 0,5$ °C.

O delineamento em "Quadrados Latinos" (PIII.B.III) foi utilizado para escolher o tipo de solda da junção quente. As tabelas 3 e 4 mostram, respectivamente, no caso de solda por descarga de capacitores e por chama oxi-acetilênica, a resposta de quatro termopares, sorteados ao acaso de uma população, em quatro níveis de temperatura para a junção quente e para a junção fria. Da análise de variância concluiu-se que, somente no caso de solda oxi-acetilênica, não pode ser rejeitada a hipótese dos termopares não serem diferentes. A explicação deste fato deve-se à escolha do fluxo Macam e à tecnologia de preparação descrita na parte (PIII.A) que conseguiu eliminar problemas, tais como, oxidação, inclusão de escórias e formação de bolhas cuja presença é normalmente detectada através de ensaios não destrutivos por Raios X.

Uma vez escolhido o tipo de solda, em vista da necessidade de recorrer a extensões para reduzir o custo dos termopares, foi utilizado um "Delineamento Simplesmente Casualizado" (PIII.B.IV) com a finalidade de determinar qual o tipo de conexão que satisfizesse ao mesmo tempo, a certos requisitos como praticabilidade, economia e não introduzisse erro nas medidas. A tabela 5 mostra a resposta de quatro termopares para uma mesma temperatura com referência a 0 °C, usando, cada um, uma conexão diferente. Da análise de variância concluiu-se que as amostras não podem ser consideradas iguais no nível 1%. Através do método de Scheffé puderam ser determinadas as amostras diferentes, recaindo a escolha sobre o micro-plug radial. Tal escolha é justificável uma vez que o termopar, conectado à extensão por este tipo de conexão, mostrou não diferir do termopar sem extensão. A explica

ção dêste fato deve-se aos contatos precários dos plugs comuns e à introdução da solda, como novo elemento termoelétrico no circuito, que, por estar exposta a um gradiente de temperatura, devido à proximidade da fonte de calor, contribui positiva ou negativamente para a f.e.m. gerada pelo termopar.

Com êstes resultados foi possível testar a reprodutibilidade do conjunto por meio de um delineamento em "Blocos Casualizados". Da análise de variância concluiu-se que a hipótese dos termopares não diferirem entre si não pode ser rejeitada no nível 5%, como era de se esperar (PIII.B.V).

Comprovada a reprodutibilidade procedeu-se à calibração propriamente dita (Tab. 7). A curva f.e.m. = $f(t_{68})$ apresentou um leve desvio da Curva Internacional, aproximadamente 20/1000 de mV, Fig. 23.

A segunda calibração (Tab. 8), após um recozimento de 300 horas em 500 °C, cujos resultados estão na curva f.e.m./ $t_{68} = f(t_{68})$, é uma prova em favor do tempo de recozimento e de sua ação sobre os termopares. De fato, ao se comparar as curvas f.e.m./ $t_{68} = f(t_{68})$, sem recozimento e após 300 horas de recozimento, Fig. 24, notamos que os termopares que receberam êste tratamento são mais regulares. A dispersão normal dos pontos experimentais em baixas temperaturas ficou muito acentuada pela resolução do gráfico usado.

Os valores experimentais, observados na calibração, mostraram ser razoável uma regressão linear.⁽¹⁸⁾ A equação da reta para prever Y (mV), dado X (°C)

$$\hat{Y} = 0,041 X^*$$

proveniente da regressão de Y (mV) sobre X (°C), é uma prova em favor da concordância do ajuste da curva experimental com a Curva Internacional que prevê, para o Cromel-Alumel tipo K, aproximadamente 41 μ V por °C.

Da equação da reta para prever X (°C), dado Y (mV)

$$\hat{X} = 24,357 Y^*$$

proveniente da regressão de X (°C) sobre Y (mV), pôde-se determinar a região de 95% de confiança para as temperaturas, obtendo-se

$$Y^* = 0,1344 \rightarrow \hat{X} = 3,27 \rightarrow X_{\text{obs.}} = 3,27 \pm 0,41$$

$$Y^* = 2,1000 \rightarrow \hat{X} = 51,13 \rightarrow X_{\text{obs.}} = 51,13 \pm 0,42$$

$$Y^* = 4,0800 \rightarrow \hat{X} = 99,37 \rightarrow X_{\text{obs.}} = 99,37 \pm 0,43$$

que está dentro da tolerância desejada e bem abaixo do valor fornecido pelas normas I.S.A. para os termopares de Cromel-Alumel tipo K.⁽³⁾

BIBLIOGRAFIA

- 1 - A.S.M.E. POWER TEST CODES OF 1940. Information on instruments and Apparatus. S.l.p., A.S.M.E., 1940. part.3, cap.3, p.3-21.
- 2 - BARBER, C.R. The international practical temperature scale of 1968. Metrologia, Berlim, 5(2):35-44, 1969.
- 3 - CALDWELL, F.R. Thermocouple materials. Washington, D.C., National Bureau of Standards, 1962. 43p. (N.B.S. Monograph: n° 40).
- 4 - CHAKRABARTI, M.C. Mathematics of design and analysis of experiments. London, Asia Publishing House /c1962/ 120p.
- 5 - COOK, Nathan H. and RABINOWICZ, Ernest. Physical measurement and analysis. Reading, Mass., Addison-Wesley /c1963/ 312p.
- 6 - DANEMAN, H.L. and MERGNER, G.C. Precise resistance thermometry: a review. Philadelphia, Leeds and Northrup Company, s.d.
- 7 - ESTADOS UNIDOS. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. Experimental statistics. Washington, D.C., National Bureau of Standards, 1963. lv. (N.B.S. Handbook: n° 91).
- 8 - FINCH, D.I. General principles of thermoelectric thermometry. In: HERZFELD, Charles M., ed. Temperature, its measurement and control in science and industry. New York, Reinhold /c1962/ v.3, part 2, p.3-32.
- 9 - HILAIRE, P. Mesure des temperatures par thermocouple. Grenoble, Centre d'Etudes Nucléaires, 1958. 8p.
- 10 - JOHNSON, Palmer O. Statistical methods in research. New York, Prentice-Hall /1950/ 377p.
- 11 - KELLY, M.J. and JOHNSTON, W.W. Radiation effects on thermocouples. In: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. Instrumentation and controls division. Oak Ridge, Tenn., ORNL, 1959. p.77-79 (ORNL-2787 Instruments)

- 12 - MILLER, Irwin and FREUND, John E. Probability and statistics for engineers. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall /c1965/ 432p.
- 13 - MOOD, Alexander McFarlane. Introduction to the theory of statistics. New York, McGraw-Hill, 1950. 433p.
- 14 - PENG, K.C. The design and analysis of scientific experiments: and introduction with some emphasis on computation. Reading, Mass., Addison-Wesley /c1967/ 252p.
- 15 - PERRAUD, J. Resultats d'etalonnage de 20 °C en 20 °C de thermocouples de nature differente: comparaison avec la courbe internationale. Grenoble, Centre d'Etudes Nucléaires, 1963. 9p. illus.
- 16 - ROSS, C.W. Effect of thermal neutron irradiation on thermocouples and resistance thermometers. IRE Transactions on Nuclear Science, New York, 8(4):110-118, 1961.
- 17 - RUBIN, L.G. Temperature-concepts, scales and measurement techniques. Philadelphia, Leeds and Northrup Company, s.d. 20p.
- 18 - TORRES, Osvaldo Fadigas. Curso de estatística. São Paulo, s.c.p., 1966. v.1 e v.2.
- 19 - SAMSONOV, Crigorii Valentinowich and KISLYI, P.S. High-temperature nonmetallic thermocouples and sheaths. New York, Consultants Bureau, 1967. p.1-23.
- 20 - VILLAMAYOR, Michel. Étude de thermocouples pour le reperage des hautes temperatures. Paris, Commissariat à l'Energie Atomique, 1967. p. 9-15. (Theses - Faculté des Sciences de l'Université de Lyon). (Rapport CEA - R 3182).
- 21 - WINER, B.J. Statistical principles in experimental design. New York, McGraw-Hill, 1962. 672p.
- 22 - YOCKEI, Hubert P. Use of thermocouples in a radiation field. The Physical Review, New York, 101(4):1426, 1956.

APÊNDICE I

PROGRAMA PARA COMPUTADOR PARA DELINEAMENTOS EM QUADRADOS LATINOS

Nome do programa	Quadrado Latino (4 por 4)
Computador para o qual foi preparado	I.B.M. 1620
Tempo de processamento	1 minuto e 30 segundos
Linguagem de programação	Fortran II-D
Posições de memória	9706
Equivalência de variáveis	
A	- Matriz das respostas dos termopares
SL	- Soma dos elementos das linhas
TI	- Quadrado da soma dos elementos das linhas/nº de tratamentos
SQ	- Soma dos quadrados dos elementos das linhas
SC	- Soma dos elementos das colunas
TJ	- Quadrado da soma dos elementos das colunas/nº de tratamentos
TA	- Respostas do tratamento A
TB	- Respostas do tratamento B
TC	- Respostas do tratamento C
TD	- Respostas do tratamento D
SRA	- Soma das respostas do tratamento A
SRB	- Soma das respostas do tratamento B
SRC	- Soma das respostas do tratamento C
SRD	- Soma das respostas do tratamento D
TKA	- Quadrado da soma das respostas do tratamento A/nº de tratamentos
TKB	- Quadrado da soma das respostas do tratamento B/nº de tratamentos
TKC	- Quadrado da soma das respostas do tratamento C/nº de tratamentos
TKD	- Quadrado da soma das respostas do tratamento D/nº de tratamentos
STI	- Soma dos TI
STJ	- Soma dos TJ
STK	- Soma dos TK (A), (B), (C) e (D)
SSQ	- Soma dos SQ
SSC	- Soma dos SC
SX	- Quadrado do total das somas dos elementos das colunas/quadrado do nº de tratamentos

SDQT	- Soma de quadrados entre tratamentos
QMT	- Quadrado médio entre tratamentos
FT	- F de Snedcor para tratamentos
SDQL	- Soma de quadrados entre linhas
QML	- Quadrado médio entre linhas
FL	- F de Snedcor para linhas
SDQC	- Soma de quadrados entre colunas
QMC	- Quadrado médio entre colunas
FC	- F de Snedcor para colunas
SDQR	- Soma de quadrados para resíduo
QMR	- Quadrado médio, resíduo
SDQTOT	- Soma de quadrados total

Listagem

```

DIMENSION A(5,5),SC(4),TJ(4),TA(4),TB(4),TC(4),TD(4)
PRINT 1
1 FORMAT(1H ,24HQADRADO LATINO SORTEADO,////)
PRINT 2
2 FORMAT(1H ,56X,1H1,10X,2H11,9X,3H111,8X,2H1V,////////)
PRINT 3
3 FORMAT(1H ,40X,1H1,15X,1HA,10X,1HB,10X,1HC,10X,1HD,/)
PRINT 4
4 FORMAT(1H ,40X,1H2,15X,1HB,10X,1HA,10X,1HD,10X,1HC,/)
PRINT 5
5 FORMAT(1H ,40X,1H3,15X,1HC,10X,1HD,10X,1HA,10X,1HB,/)
PRINT 6
6 FORMAT(1H ,40X,1H4,15X,1HD,10X,1HC,10X,1HB,10X,1HA,//
//)
PRINT 7
7 FORMAT(1H ,18HA,B,C,D,TERMOPARES,/)
PRINT 8
8 FORMAT(1H ,44H1,11,111,IV,FONTES DE REFERENCIA,MODELO
FIXO,/)
PRINT 9
9 FORMAT(1H ,37H1,2,3,4,TEMPERATURAS,MODELO ALEATORIO,
////)
PRINT10
10 FORMAT(20X,1H1,16X,2H11,14X,3H111,14X,2H1V,25X,2HSL,1
7X,2HT1,16X,
12HSQ,////////)
READ 59,((A(I,J),J=1,4),I=1,4)
STI=0
SSQ=0
STJ=0
59 FORMAT(4(E14.8))
DO 50 I=1,4
SL=0
SQ=0
DO 60 J=1,4
SL=SL+A(I,J)
SQ=SQ+(A(I,J))**2
60 CONTINUE
SSQ=SSQ+SQ.
TI=SL**2/4.
STI=STI+TI
PRINT 11,I,(A(I,J),J=1,4),SL,TI,SQ
11 FORMAT(1H ,12,10X,4(E14.8,3X),10X,3(E14.8,5X),////////)
50 CONTINUE
SSC=0
DO 70 J=1,4
SC(J)=0
DO 80 I=1,4
SC(J)=SC(J)+A(I,J)
80 CONTINUE
SSC=SSC+SC(J)
TJ(J)=(SC(J))**2/4.
STJ=STJ+TJ(J)
70 CONTINUE

```

```

PRINT 101, (SC(J), J=1,4), (TJ(J), J=1,4)
101 FORMAT(1H , 2HSC, 10X, 4(E14.8, 3X), //, 1X, 2HTJ, 10X, 4(E14.
8, 3X), //)
PRINT 102
102 FORMAT(1H , 18X, 3HSRA, 13X, 3HSRB, 15X, 3HSRC, 14X, 3HSRD, /)
READ69, (TA(I), I=1,4)
READ69, (TB(I), I=1,4)
READ69, (TC(I), I=1,4)
READ69, (TD(I), I=1,4)
69 FORMAT(4(E14.8))
SRA=0
SRB=0
SRC=0
SRD=0
DO90I=1,4
SRA=SRA+TA(I)
SRB=SRB+TB(I)
SRC=SRC+TC(I)
SRD=SRD+TD(I)
90 CONTINUE
PRINT103, SRA, SRB, SRC, SRD
103 FORMAT(1H , 12X, 4(E14.8, 3X), //)
PRINT114
114 FORMAT(1H , 18X, 3HTKA, 13X, 3HTKB, 15X, 3HTKC, 14X, 3HTKD, /)
TKA=SRA**2/4.
TKB=SRB**2/4.
TKC=SRC**2/4.
TKD=SRD**2/4.
PRINT115, TKA, TKB, TKC, TKD
115 FORMAT(1H , 12X, 4(E14.8, 3X), //)
STK=TKA+TKB+TKC+TKD
PRINT116, STI, STJ, STK, SSQ, SSC
116 FORMAT(1H , 50X, 18HSOMATORIO DOS TI =, E14.8, /, 51X, 18HS
OMATORIO DOS
ITJ =, E14.8, /, 51X, 18HSOMATORIO DOS TK =, E14.8, /, 51X, 18
HSOMATORIO DO
IS SQ =, E14.8, /, 46X, 29HSRH+SRB+SRC+SRD = SSL = SSC =, E
14.8, //)
PRINT104
104 FORMAT(1H , 13HTI = SL**2/4., /)
PRINT105
105 FORMAT(1H , 13HTJ = SC**2/4., /)
PRINT106
106 FORMAT(1H , 48HSQ...SOMA DOS QUADRADOS DOS ELEMENTOS D
AS LINHAS, /)
PRINT107
107 FORMAT(1H , 34HSL...SOMA DOS ELEMENTOS DAS LINHAS, /)
PRINT108
108 FORMAT(1H , 35HSC...SOMA DOS ELEMENTOS DAS COLUNAS, /)
PRINT109
109 FORMAT(1H , 32HSRA...SOMA RESPOSTA TERMOPARES A, /)
PRINT110
110 FORMAT(1H , 32HSRB...SOMA RESPOSTA TERMOPARES B, /)
PRINT111
111 FORMAT(1H , 32HSRC...SOMA RESPOSTA TERMOPARES C, /)
PRINT112
112 FORMAT(1H , 32HSRD...SOMA RESPOSTA TERMOPARES D, /)
PRINT113
113 FORMAT(1H , 37HTK(A)(B)(C)(D) = SR(A)(B)(C)(D)**2/4., /)

```

```

      ////)
      PRINT117
117 FORMAT(1H ,14X,17H FONTE DE VARIACAO,15X,6HS.D.Q.,15X,
      . 4HG.L.,15X,4H
      1Q.M.,15X,2HF.,////)
      SX=SSC**2/4.**2
      SDQT=STK-SX
      SDQL=STI-SX
      SDQC=STJ-SX
      SDQTOT=SSQ-SX
      SDQR=SDQTOT-SDQT-SDQL-SDQC
      QMT=SDQT/3.
      QML=SDQL/3.
      QMC=SDQC/3.
      QMR=SDQR/6.
      FT=QMT/QMR
      FL=QML/QMR
      FC=QMC/QMR
      PRINT118,SDQT,QMT,FT,SDQL,QML,FL,SDQC,QMC,FC,SDQR,QMR
      ,SDQTOT
118 FORMAT(1H ,14X,17H HENTRE TRATAMENTOS,11X,E14.8,13X,1H3
      ,12X,E14.8,4X
      1,E14.8,///,15X,12H HENTRE LINHAS,16X,E14.8,13X,1H3,12X,
      E14.8,4X,E14.
      18,///,15X,13H HENTRE COLUNAS,15X,E14.8,13X,1H3,12X,E14.
      8,4X,E14.8,//
      1/,15X,3H RES,25X,E14.8,13X,1H6,12X,E14.8,///,15X,5H TOT
      AL,23X,E14.8)
      CALL EXIT
      END

```

APÊNDICE II

PROGRAMA PARA COMPUTADOR PARA DELINEAMENTOS EM BLOCOS CASUALIZADOS

Nome do programa	Blocos Casualizados (4 por 4)
Computador para o qual foi preparado	I.B.M. 1620
Tempo de processamento	1 minuto
Linguagem de programação	Fortran II-D
Posições de memória	5830
Equivalência de variáveis	

A	- Matriz das respostas dos termopares
SL	- Soma dos elementos das linhas
TI	- Quadrado da soma dos elementos das linhas/nº de tratamentos
SQ	- Soma dos quadrados dos elementos das linhas
SML	- Média das linhas
SC	- Soma das colunas
TJ	- Quadrado da soma dos elementos das colunas/nº de tratamentos
STI	- Soma dos TI
STJ	- Soma dos TJ
SSQ	- Soma dos SQ
SSC	- Soma dos SC
SX	- SSQ / n^2 / nº de tratamentos x nº de blocos
SDQL	- Soma de quadrados entre linhas
QML	- Quadrado médio entre linhas
FL	- F de Snedcor para linhas
SDQC	- Soma de quadrados entre colunas
QMC	- Quadrado médio entre colunas
FC	- F de Snedcor para colunas
SDQR	- Soma de quadrados para resíduo
QMR	- Quadrado médio, resíduo
SDQTOT	- Soma de quadrados total

Listagem

```

DIMENSION A(10,4),SC(4),TJ(4)
PRINT 10
10 FORMAT(1H ,19HBLOCOS CASUALIZADOS,//////)
PRINT 20
20 FORMAT(1H ,13X,1HI,16X,2HII,14X,3HIII,14X,2HIV,19X,2H
      SL,14X,2HTI,1
14X,2HSQ,18X,3HSML,//////)
READ30,((A(I,J),J=1,4),I=1,4)
30 FORMAT(4(E14.8))
STI=0
SSQ=0
STJ=0
DO 40 I=1,4
SL=0
SQ=0
DO 50 J=1,4
SL=SL+A(I,J)
SML=SL/4.
SQ=SQ+(A(I,J))**2
50 CONTINUE
SSQ=SSQ+SQ.
TI=SL**2/4.
STI=STI+TI
PRINT 60,I,(A(I,J),J=1,4),SL,TI,SQ,SML
60 FORMAT(1H ,13,4X,4(E14.8,3X),4X,4(E14.8,3X),//////)
40 CONTINUE
SSC=0
DO 70 J=1,4
SC(J)=0
DO 80 I=1,4
SC(J)=SC(J)+A(I,J)
80 CONTINUE
SSC=SSC+SC(J)
TJ(J)=(SC(J))**2/4.
STJ=STJ+TJ(J)
70 CONTINUE
PRINT 90,(SC(J),J=1,4),(TJ(J),J=1,4)
90 FORMAT(1H ,2HSC,5X,4(E14.8,3X),//,1X,2HTJ,5X,4(E14.8,
      3X),//)
PRINT 100,STI,STJ,SSQ
100 FORMAT(1H ,50X,18HSOMATORIO DOS TI =,E14.8,/,51X,18HS
      OMATORIO DOS
      ITJ =,E14.8,/,51X,18HSOMATORIO DOS SQ =,E14.8,//////)
PRINT 110
110 FORMAT(1H ,41HI,II,III,IV,TEMPERATURAS,MODELO ALEATOR
      IO,/)
PRINT 120
120 FORMAT(1H ,31H1,2...4,TERMOPARES,MODELO FIXO,/)
PRINT 130
130 FORMAT(1H ,13HTI = SL**2/4.,/)
PRINT 140
140 FORMAT(1H ,14HTJ = SC**2/4.,/)
PRINT 150
150 FORMAT(1H ,48HSQ...SOMA DOS QUADRADOS DOS ELEMENTOS D
      AS LINHAS,/)

```



```

PRINT 160
160 FORMAT(1H ,34HSL...SOMA DOS ELEMENTOS DAS LINHAS,/)
PRINT 170
170 FORMAT(1H ,35HSC...SOMA DOS ELEMENTOS DAS COLUNAS,///
///)
PRINT 180
180 FORMAT(1H ,14X,17HFORTE DE VARIACAO,15X,6HS.D.Q.,15X,
4HG.L.,15X,4H
IQ.M.,15X,2HF.,////)
SX=SSC**2/(4.*4.)
SDQL=STI-SX
SDQC=STJ-SX
SDQTOT=SSQ-SX
SDQR=SDQTOT-SDQL-SDQC
QML=SDQL/3.
QMC=SDQC/3.
QMR=SDQR/9.
FL=QML/QMR
FC=QMC/QMR
PRINT 190,SDQL,QML,FL,SDQC,QMC,FC,SDQR,QMR,SDQTOT
190 FORMAT(1H ,14X,17HENTRE TRATAMENTOS,11X,E14.8,13X,1H3
,12X,E14.8,4X
1,E14.8,///,15X,12HENTRE BLOCOS,16X,E14.8,13X,1H3,12X,
E14.8,4X,E14.
18,///,15X,3HRES,25X,E14.8,13X,1H9,11X,E14.8,///,15X,5
HTOTAL,23X,E1
14.8,13X,2H15,//////)
CALL EXIT
END

```

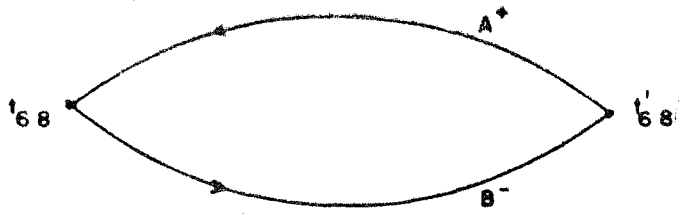


Fig. 1. Efeito Seebeck

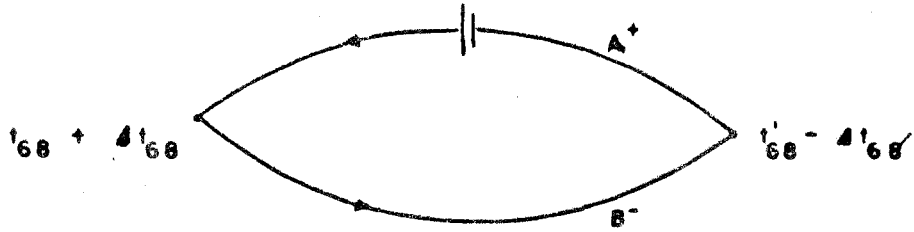


Fig. 2. Efeito Peltier

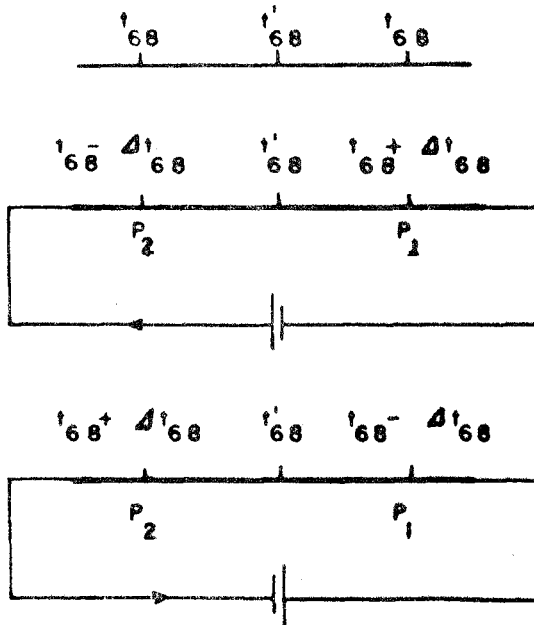


Fig. 3. Efeito Thomson

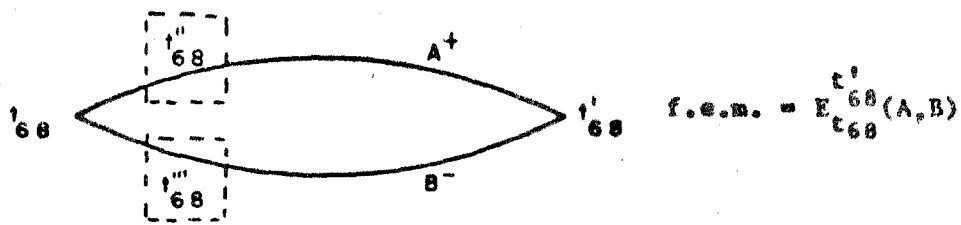


Fig. 4. Lei dos Circuitos Homôgeneos

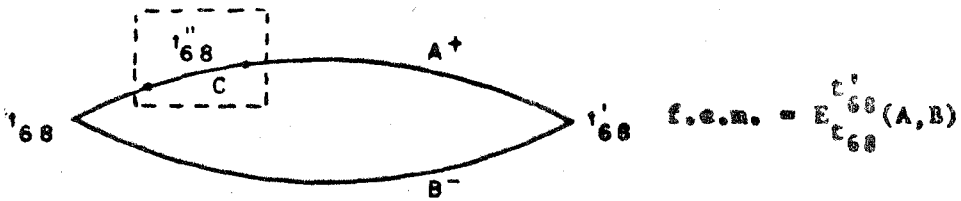


Fig. 5. Lei dos Metais Intermediários

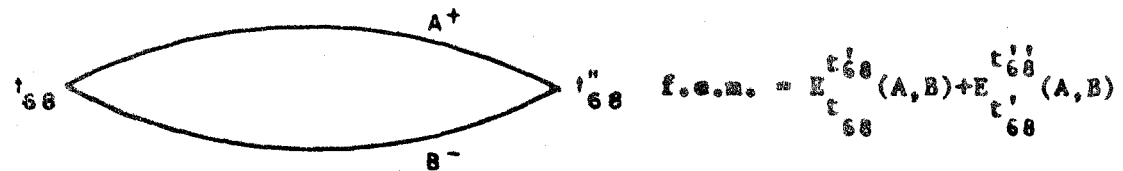
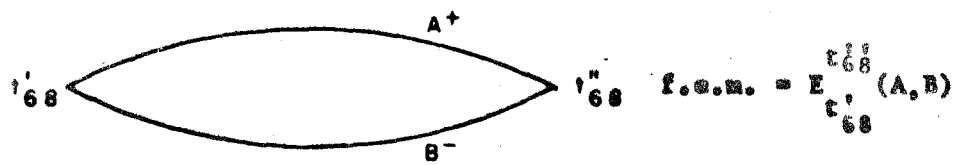
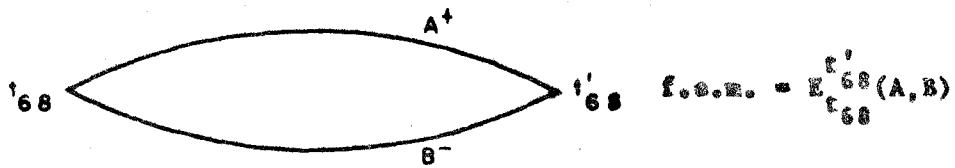


Fig. 6. Lei das Temperaturas Sucessivas ou Intermediárias

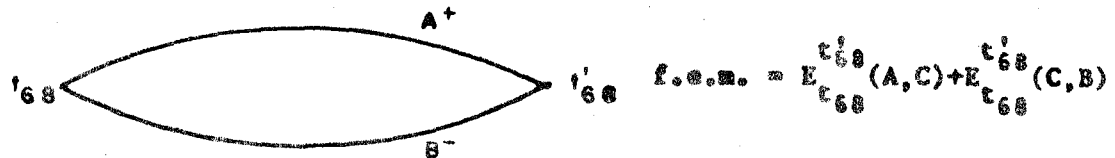
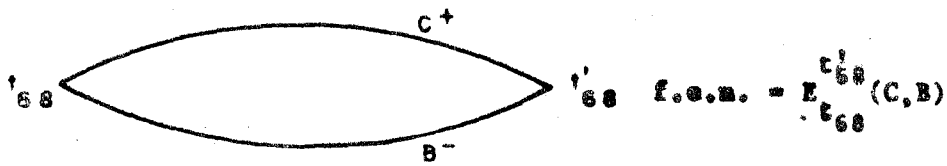
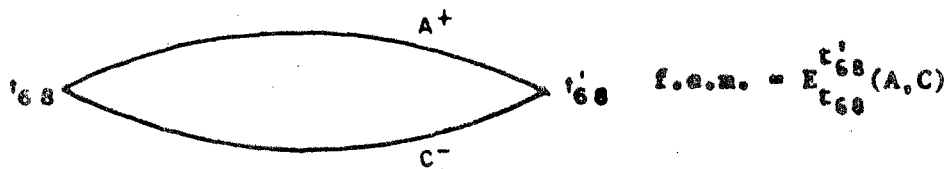


Fig. 7. Lei da Aditividade das f.e.m. para Metais

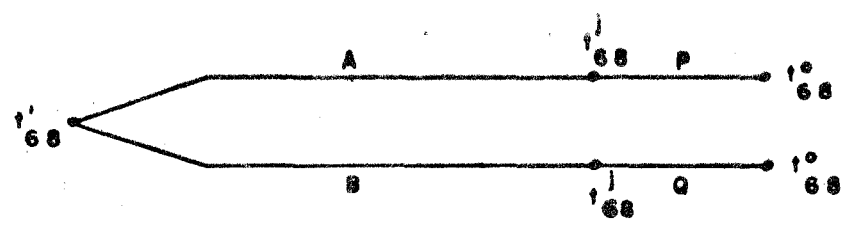


Fig. 8. Compensação da Junção Fria

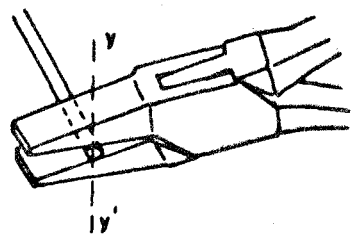


Fig. 9. Primeira Operação de Desencapamento

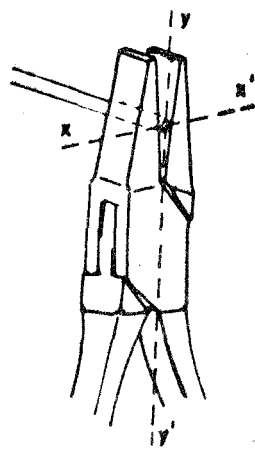


Fig. 10. Segunda Operação de Desencapamento

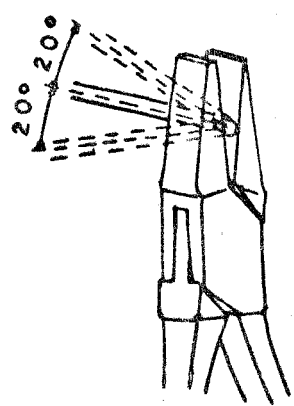


Fig. 11. Terceira Operação de Desencapamento

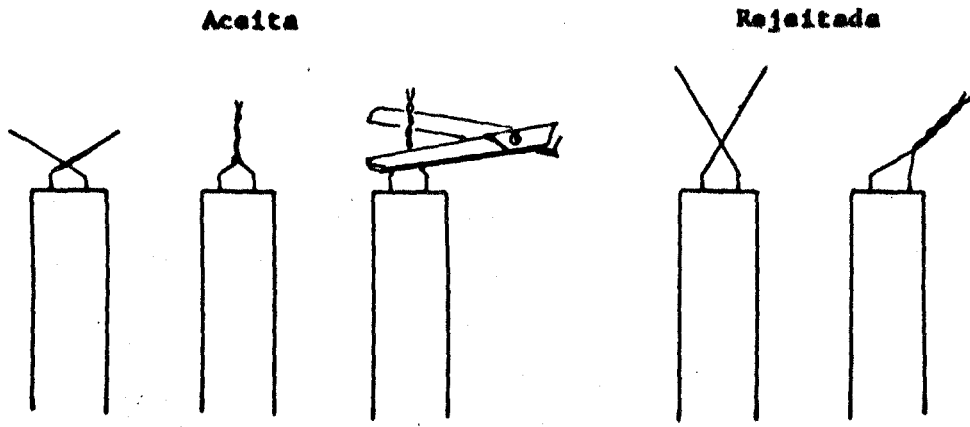


Fig. 12. Preparação dos Fios para Solda

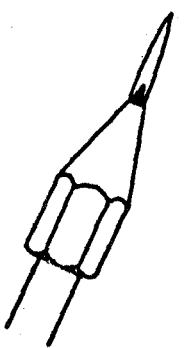


Fig. 13. Aspecto da
ame Oxi-Acetilênica



Fig. 14. Aplicação do
Fluxo Macam

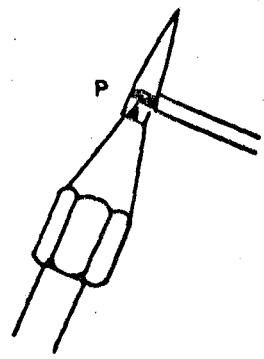


Fig. 15. Maneira de
efetuar a Solda

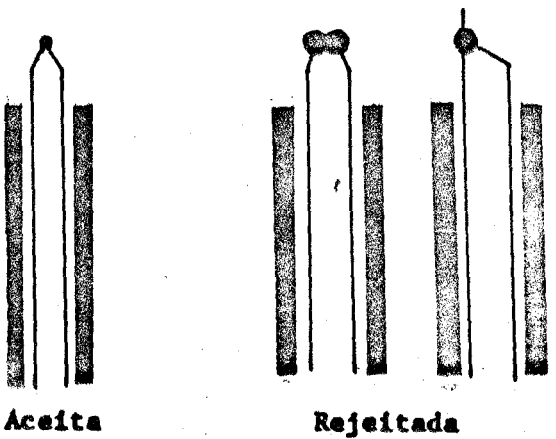


Fig. 16. Possíveis Aspectos de Solda

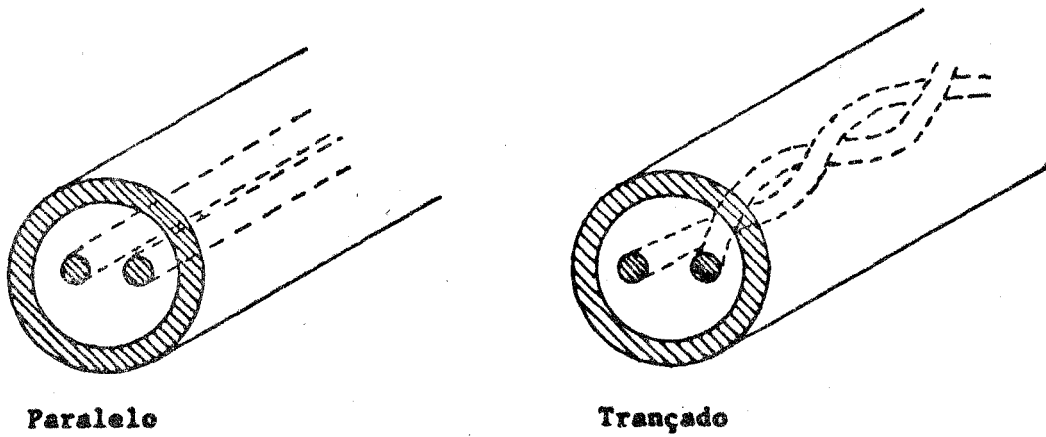


Fig. 17. Montagem dos Elementos Termoelétricos na Bainha de Aço Inoxidável

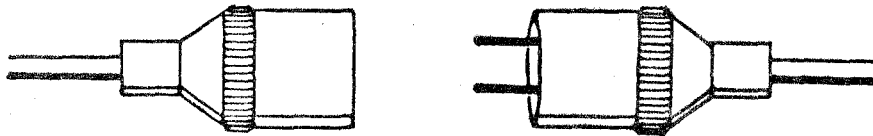


Fig. 18. Micro-plug Radial

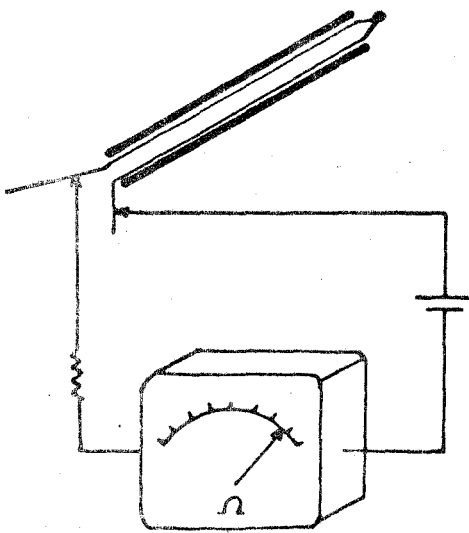


Fig. 19. Controle da Continuidade dos Elementos Termoelétricos

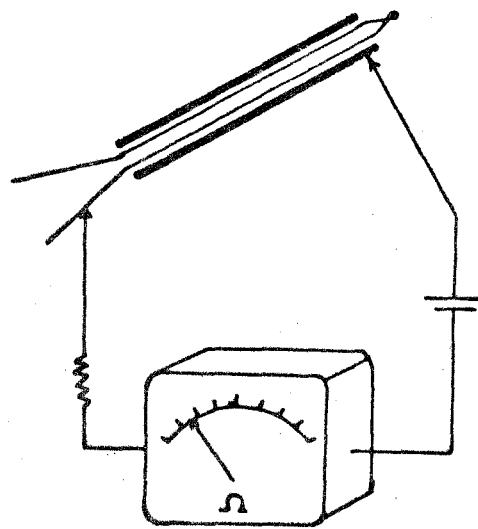
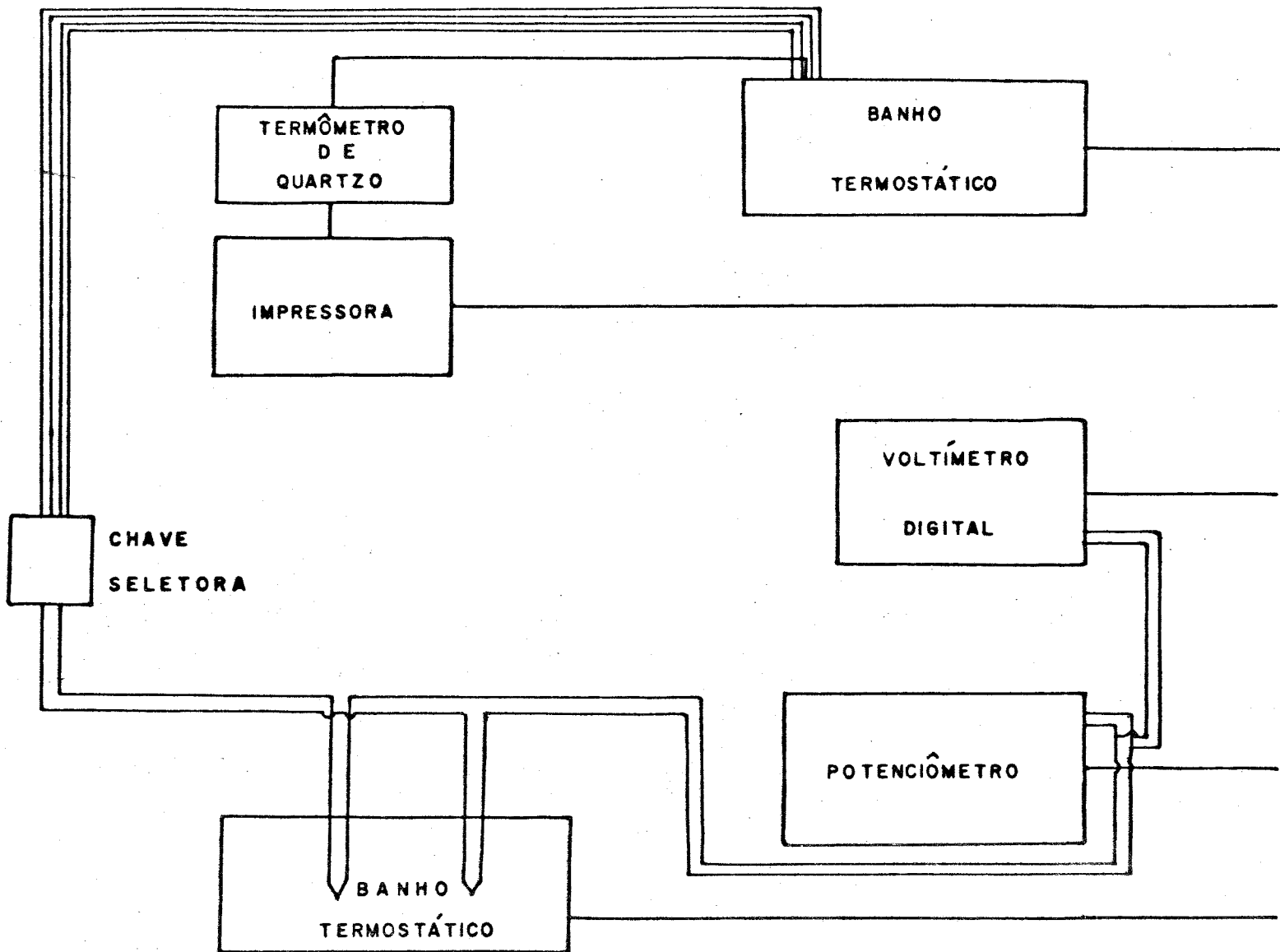


Fig. 20. Controle da Resistência de Isolamento



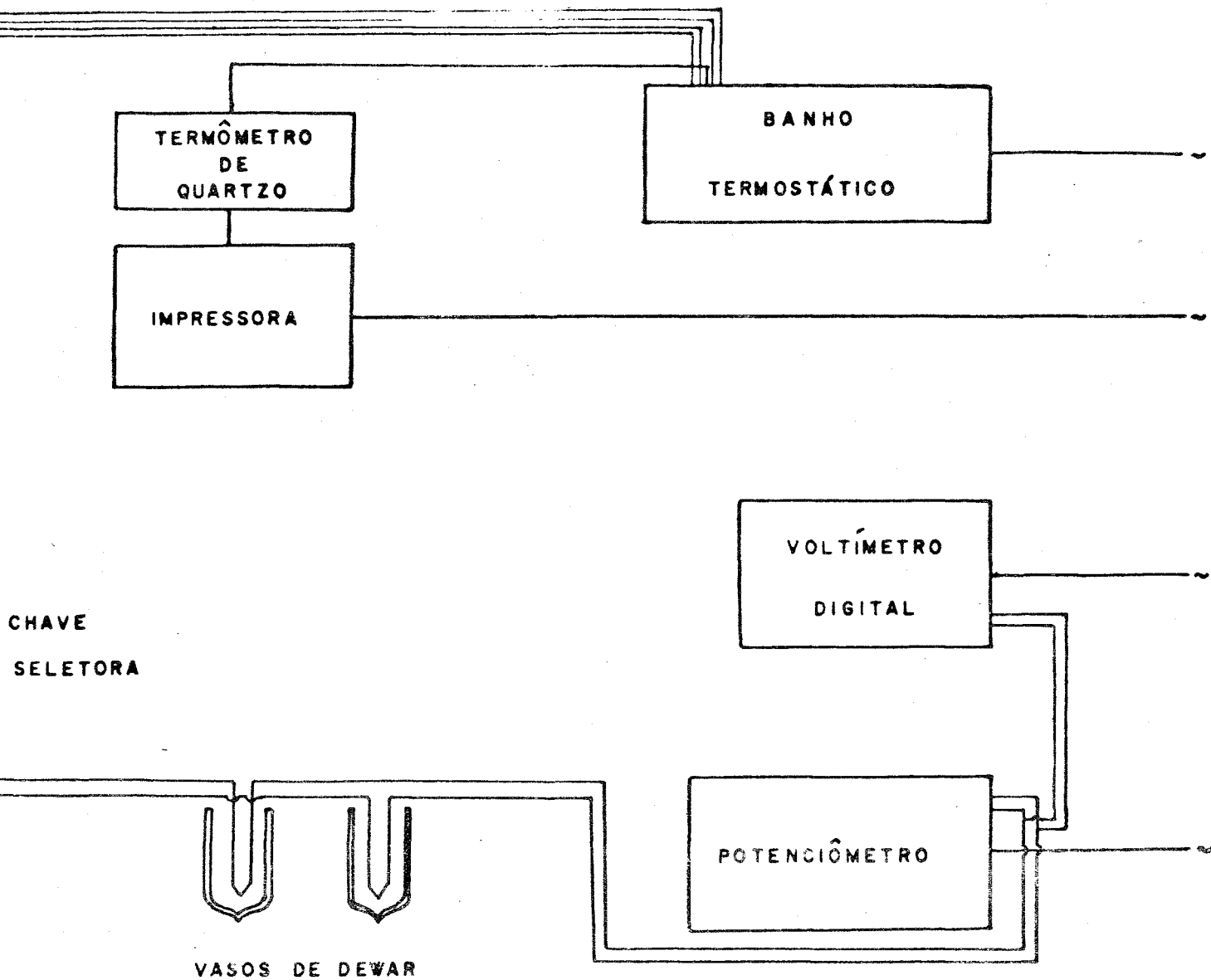
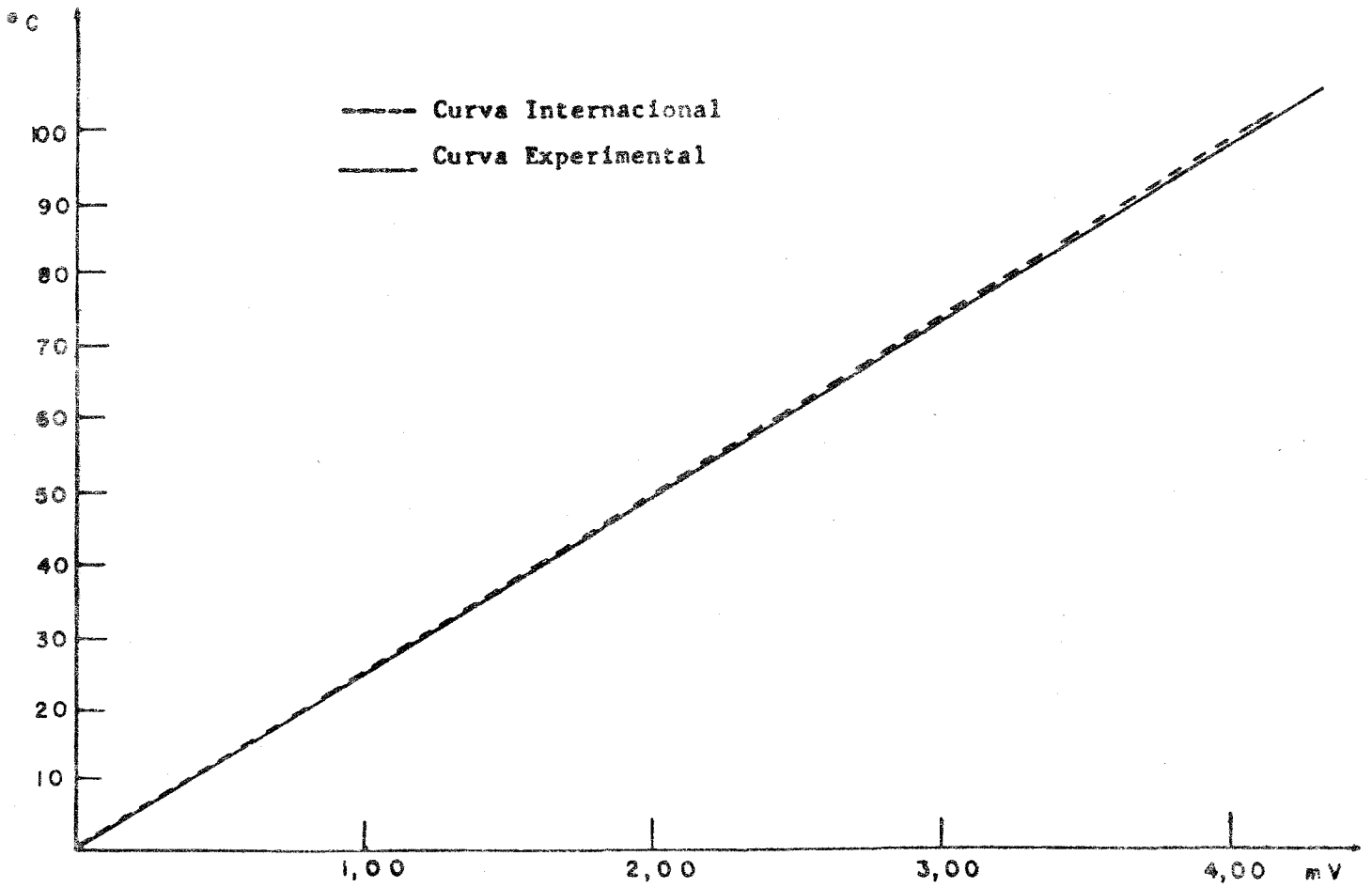


Fig. 22. Esquema do Circuito de Medida para Aplicação do Delinesamento em Blocos Casualizados e Calibração.

T °C	mV	T °C	mV	T °C	mV	T °C	mV	T °C	mV
2,02	0,0840	22,02	0,9050	41,99	1,7243	62,01	2,5454	82,03	3,3664
4,08	0,1652	23,95	0,9843	44,00	1,8075	64,03	2,6278	84,01	3,4480
6,01	0,2501	25,98	1,0669	46,07	1,8910	66,00	2,7092	86,00	3,5313
8,00	0,3309	28,00	1,1501	48,00	1,9723	67,93	2,7892	88,02	3,6136
10,00	0,4130	30,04	1,2343	49,93	2,0520	69,98	2,8728	90,00	3,6964
12,03	0,4937	32,00	1,3148	52,10	2,1403	72,02	2,9552	91,98	3,7768
13,90	0,5709	33,87	1,3940	54,01	2,2162	74,00	3,0379	94,00	3,8588
16,01	0,6594	35,71	1,4683	56,05	2,3005	76,00	3,1209	95,96	3,9388
18,02	0,7386	38,01	1,5603	57,92	2,3790	77,93	3,2002	98,01	4,0220
20,00	0,8224	40,05	1,6440	59,99	2,4639	80,04	3,2861	100,00	4,1043

Tab. 7. Calibração para os Termopares sem recozimento com referência a 0 °C.

Fig. 23. P.e.m. em função da temperatura



t_{68}	f.e.m.	f.e.m./ t_{68}
22,00	0,9040	0,041090
30,08	1,2342	0,041030
35,06	1,4396	0,041063
46,00	1,8897	0,041080
49,91	2,0500	0,041073
53,00	2,1768	0,041071
61,04	2,5061	0,041056
78,00	3,2016	0,041046

Tab. 8. Calibração e f.e.m./ t_{68} para os Termopares após recozimento de 300 horas em 500 °C, com referência a 0 °C.

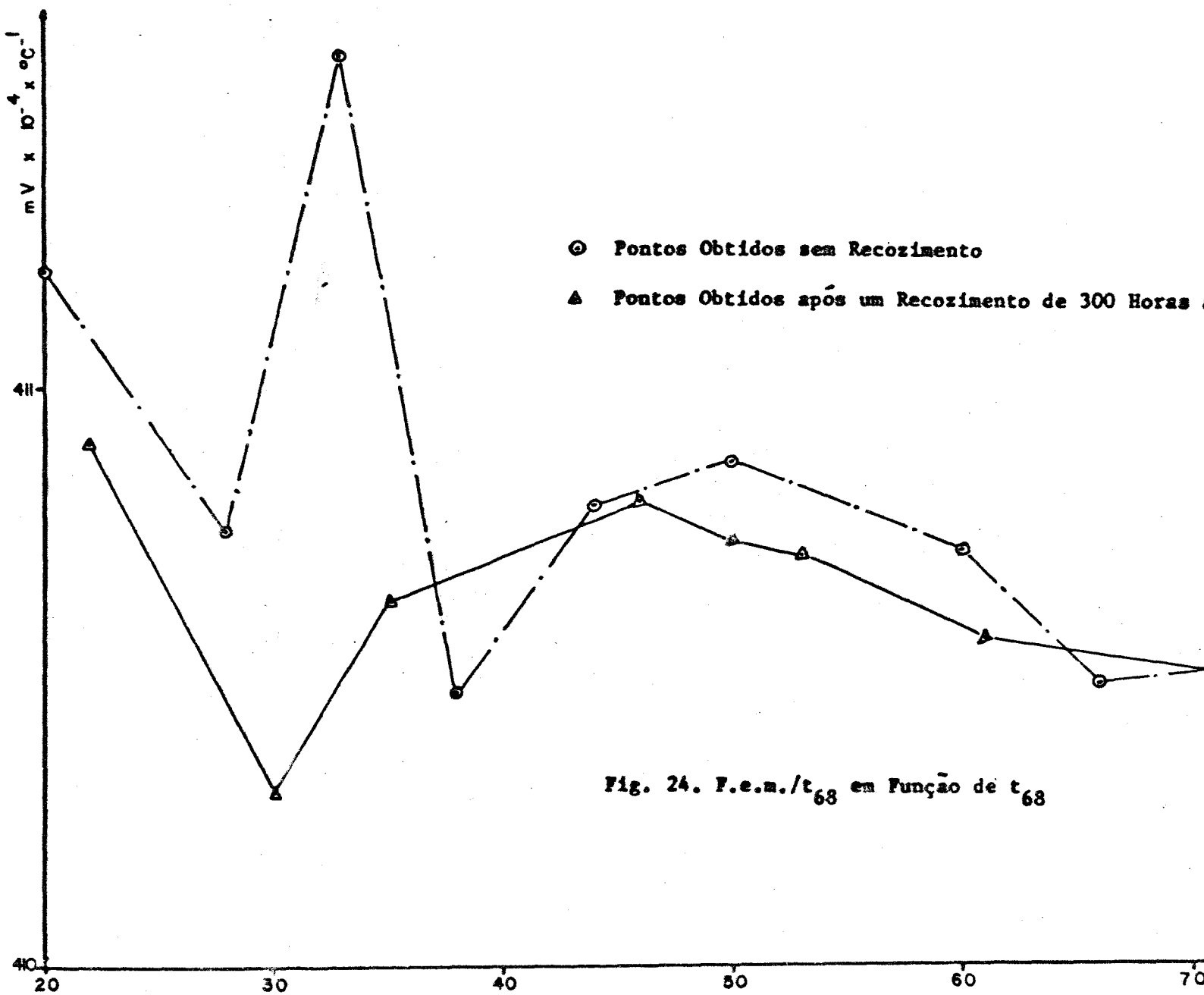


Fig. 24. F.e.m./ t_{68} em Função de t_{68}

E R R A T A

<u>Página</u>	<u>Linha</u>	<u>Onde se lê</u>	<u>Leia-se</u>
VIII	5	$^{\circ}K$	K
7	25	Se um circuito	Se num circuito
9	fórmula 11	$\pi_{ab} q dt_{68}$	$d\pi_{ab} q$
11	10	que em virtude	quer em virtude
16	26	Sejam os raios γ	Tanto os raios γ
18	11	foram na ordem	foram feitas na ordem
22	6	Escolha da Solda	Escolha da Soldagem
24	2	total das linhas	total das linhas; $i=1, \dots, n; n=4$
24	3	total das colunas	total das colunas; $j=1, \dots, n; n=4$
24	4	total dos tratamentos	total dos tratamentos; $k=1, \dots, n; n=4$
32	20	linhas	linhas; $i=1, \dots, k; k=4$
32	22	$N(0, \sigma^2)$	$N(0, \sigma^2); j=1, \dots, n; n=10$
33	3,5,19	$\frac{T^2}{n}$	$\frac{T_0^2}{nk}$
36	14	total dos tratamentos	total dos tratamentos; $i=1, \dots, k; k=4$
36	15	total dos blocos	total dos blocos; $j=1, \dots, m; m=4$
37	última	obtendo	obtendo-se
40	12	$T_{\text{tab.}}(3,9)$	$F_{\text{tab.}}(3,9)$
40	19	foi intercalado	foram intercalados