

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESTES PARA ANÁLISE DAS FONTES DE ERROS NA MEDIÇÃO DE
DEFORMAÇÃO COM EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

ROBERTO JOÃO BASSO

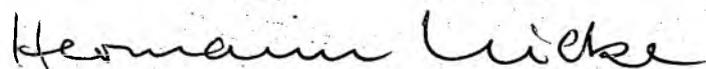
FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 1982.

TESTES PARA ANÁLISE DAS FONTES DE ERROS NA MEDIÇÃO DE
DEFORMAÇÃO COM EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

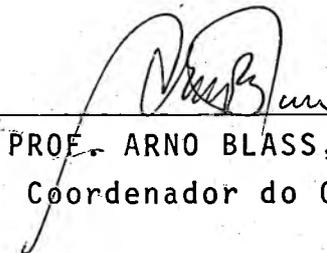
ROBERTO JOÃO BASSO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA - ÁREA DE CONCENTRAÇÃO - PROJETO
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

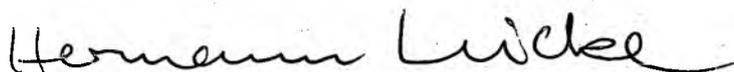


PROF. HERMANN ADOLF HARRY LÜCKE, Dr. Ing.
Orientador



PROF. ARNO BLASS, Ph.D.
Coordenador do Curso

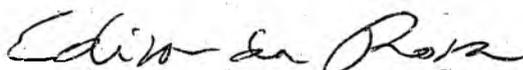
APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES:



PROF. HERMANN ADOLF HARRY LÜCKE, Dr. Ing.



PROF. NELSON BACK, Ph.D.



PROF. EDISON DA ROSA, M.Sc.

Em homenagem póstuma
Ao professor Jaroslav Kozel
Ao colega Cícero Antonio Brenner Dornelles

Aos meus pais
À minha esposa

AGRADECIMENTOS

Ao professor Hermann Adolf Harry Lücke, pela orientação e dedicação na realização deste trabalho;

Ao professor Carlos Alberto Schneider, chefe do LABMETRO, pela disponibilidade dos equipamentos;

Aos funcionários, estagiários e bolsistas do LABMETRO, que de alguma forma prestaram sua colaboração à realização dos ensaios;

Aos parentes e amigos que auxiliaram, por diversas vezes, a evitar esmorecimentos, tão comuns em trabalhos desta natureza;

Ao colega Cláudio de São Plácido Brandão pelas fotografias;

Ao Sr. Paulo Moraes da Rosa pelo trabalho datilográfico;

A Comissão Nacional de Engenharia Nuclear, CNEN, pelo auxílio financeiro.

ÍNDICE

Simbologia	ix
Resumo	xi
Abstract	xii

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos do trabalho	2

CAPÍTULO II

EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1. Relação entre tensão e deformação	4
2.2. Princípio de funcionamento do ERE	6
2.3. Variação da resistência do ERE com a tensão mecânica ..	7
2.4. Variação da resistência do ERE com a temperatura	8

CAPÍTULO III

MEDIÇÕES DE PEQUENAS VARIAÇÕES DE RESISTÊNCIA

3.1. Grandeza a medir	10
3.2. Ponte de Wheatstone	12
3.2.1. Comparação dos métodos de compensação e de leitura direta	13
3.2.2. Fonte de alimentação	14
3.2.3. Principais equações de ponte	16
3.3. Ohmímetro da HP	22

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DOS EREs UTILIZANDO PONTE DE WHEATSTONE

4.1. Análise experimental de tensões (AET)	24
--	----

4.2. Transdutores	24
4.3. Tipos de ligações de EREs usadas em ponte de Wheatstone.	25
4.4. Compensação de temperatura	27

CAPÍTULO V

REALIZAÇÕES TÉCNICAS PARA EQUIPAMENTOS DE AET

5.1. Introdução	29
5.2. Equilíbrio da ponte	29
5.3. Fontes	30
5.3.1. Excitação CC	31
5.3.2. Excitação CA	31
5.4. Chaveamento	32
5.4.1. Influências das chaves seletoras	33
5.4.2. Grandezas que definem a chave seletora	36
5.4.3. Chaves utilizadas	36
5.5. Cabos	37
5.6. Grandezas perturbadoras	38
5.6.1. Mudanças de resistência	38
5.6.2. Ruído eletrônico	39
5.6.3. Tensões termoelétricas	40
5.6.4. Tensões galvânicas	42
5.6.5. Vibrações ambientais	42
5.7. Características do sistema de medição	43

CAPÍTULO VI

PROPOSTA PARA TESTES

6.1. Proposta para testes	47
6.2. Condições de ensaio	50

CAPÍTULO VII

BANCO DE TESTES

7.1. Sistema de medição empregado	53
7.2. Construção do banco de testes	55
7.3. Construção da chave seletora	57

7.4. Projeto de um dispositivo de carregamento da viga	59
7.4.1. Tipos de dispositivos testados	59
7.5. Instrumentos utilizados	63
7.5.1. Calibração das pontes amplificadoras	67
7.5.2. Balanceamento das pontes amplificadoras	68

CAPÍTULO VIII

PROGRAMAÇÃO UTILIZADA E ENSAIOS REALIZADOS

8.1. Introdução	69
8.2. Programas de medição e processamento prévio	69
8.3. Possibilidades de avaliação	71
8.4. Ensaio realizados	76

CAPÍTULO IX

RESULTADOS E ANÁLISES

9.1. Resultados em função da chave seletora	80
9.1.1. Resultados dependentes do chaveamento na medição.	80
9.1.2. Resultados dependentes do intervalo de medição ..	83
9.1.3. Resultados dependentes do nº de leituras do vol- tímetro	90
9.2. Resultados em função do sistema de medição	92
9.2.1. Resultados dependentes do tempo de observação ...	92
9.2.2. Resultados dependentes do tempo de pré-aquecimen- to do ERE	98
9.2.3. Resultados dependentes da temperatura na viga ...	101

CAPÍTULO X

CONCLUSÕES	103
------------------	-----

Referências Bibliográficas	111
----------------------------------	-----

SIMBOLOGIA

<u>SÍMBOLO</u>		<u>UNIDADE</u>
A	área	m ²
b	dimensão, largura	m
C	capacitância elétrica	F
d	dimensão, diâmetro	m
E	módulo de elasticidade longitudinal	MPa
f	frequência	Hz
G	módulo de elasticidade transversal	MPa
g	fator de ganho	
i	corrente elétrica	A
K	gage factor	
K _r	fator de escala do voltímetro digital	
L	indutância elétrica	H
R	resistância elétrica	Ω
t	tempo de observação	s
T	temperatura	°C
u	tensão elétrica	V
u _D	tensão elétrica de desequilíbrio	V
x, y, z	direção dos eixos coordenados no sistema cartesiano	
α	coeficiente de dilatação térmica	/°C
β	coeficiente de variação de resistividade	/°C
γ	deformação cizalhante ou distorção	
Δd, Δl, ΔR, Δu, Δρ	variação do diâmetro, variação do comprimento, variação da resistância elétrica, variação da tensão elétrica, variação	

SÍMBOLOUNIDADE

	da resistividade do material	
ϵ	deformação específica	
l	dimensão, comprimento	m
μ	micro (10^{-6})	
ν	coeficiente de Poisson	
ρ	resistividade elétrica ou térmica	
σ	tensão mecânica normal	MPa
Φ	fluxo magnético	W
τ	tensão mecânica de cisalhamento	MPa
AET	análise experimental de tensões	
CA	corrente alternada	
CC	corrente contínua	
DVM	voltímetro digital	
ERE	extensômetro de resistência elétrica	
E_c	ERE de compensação de temperatura	
INCL	coeficiente angular da reta	
PV	coeficiente linear da reta	
PW	ponte de Wheatstone	
SAS	sistema de aquisição de sinais	
SC	chave seletora (scanning)	
SM	sistema de medição	
VFE	valor final de escala	
X_e	sinal de entrada	
X_s	sinal de saída	

RESUMO

Na medição de deformações específicas com extensômetros de resistência elétrica (ERE), em especial, quando feitas a longas distâncias e/ou integradas a sistemas automatizados de aquisição de dados (SAS), poderão ser induzidos erros significativos nos resultados.

Neste trabalho são analisadas as principais fontes de erros nos elementos da cadeia de medição, para medições múltiplas de deformação com EREs, utilizando como principais parâmetros de ensaio; tempo de observação e temperatura. Assim, foi desenvolvido um banco de testes para determinação dessas fontes de erros, bem como foram realizados diversos ensaios de avaliação do mesmo, com o auxílio de um SAS.

ABSTRACT

In the measurement of strain with strain gauges (ERE), mainly when made at long distances and/or integrated into an automatic data acquisition system (SAS), significant error on the results can be induced.

This work analyses the main error sources in the chain of elements of the measuring system, for the measurement of multiple strain with EREs, considering the basic parameters of the experiment; observation time and temperature. It was developed a test set for the determination of the error sources, and were conducted many experiments to the evaluation with the SAS.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos primeiros tempos, máquinas e estrutura eram construídas, fazendo intenso uso de regras práticas. Com o advento da produção em massa e da alta demanda de maquinarias, novos métodos, processos e controles foram desenvolvidos, considerando-se fatores de segurança, teste de protótipos, etc. Com isso, os antigos métodos de projetos, tornaram-se técnica e economicamente inviáveis.

O desenvolvimento da indústria aeroespacial, por exemplo, aonde tem-se que conciliar a máxima resistência com o mínimo peso, mostrou a necessidade do desenvolvimento de técnicas de análise teórica e experimental nas máquinas e estruturas, para vários campos da engenharia, especialmente na engenharia mecânica e civil onde o conhecimento do campo de tensões/deformações tem elevada importância.

Atualmente, apesar do elevado grau de adiantamento das técnicas de análises teóricas (elementos finitos, diferenças finitas, etc.), há situações em que o método experimental é particularmente importante, principalmente quando as soluções teóricas são pouco confiáveis ou, quando são usados modelos matemáticos, que normalmente utilizam hipóteses simplificadoras, tanto a respeito das propriedades mecânicas dos materiais como com relação às características da estrutura e ao seu comportamento; como é o caso de uma estrutura complexa ou quando atuam cargas desconhecidas.

Diversos métodos são utilizados para a análise experimental de tensões (AET); um dos mais importantes é o que utiliza o "strain gauges" ou "extensômetro de resistência elétrica" (ERE) como sensor de deformação.

O ERE tem massa extremamente pequena sendo colado na superfície do material em teste e que numa medida, indica a varia-

ção de sua resistência elétrica que é proporcional a deformação média do material sob o sensor. Também são utilizadas as medições de deformação com EREs para determinar outras grandezas, tais como: força, deflexão, torque, aceleração, etc., através de transdutores construídos com auxílio de EREs.

Na AET com EREs pode-se utilizar a própria estrutura ou o modelo físico para reproduzir a estrutura, já que o processo de medição das tensões/deformações não é destrutivo.

Devido a importância dessa técnica de medição de deformação e baseados nas dificuldades encontradas numa medição de deformação de múltiplos pontos, típica de AET com EREs, realizada pelo LABMETRO durante uma pressurização do vaso de contenção do reator da usina nuclear Angra I, onde foram medidas as tensões/deformações em 44 pontos, aliada a falta de bibliografia específica nesse assunto, levaram a realização deste trabalho.

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

Os objetivos do presente trabalho são:

1º) Analisar as principais fontes de erros nos elementos da cadeia de medição, para medições múltiplas de deformação com EREs, utilizando como principais parâmetros de ensaio; o tempo de observação e temperatura.

Este item inclui a avaliação do desempenho dos instrumentos de medição de deformação com EREs, tais como: pontes amplificadoras com fonte de alimentação de tensão constante, excitação tipo corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), com ou sem realimentação, além de um ohmímetro fabricado pela Hewlett Packard (HP) de elevada precisão, descrito no item 3.3.

Para obter o primeiro objetivo foi necessário:

2º) Projeto, construção e montagem de um banco de testes automatizado, para determinação das fontes de erros em medições múltiplas

com EREs, utilizando a ligação de 1/4 de ponte, com compensação de temperatura.

Para completar o banco de testes fez-se:

- a) Desenvolvimento, construção e montagem de uma chave seletora;
- b) Projeto, construção e montagem de um dispositivo para carregamento da estrutura a ser ensaiada.

39) Ensaaios de avaliação do banco de testes.

CAPÍTULO II

EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1. RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

Para definir o estado de tensões, em um ponto qualquer, de um corpo submetido a esforços, é necessário determinar as componentes das tensões correspondentes a todos os planos que passam pelo ponto considerado.

No caso de um estado plano de tensões, para a caracterização do estado de deformação num ponto é necessário medir deformações em três direções; se as direções principais são conhecidas basta medir as deformações nessas duas direções.

Analisando um corpo submetido a um estado uniaxial de tensões como mostra a figura 1, e supondo que o material obedeça a Lei de Hooke, é válida a equação:

$$\sigma = \epsilon \cdot E \quad (1)$$

onde, σ é a tensão a que está submetido o corpo, E é o módulo de elasticidade longitudinal do material e ϵ é a deformação que está sujeito o corpo, na direção de σ .

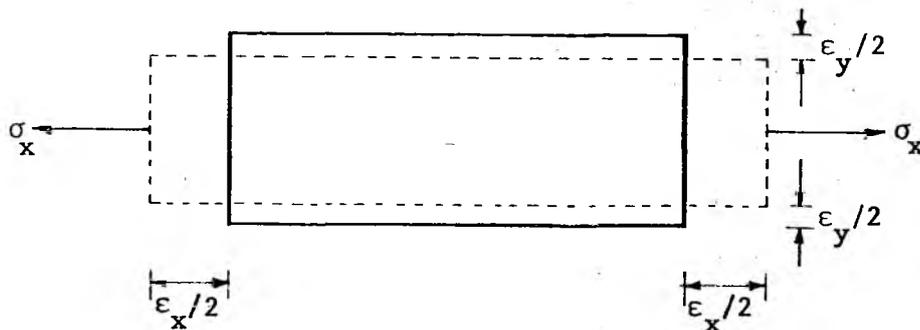


Figura 1 - Corpo submetido a um estado uniaxial de tensões.

Sendo válidas as equações da teoria de elasticidade, conhecendo-se o módulo de elasticidade longitudinal E , o módulo de elasticidade transversal G e o coeficiente de Poisson ν do material; a deformação específica na direção x é obtida diretamente e na direção y é obtida considerando-se o efeito de Poisson. Estas deformações são respectivamente:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad \text{e} \quad \epsilon_y = -\nu \cdot \epsilon_x = -\nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} \quad (2)$$

De forma similar, se uma tensão axial for aplicada na direção y , as deformações específicas resultantes serão:

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad \text{e} \quad \epsilon_x = -\nu \cdot \epsilon_y = -\nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (3)$$

As deformações específicas resultantes em um estado biaxial de tensões podem ser determinadas pela superposição das equações (2) e (3):

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y) \\ \epsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

onde: γ é a deformação cizalhante ou distorção;
 τ é a tensão de cisalhamento;

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{é o módulo de elasticidade transver-}$$

sal.

As tensões normais e de cisalhamento obtidas de (4) são:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_y + \nu \cdot \epsilon_x) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy}$$

As equações (5), para o estado biaxial de tensões, relacionam as tensões principais às deformações específicas principais.

A análise experimental de tensões com EREs, permite somente determinar tensões superficiais (estado plano de tensões).

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ERE

O princípio de operação do ERE, segundo [1], [2], [3], baseia-se em um fenômeno descoberto por William Thomson no século passado. Ele observou que a resistência elétrica de alguns fios metálicos variava proporcionalmente a suas deformações relativas longitudinais. Assim, se um destes fios é firmemente fixo a um corpo que irá se deformar, então a variação da resistência elétrica do fio medirá o estado de deformação do corpo na direção do fio (deformação específica $\epsilon = \Delta l/l$).

2.3. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ERE COM A TENSÃO MECÂNICA

A resistência R de um condutor uniforme cilíndrico, com comprimento ℓ , área de seção transversal A e resistividade ρ é dada por

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (6)$$

onde $A = \pi d^2/4$ e " d " é o diâmetro do condutor.

Diferenciando e dividindo cada termo por R , tem-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} - 2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (7)$$

Assim, pode-se definir a sensibilidade K , como sendo

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta \ell/\ell} = \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta \ell/\ell} - 2 \frac{\Delta d/d}{\Delta \ell/\ell} + 1 \quad (8)$$

Se o metal é isotrópico, homogêneo, sendo o coeficiente de Poisson dado pela eq. (2) e reescrevendo, tem-se finalmente

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho/\rho}{\epsilon} \quad (9)$$

Então, conhecendo-se a sensibilidade K , normalmente chamada de "Gage Factor" ou o fator K e medindo-se $\Delta R/R$, determina-se a deformação específica $\Delta \ell/\ell = \epsilon$.

Para EREs do tipo universal, são utilizados Ligas de Constantan para sua construção e costumam ter o fator K aproximadamente 2. Este valor é determinado experimentalmente e fornecido pelo fabricante.

Resumindo, nota-se que a variação de resistência é devida basicamente a 2 razões:

- a) Deformação específica (longitudinal e transversal);
- b) Variação da resistividade do condutor.

A influência da variação da resistividade é acentuada nos materiais semi-condutores e para os metais, este efeito é menos importante.

2.4. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ERE COM A TEMPERATURA

Quando ocorre variação de temperatura durante uma medição, [4], [5], o ERE muda sua resistência não só devido a deformação, mas também devido a temperatura. Logo, a deformação indicada pelo aparelho é uma "deformação aparente" que se sobrepõe a deformação real.

Nesse caso três efeitos devem ser considerados:

a) O comprimento do extensômetro é aumentado da quantidade

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha_E \cdot \Delta T \quad (10)$$

b) A base sobre a qual está montada o extensômetro também se alonga da quantidade

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha_B \cdot \Delta T \quad (11)$$

c) A resistividade do material do fio varia segundo

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \beta \cdot \Delta T \quad (12)$$

onde:

α_E - coeficiente de dilatação térmica do extensômetro;

α_B - coeficiente de dilatação térmica do material sobre o qual o extensômetro está colocado;

β - coeficiente de variação da resistividade do material do extensômetro com a temperatura;

ΔT - variação de temperatura.

Como consequência, tem-se uma variação da resistência do ERE dado por:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T} = K \cdot (\alpha_B - \alpha_E) \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta T = K \cdot \epsilon_{\text{aparente}} \quad (13)$$

$$\epsilon_{\text{aparente}} = (\alpha_B - \alpha_E) \cdot \Delta T + \beta \cdot \frac{\Delta T}{K} \quad (14)$$

Para eliminar este efeito indesejável, utilizam-se duas formas de compensar. A primeira, é uma compensação no próprio extensômetro de tal modo que o efeito líquido dos três efeitos citados anteriormente se anulem; estes extensômetros são os "auto-compensados".

Analisando a eq. (14) para obter um extensômetro auto-compensado, a sua construção deverá atender a seguinte relação:

$$\beta = K \cdot (\alpha_E - \alpha_B) \quad (15)$$

Pode-se obter uma aproximação da eq. (15) pela fabricação de um extensômetro com duas ligas diferentes. Estas ligas são escolhidas de tal forma que as suas respostas à variação de temperatura sejam iguais mas opostas anulando o efeito sobre o conjunto do extensômetro. Na figura 2 pode-se observar que o extensômetro é auto-compensado em torno da temperatura ambiente (24°C), porque é nesta temperatura que a eq. (15) é satisfeita, ou seja a deformação aparente é nula.

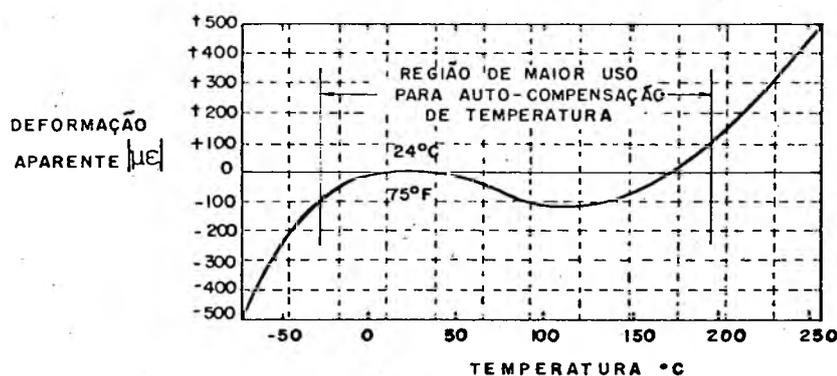


Figura 2 - Deformação aparente em função da temperatura, para um extensômetro auto-compensado de liga Constantan, colado em aço [4].

A segunda forma de compensação é através de um extensômetro passivo (dummy gage), que será visto no item 4.4.

CAPÍTULO III

MEDIÇÕES DE PEQUENAS VARIAÇÕES DE RESISTÊNCIA

3.1. GRANDEZA A MEDIR

Segundo a eq. (8), $\epsilon = 1/K \cdot \Delta R/R$, para determinar ϵ tem-se que medir ΔR . Em geral os valores de K e R são fornecidos pelo fabricante. Para mostrar a problemática da medição de pequenas variações de resistência será discutido um exemplo:

Admitindo-se um campo de deformações $0,5 \text{ a } 500 \text{ } \epsilon\mu$, $R = 100 \text{ } \Omega$ e $K = 2$ (figura 3a); tem-se que a variação da relação $\Delta R/R$, grandeza a medir, será $\sim 10^{-6} \dots 10^{-3}$, onde $\Delta R \ll R$.

Pode-se obter ΔR , aplicando-se uma tensão constante ou uma corrente constante sobre a resistência R e medindo-se a corrente ou a tensão que flue através dessa resistência, é possível calcular R através da Lei de Ohm ($u = R \cdot i$).

Quando houver variação de R , faz-se novamente o mesmo procedimento anterior e obtêm-se R_2 . A diferença ($R_2 - R_1$) é igual a ΔR .

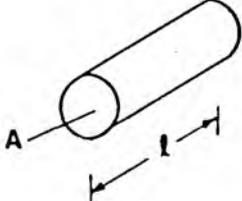
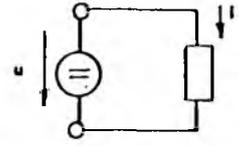
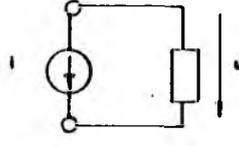
As fontes de excitação podem ser classificadas como tensão constante ou corrente constante:

- A fonte de tensão constante tem uma baixa impedância de saída, assim a tensão de saída fica aproximadamente constante para uma determinada faixa, independente da carga.

- A fonte de corrente constante tem uma alta impedância de saída que permite a variação da tensão de saída com a variação da carga no circuito, mantendo a corrente constante para uma determinada faixa de corrente.

Na figura 3b,c são apresentadas as exigências para medição de pequenas variações de resistência [6], [7]; considerando a fonte de tensão u constante ($u = 1 \text{ V}$) e a resistência R igual a $100 \text{ } \Omega$, tem-se que a corrente i será igual a 10 mA , segundo a Lei Ohm. O campo de variação relativa de corrente, $10^{-6} \dots 10^{-3}$, obtido em função do campo de variação relativa de resistência, fornece que a variação de corrente Δi , será igual a 10^{-5} mA . Assim o

amperímetro terá que ter capacidade para medir a corrente i , mais o acréscimo Δi , que será igual 10,00001 mA. Se o mesmo raciocínio for usado para fonte de corrente constante, depara-se que o voltímetro deverá ter capacidade de medir a tensão u , mais a variação Δu , que será igual a 1,000001 V. No 1º caso a grandeza a medir é 10^{-5} parte da faixa de medição enquanto que a 2ª é 10^{-6} . Trabalhando com um voltímetro digital é preciso uma resolução e um erro máximo de 7 casas decimais para satisfazer ambos os casos.

 $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$	 $u = \text{const.}$ $i = \frac{u}{R}$	 $i = \text{const.}$ $u = R \cdot i$
$\Delta R \ll R$ $\frac{\Delta R}{R} \sim 10^{-6} \dots 10^{-3}$	$\frac{\Delta i}{i} \sim 10^{-6} \dots 10^{-3}$	$\frac{\Delta u}{u} \sim 10^{-6} \dots 10^{-3}$
<p>Exemplo:</p> $R = 100 \Omega$ $\Delta R = 10^{-4} \Omega$ $\frac{\Delta R}{R} = 10^{-6}$	$u = 1V$ $i = 10 \text{ mA}$ $\Delta i = 10^{-5} \text{ mA}$ $i + \Delta i = 10,00001 \text{ mA}$	$i = 10 \text{ mA}$ $u = 1V$ $\Delta u = 10^{-6} \text{ V}$ $u + \Delta u = 1,000001 \text{ V}$
	<p><u>Exigências:</u> Fonte constante em $\Delta u < \Delta i \cdot R$ $< 10^{-6} \text{ V}$ erro relativo max. amperm. $< 5 \cdot 10^{-6} \text{ mA}$</p>	<p><u>Exigências:</u> Fonte constante em $\Delta i < \Delta u / R$ $< 10 \cdot 10^{-6} \text{ mA}$ erro relativo max. voltím. $< 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ V}$</p>

a)

b)

c)

Figura 3 - Problemática na medição de pequenas variações de resistência [6].

Por outro lado, para que a fonte seja de tensão constante, deverá satisfazer:

$$\Delta u < \Delta i \cdot R$$

$$\Delta u < 10^{-6} \text{ V}$$

(16)

(considera-se variação de tensão Δu , porque a fonte de tensão não é uma fonte ideal). O erro relativo máximo do amperímetro deve ser $< 5 \cdot 10^{-6}$ mA.

Fazendo o mesmo para fonte de corrente constante tem-se:

$$\Delta i < \Delta u / R$$

$$\Delta i < 10 \cdot 10^{-6} \text{ mA} \quad (17)$$

sendo que o erro relativo máximo do voltímetro deve ser $< 0,5 \cdot 10^{-6}$ V.

Resumindo, então é necessário obter uma fonte de tensão constante com $\Delta u < 10^{-6}$ V e um amperímetro com erro relativo máximo $< 5 \cdot 10^{-6}$ mA ou obter uma fonte de corrente constante com $\Delta i < 10 \cdot 10^{-6}$ mA e um voltímetro com erro relativo máximo $< 0,5 \cdot 10^{-6}$ V. Portanto, conclui-se que ambas as exigências são difíceis de serem satisfeitas.

3.2. PONTE DE WHEATSTONE

O arranjo de circuito conhecido como ponte de Wheatstone (PW) é o método mais usado para medidas de pequenas variações de resistências. Esta ponte é constituída de 4 resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , mais uma fonte de alimentação e um indicador. O circuito está mostrado na figura 4.

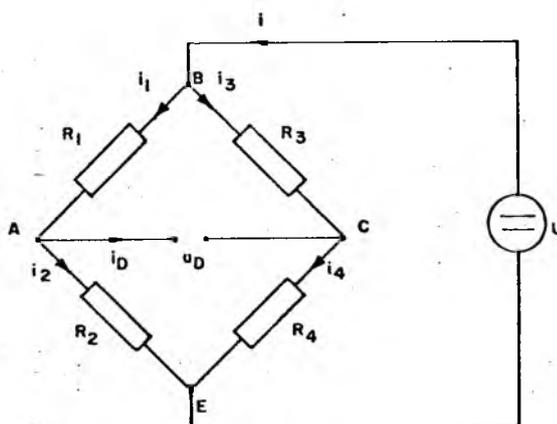


Figura 4 - Circuito da Ponte de Wheatstone.

O equilíbrio é indicado pela resposta nula no indicador, significando que os pontos A e C estão no mesmo potencial; isto requer que a tensão de B para A seja igual de B para C. Assim, pode-se escrever

$$i_1 R_1 = i_3 R_3 \quad (18)$$

Como $i_D = 0$ durante o equilíbrio, tem-se

$$i_1 = \frac{u}{R_1 + R_2} \quad i_3 = \frac{u}{R_3 + R_4} \quad (19)$$

substituindo as eq. (18) em (19), obtêm-se finalmente

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{ou} \quad R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (20)$$

Como são comparadas duas tensões em A e C, pode-se concluir, assumindo que existe uma variação de ΔR_1 , o seguinte:

- 1º) A tensão u_D só depende da variação ΔR_1 , para ponte de tensão constante.
- 2º) Mudanças de u , indicam variação relativa em ΔR_1 ; portanto este método de medição de variação de resistência é mais prático que o anterior.

Existem dois métodos para determinar o desequilíbrio das pontes: o método de compensação ou de balanceamento nulo e o método de leitura direta ou deflexão.

3.2.1. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO E DE LEITURA DIRETA

Para determinar somente deformações estáticas pode-se utilizar o método de compensação. Neste caso o par R_3 e R_4 da figura 4, é parte de um potenciômetro que permite ler a variação R_3 (e ou R_4) que recoloca a tensão u_D da ponte em zero. Esta variação é a mesma, que ocorreu em R_1 (e ou R_2); observa-se que não é necessário que a tensão u seja estabilizada.

No método de leitura direta é possível determinar

$\Delta R/R$ através da medida da tensão u_D de desequilíbrio. Pontes deste tipo, requerem uma tensão de alimentação u estabilizada, já que a medida da tensão u_D de desequilíbrio depende desta tensão u .

No método de leitura direta tem-se uma tensão entre os pontos A e C da ponte (figura 4) no mesmo momento que ocorre a variação ΔR . Em consequência desta resposta instantânea o método pode ser usado em medições estáticas e dinâmicas.

Segundo [1], [8] as vantagens do método de compensação comparado com o de indicação são: maior precisão e menor sofisticação, eliminação dos erros causados pela flutuação da tensão de alimentação da ponte; também problemas combinados vêm a minimizar a não linearidade da ponte. Embora, o método de indicação tenha menor precisão, sua grande vantagem é permitir a utilização de sistemas automatizados de aquisição de dados, que facilitam medições de múltiplos pontos.

3.2.2. FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Para o circuito tipo ponte são disponíveis fontes de alimentação com tensão constante ou fonte de corrente constante, sendo que ambas as fontes podem ser CC ou CA.

A aplicação da fonte de corrente constante na extensometria é relativamente nova e tem sido possível devido ao avanço da eletrônica.

Na figura 4, foi mostrado uma ponte puramente resistiva, aonde as grandezas a medir são diferenças entre os resistores da ponte. Para este tipo de ponte pode-se usar uma fonte de alimentação tipo CC ou tipo CA.

Com a tarefa de medir capacitâncias e indutâncias usam-se pontes com fontes de CA. A figura 5 mostra alguns exemplos, entre os quais, tem-se as pontes de Maxwell, Hay, Wien, ressonância, Owen, etc.

A ponte de Maxwell, que é própria para medição de indutâncias (figura 5), é composta de dois braços resistivos (R_2 e R_3), um com resistência e capacitância (R_1 e C_1) e outro com um indutor desconhecido (L_x). Obtém-se a indutância alimentando-se o

circuito e medindo-se L_x que é igual a $R_2 \cdot R_3 \cdot C_1$; também pode-se obter a resistência do indutor $R_x = R_2 \cdot R_3 / R_1$. Para os demais circuitos de ponte o procedimento é similar a este.

Além das medições de capacitância e indutância, são usadas também pontes com fontes CA para medições de resistências; as principais razões segundo [9] são:

- 1ª) Versatilidade. Por exemplo: medição de deflexão com transdutores que utilizam efeitos indutivos;
- 2ª) Menores erros.

Ainda tem-se que levar em consideração, que uma ponte puramente resistiva não existe, devido as capacitâncias e indutâncias introduzidas no circuito pelos cabos e extensômetros.

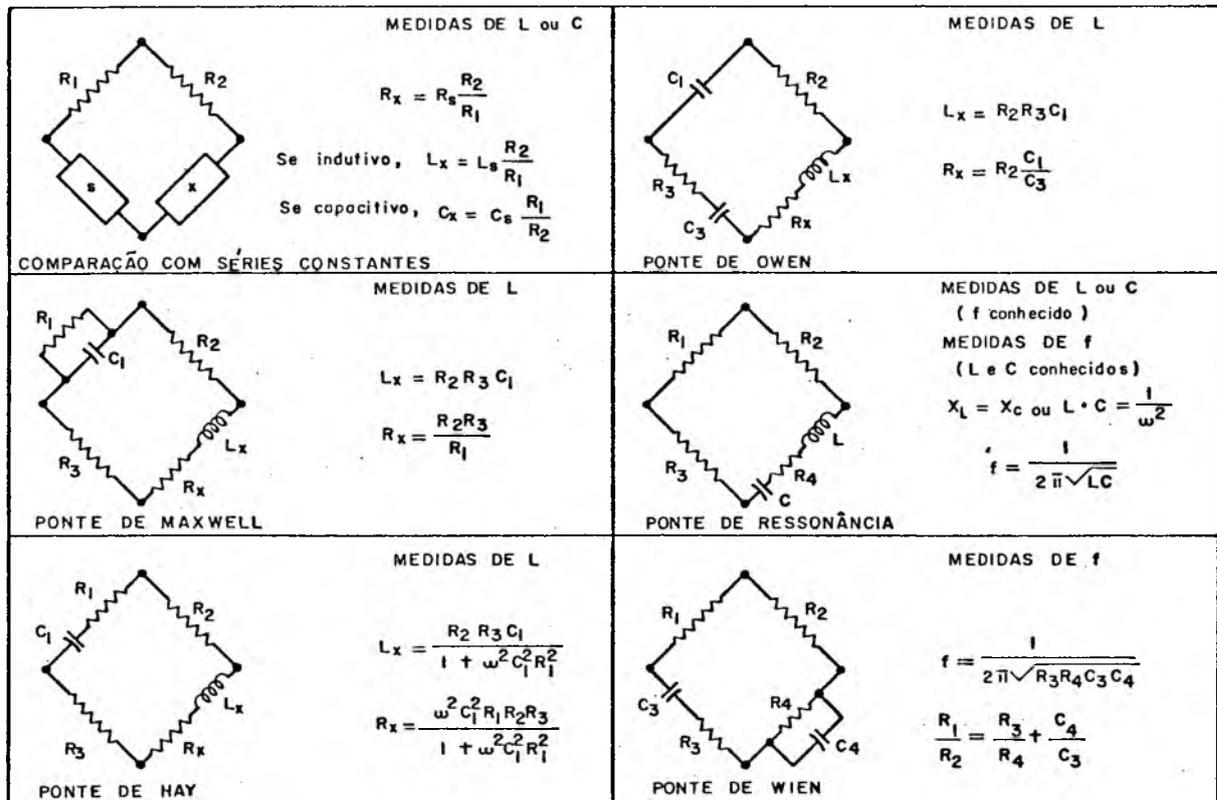


Figura 5.- Exemplos de pontes com fontes de alimentação CA [9].

3.2.3. PRINCIPAIS EQUAÇÕES DE PONTE

A figura 6 mostra o circuito básico da ponte de Wheatstone. Conforme figura 4, além das resistências $R_1 \dots R_4$ dos transdutores, resistências de equilíbrio ou resistências de compensação, foram acrescentados os resistores R_5 e R_6 ; R_5 é um resistor equivalente, por exemplo, resistência dos cabos, chaves ou resistência interna da fonte de alimentação e R_6 é a resistência do instrumento de indicação ou registro.

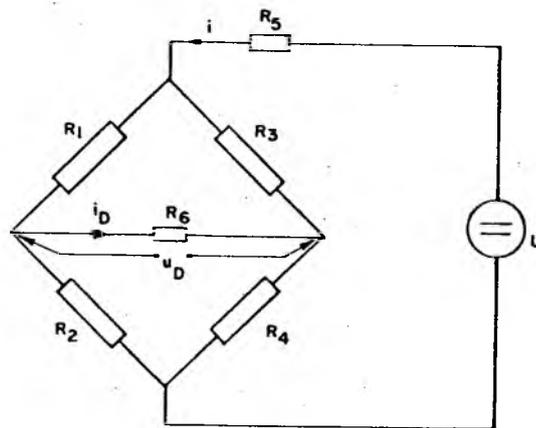


Figura 6 - Circuito básico da ponte de Wheatstone.

Fazendo-se redução de rede elétrica no circuito da figura 6, obtêm-se os circuitos de ponte de maior importância, segundo [6], que são apresentados abaixo.

1º) TENSÃO u DE ALIMENTAÇÃO CONSTANTE

$$\frac{i_D}{u} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_6 (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3 R_4 + R_3 R_4 R_1 + R_4 R_1 R_2 + R_5 A} \quad (21)$$

$$A = R_6 (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_3)(R_2 + R_4)$$

$$u_D = i_D R_6 \quad (22)$$

A partir da eq. (21) pode-se concluir que quanto maior a resistência R_5 maior a sua influência no resultado da medição; R_5 pode ser a resistência dos cabos, sendo que ela cresce com a diminuição do diâmetro e/ou com o aumento do comprimento e é variável com a temperatura.

29) CORRENTE i DE ALIMENTAÇÃO CONSTANTE

$$\frac{i_D}{i} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_6 (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} \quad (23)$$

$$u_D = i_D R_6 \quad (24)$$

Fazendo alimentação com corrente constante obtêm-se a eq. (23) independente de R_5 , assim, a resistência dos cabos e parâmetros como tempo de observação e temperatura, não tem influência no circuito de ponte, o que é ideal.

30) $u = \text{constante}; R_5 = 0$

Em muitas aplicações técnicas, pode-se desprezar a resistência interna da fonte de alimentação bem como a resistência dos condutores da tensão de alimentação (cabos curtos); por exemplo: em transdutor de força, de torque, de aceleração, de pressão, etc. Em função disso tem-se a partir da eq. (21)

$$\frac{i_D}{u} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_6 (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 R_3 + R_2 R_3 R_4 + R_3 R_4 R_1 + R_4 R_1 R_2} \quad (25)$$

$$u_D = i_D R_6 \quad (26)$$

$$49) \underline{i = \text{constante}; \Delta R_1 = -\Delta R_3; \Delta R_2 = -\Delta R_4}$$

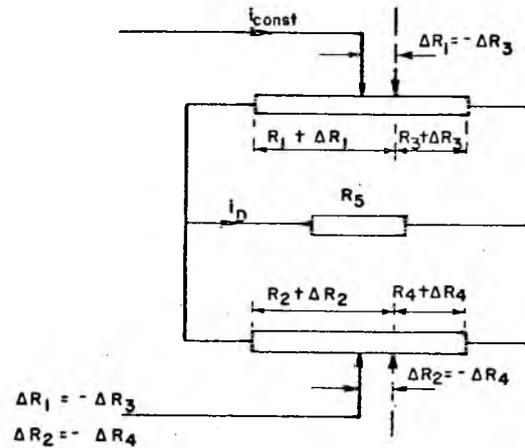


Figura 7 - Circuito de ponte tendo potenciômetros como transdutor [6].

Pode-se introduzir em uma ponte, um transdutor segundo a figura 7 como por exemplo, é o caso do potenciômetro, em forma de um transdutor; quando ocorre uma variação ΔR_1 de R_1 de sinal contrário e de mesma grandeza que a variação ΔR_3 da resistência R_3 , ocorre no outro transdutor $\Delta R_2 = -\Delta R_4$; Desta forma obtêm-se da eq. (23)

$$\frac{i_D}{i} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3)}{R_5 \Sigma(R_1 + \Delta R_1) + (R_1 + \Delta R_1 + R_3 + \Delta R_3)(R_2 + \Delta R_2 + R_4 + \Delta R_4)} \quad (27)$$

Simplificando a eq. (27), tem-se:

$$\frac{i_D}{i} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3 + \Delta R_1 (R_2 + R_4) - \Delta R_2 (R_1 + R_3)}{R_5 (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} \quad (28)$$

A constante aditiva se torna nula, quando se seleciona

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (29)$$

Esta é a condição dada para o equilíbrio inicial da ponte.

5º) $u = \text{constante}; R_5 = 0; R_6 = \infty; \Delta R_1 = -\Delta R_2; \Delta R_3 = -\Delta R_4$

Frequentemente tem-se pontes cuja tensão diagonal é levada a um circuito intermediário com uma resistência de entrada R_6 elevada, como por exemplo, a de um amplificador; nesse caso pode-se fazer com uma boa aproximação $R_6 = \infty$. Assim, obtêm-se das eq. (25) e (26) a eq. abaixo:

$$\frac{u_D}{u} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3 + \Delta R_1 (R_3 + R_4) - \Delta R_3 (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (30)$$

Para valores grandes de ΔR_1 ou ΔR_3 , u_D é significativamente linear em ΔR_1 e ΔR_3 . A constante aditiva passa a ser zero no correspondente equilíbrio segundo a eq. (29).

6º) $u = \text{constante}; R_5 = 0; R_6 = \infty; R_1 = R_3; R_2 = R_4; \Delta R_i^2 \ll R_i^2, i=1,4$

Esta condição é satisfeita por uma série de circuitos de ponte assimétricos utilizando EREs.

Das eq. (25) e (26), obtêm-se a eq.:

$$\frac{u_D}{u} \approx \frac{R_1 R_2 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) + \Delta R_1 \Delta R_4 - \Delta R_2 \Delta R_3}{(R_1 + R_2)^2 \left(1 + \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4}{R_1 + R_2} \right)} \quad (31)$$

A tensão diagonal u_D portanto não é linear em ΔR_i ; tornando as modificações relativas as resistências ainda menores ou seja, $\Delta R_i \ll R_i$; obtêm-se a eq. (32)

$$\frac{u_D}{u} \approx \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) \quad (32)$$

Em primeira aproximação somam-se portanto todas as variações relativas das resistências, desta forma tem-se a possibilidade de formar valores médios. Os principais campos de aplicações são as medições de deformação, força, momento e pressão com EREs.

7º) $u = \text{constante}; R_5 = 0; R_6 = \infty; R_1 = R_2; R_3 = R_4; \Delta R_i \ll R_i$

Essas condições são satisfeitas pela maioria dos circuitos de pontes com EREs. Obtêm-se em segunda aproximação das eq. (25) e (26).

$$\frac{u_D}{u} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) - \frac{1}{8} \left[\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R_4}{R_4} \right)^2 - \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right)^2 - \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} \right)^2 \right] \quad (33)$$

Também nessas condições somam-se portanto as variações relativas de resistências em primeira aproximação. As aplicações são correspondentes.

89) $i = \text{constante}; R_6 = \infty; R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3; \Delta R_1 = -\Delta R_2; \Delta R_3 = -\Delta R_4$

Das eq. (23) e (24), obtêm-se

$$\frac{u_D}{i} = \frac{\Delta R_1(R_3+R_4) - \Delta R_3(R_1+R_2)}{R_1+R_2+R_3+R_4} \quad (34)$$

A variação constante de sinal contrário nos 4 braços da ponte causam portanto da mesma forma, como na alimentação com tensão constante (eq. 23) boa linearidade para variações de qualquer ordem de ΔR_j .

90) $i = \text{constante}; R_6 = \infty; R_1 = R_3; R_2 = R_4; \Delta R_i \ll R_i$

Essa ligação corresponde as ligações segundo as eq. (31), (32) e (33), apenas que a ponte ao invés de ser alimentada com tensão constante é alimentada com corrente constante i . A sua aplicação é especialmente vantajosa quando a ponte é alimentada através de cabos que cobrem distâncias elevadas, cuja resistência R_5 é grande e/ou variável.

Das eq. (23) e (24), obtêm-se em primeira aproximação

$$\frac{u_D}{i} \approx \frac{R_1 R_2 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)}{2(R_1+R_2)} \quad (35)$$

Se adicionalmente $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ e $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$, obtém-se das eq. (23) e (24) a relação simplificada.

$$\frac{u_D}{i} \approx \frac{1}{4} \Delta R_1 \left(1 - \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) \quad (36)$$

Portanto, pode-se constatar pela comparação com a eq. (23), que o erro de linearidade $\bar{\epsilon}$ é apenas a metade daquele que acontece quando usa-se tensão de alimentação constante.

3.3. OHMÍMETRO DA HP

Um sistema de desenvolvimento recente utilizado num dos ohmímetros fabricados pela Hewlett Packard (HP) [10], permite medições de resistência com alta resolução. Consiste numa fonte de corrente constante que faz passar uma corrente i através de uma resistência de referência R_1 de alta precisão, onde é medida a tensão de referência u_1 , com um voltímetro digital de 6 1/2 dígitos, de elevada precisão. A corrente i passa também através da resistência desconhecida R_2 onde é medida a tensão u_2 .

Com o auxílio de um micro-processador, os valores lidos u_1 e u_2 são levados a eq. (37) onde é calculado o valor da resistência procurada R_2 , segundo [10]. A figura 8 mostra um esquema da medição de resistência com o ohmímetro HP.

$$R_2 = \frac{u_2 \cdot g_1}{u_1 \cdot g_2} \cdot K_r \quad (37)$$

onde:

R_1 - resistência de referência;

u_1 - tensão de referência;

R_2 - resistência desconhecida;

u_2 - tensão sobre R_2 ;

g_1 e g_2 - fator de ganho na medição de u ;

K_r - fator de ganho do ohmímetro dependente de R_1 .

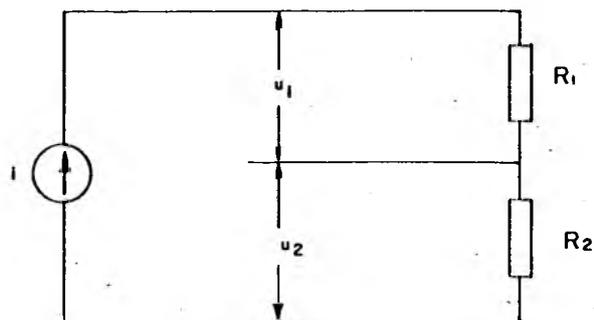


Figura 8 - Medição de resistência com ohmímetro HP.

Assim os problemas das fontes e dos aparelhos usados para medição de pequenas variações de resistência, vistos anteriormente, estão aparentemente resolvidos:

- 1º) A resolução 10^{-6} do voltímetro é suficiente;
- 2º) A estabilidade da fonte de corrente é controlada através de um resistor de precisão.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DOS ERES UTILIZANDO PONTE DE WHEATSTONE

4.1. ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES (AET)

Aplicações típicas bem conhecidas dos ERES utilizando PW, incluem medidas de tensão/deformação em estruturas, como por exemplo usinas nucleares, pontes, barragens, edifícios, etc.; os ERES também são importantes no uso em pesquisa como no projeto e desenvolvimento de equipamentos, além de proporcionar a demonstração em laboratório de conceitos básicos de engenharia.

A AET se caracteriza por ser aplicada a estados uniaxial ou plano de tensões, sendo normalmente necessários a utilização de muitos ERES em múltiplos pontos e/ou as "rosetas extensométricas" para sua realização.

A roseta é uma combinação normalmente de 3 ERES, que permite, através da medição das deformações, o cálculo das tensões e direções principais de um ponto [2]. Os valores encontrados são valores médios de tensão. Cada ERE da roseta exige a formação de uma ponte independente, elevando os custos de instalação, principalmente quando muitas rosetas são usadas.

4.2. TRANSDUTORES

Os ERES também são utilizados com PW em transdutores, como por exemplo, na medição de deflexão, de força, de torque, de aceleração, de vibração, de pressão, etc.

A utilização dos ERES em transdutores se caracteriza pela atuação num campo de tensões uniforme, utilizando poucos ERES em relação a uma AET. A precisão requerida é maior que na AET.

4.3. TIPOS DE LIGAÇÕES DE ERES USADAS EM PONTE DE WHEATSTONE

Conforme das tarefas mencionadas os tipos de ligações dos EREs são diferentes, dependentes das aplicações.

A PW usada na extensometria pode ter 1, 2 ou os 4 braços da ponte formados com EREs; é comum usar um ERE por braço da ponte, mas poderão ser utilizados mais em série ou em paralelo. O número de EREs a serem usados, dependem da sensibilidade requerida e também das características de medição.

Na figura 9 é apresentado o resumo das ligações mais genéricas e suas respectivas equações. Em |1| e |11| são mostrados exemplos de montagens com EREs para 1/4, 1/2 e ponte completa.

Geralmente na AET é usado o circuito de 1/4 de ponte, sendo as distâncias entre os pontos de medição comumente elevadas e as condições ambientais geralmente variáveis, fazendo-se necessário a compensação de temperatura dos cabos e dos EREs. Na medição de deformação em pontos remotos usualmente é utilizado cabos longos, os quais dificultam o balanceamento das pontes.

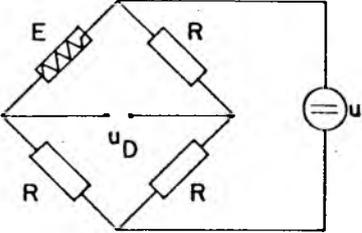
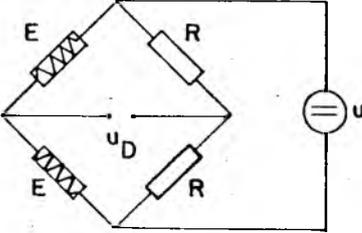
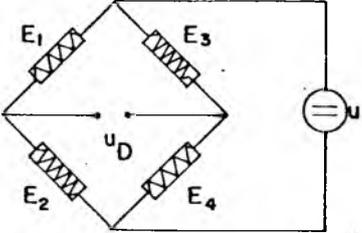
1/4 PONTE	1/2 PONTE	PONTE COMPLETA
1 ERE ativo	2 EREs ativos	4 EREs ativos
		 <p>$E_1 - E_3$ e $E_2 - E_4$ DEVEM SER \neq</p>
$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{u_D}{u} \quad (38)$	$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_D}{u} \quad (39)$	$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{u} \cdot u_D \quad (40)$

Figura 9 - Principais ligações de EREs usadas em PW
(E = ERE e R = resistor).

Na AET tem-se normalmente medição de deformação de múltiplos pontos, sendo por isso muito utilizadas as chaves seletoras. Estas se caracterizam por localizarem-se "internas" a ponte o que pode provocar perturbações nas medições.

Um exemplo de AET tem-se na referência [12].

A figura 10 mostra um arranjo de 1/4 de ponte, que mostra a problemática encontrada na AET.

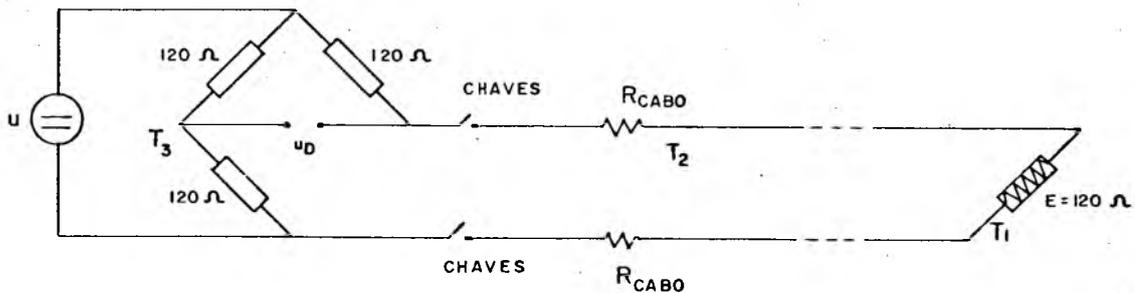


Figura 10. - Arranjo de 1/4 de ponte, característico de AET, com as resistências dos fios atuando sobre o braço do ERE ativo.

Os transdutores utilizam os circuitos de 1/2 ponte e ponte completa com maior frequência, os quais permitem trabalhar com maior sensibilidade do que os circuitos utilizados na AET, como pode ser verificado comparando-se as equações (38), (39) e (40) da figura 9. Assim, o problema de amplificação encontrado na AET para pontos remotos fica minimizado, além dos EREs nos transdutores ficarem localizados uns próximos dos outros, o que permite o uso de cabos curtos e a compensação de temperatura dos cabos e dos EREs. Os transdutores em geral são construídos com as chaves "externas" a ponte, o que reduz a influência das mesmas no circuito.

Visto as diferenças nas aplicações dos EREs na AET e nos transdutores, será dada a partir de agora ênfase a AET, já que é o objetivo do presente trabalho.

4.4. COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA

Na AET normalmente tem-se que compensar dois efeitos de temperatura:

- temperatura dos cabos;
- temperatura dos EREs.

Quando cabos longos e/ou de resistência elevada são usados, ocorrendo variação de temperatura nos mesmos, existirá influência da temperatura e ainda da resistência introduzida na ponte. A figura 10 mostra a resistência dos cabos interna num circuito de 1/4 de ponte.

Exemplo: se um fio de cobre de comprimento l 10 m (conforme figura 10) tem diâmetro = 0,8 mm, resistência $0,017\Omega/\text{mm}^2$ e $\alpha = 0,004/^\circ\text{C}$. A deformação aparente devida a variação de temperatura de 1°C dos cabos será:

$$R_{\text{cabo}} (10 \text{ m}) = 0,34 \Omega$$

$$R_c = 2 \cdot R_{\text{cabo}} \cdot \alpha = 0,0027 \Omega/^\circ\text{C} = \Delta R$$

$$\epsilon_{\text{aparente}} = \frac{l \cdot \Delta R}{K \cdot R} = 0,000011/^\circ\text{C} = 11 \mu\epsilon/^\circ\text{C}.$$

Para eliminar essa fonte de erro $\bar{\epsilon}$ é conectado ao ERE ativo mais um fio idêntico aos demais como mostra a figura 11a. Tem a vantagem de distribuir igual parcela de resistência do cabo, entre resistores adjacentes da ponte; este circuito é conhecido como arranjo com cabo de 3 fios, sendo recomendado por alguns fabricantes [13], para compensação de temperatura dos cabos.

O uso do circuito de 3 fios fica limitado a medição de deformação de pequeno número de sensores ou quando os EREs estão submetidos a alta temperatura. O uso deste circuito aumenta sensivelmente o custo de instalação, principalmente em medições de múltiplos pontos e/ou distâncias longas entre os pontos de medição.

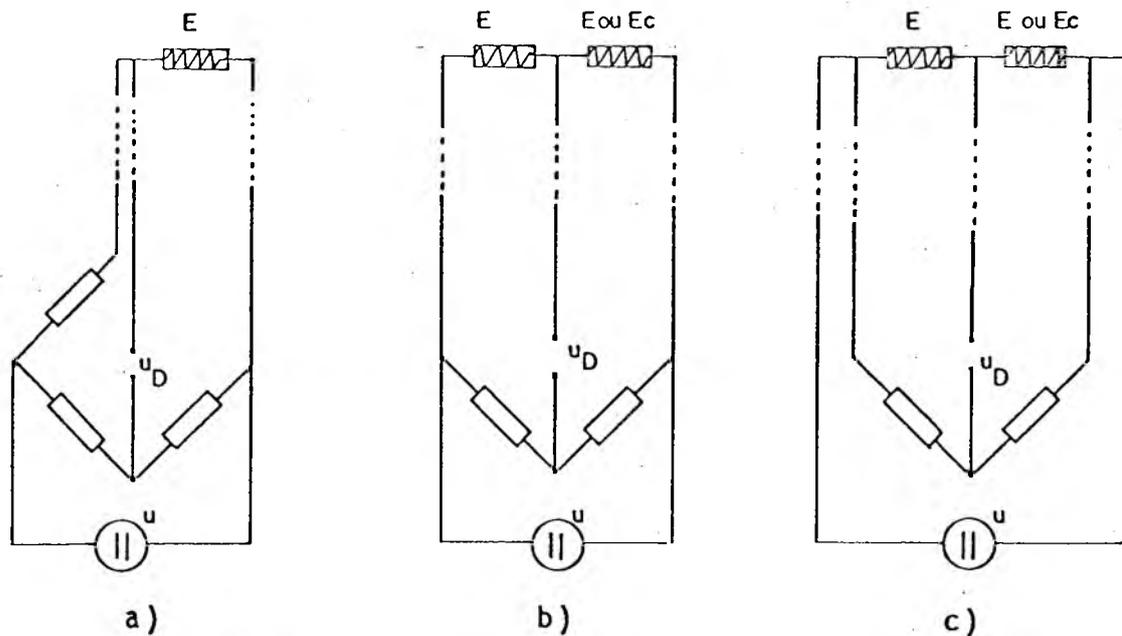


Figura 11 - Ligações normalmente usadas para compensação de temperatura. ($E = ERE$ ativo e $E_c = ERE$ de compensação).

No capítulo II foi abordado os efeitos de temperatura na extensometria, onde foi explicado o princípio do extensômetro auto-compensado.

Outro método de compensação de temperatura dos EREs, comumente usado, está apresentado na figura 11b; é usado como resistor compensador de temperatura um ERE com características idênticas ao ERE "ativo", sendo porém o extensômetro de compensação excluído completamente da sollicitação mecânica mas submetido a mesma variação de temperatura como o extensômetro ativo. Deve ser colocado no braço da ponte adjacente ao braço onde se encontra ligado o ERE ativo.

O circuito apresentado na figura 11c é uma versão do circuito anterior, onde é utilizado mais dois fios que servem para manter a tensão de alimentação da ponte constante, junto a 1/2 ponte do ERE ativo, independente da resistência e do comprimento dos cabos. Este arranjo é chamado de circuito de realimentação.

Um circuito bastante usado em AET é o de 1/4 de ponte com ERE compensador. Quando um grupo de EREs ativos ficam localizados próximos, é possível fazer a compensação utilizando-se somente um ERE passivo como [12].

Quando as distâncias entre os pontos de medição são longas é recomendável a utilização de circuitos com realimentação a fim de evitar a queda de tensão de alimentação entre as duas 1/2 pontes.

CAPÍTULO V

REALIZAÇÃO TÉCNICAS PARA EQUIPAMENTOS DE AET

5.1. INTRODUÇÃO

Não há unanimidade entre os autores, fabricantes e usuários, na denominação dos instrumentos de medição com EREs do tipo PW; neste trabalho esses instrumentos serão denominados de "ponte amplificadora". Eles consistem basicamente em:

- 1º) Elementos para ligação em ponte:
 - a) elementos para equilíbrio;
 - b) elementos para facilitar medições de 1/4, 1/2 e ponte completa;
 - c) elementos para regular o ganho do amplificador;
 - d) elemento para seleção da faixa de medição;
- 2º) Fonte de tensão para variar a alimentação da ponte;
- 3º) Sistema para calibração;
- 4º) Algumas pontes amplificadoras tem a possibilidade de trabalhar com ou sem realimentação;
- 5º) Elementos complementares para ligação em ponte:
 - a) chaves seletoras - usadas para medições múltiplas;
 - b) cabos - usados para ligação da ponte amplificadora aos EREs.

Já foram exemplificadas algumas grandezas que além da própria deformação tem influência na medição. A seguir são descritas as realizações técnicas das pontes amplificadoras.

5.2. EQUILÍBRIO DA PONTE

Os EREs incorporados ao circuito tipo ponte normal-

5.3.1. EXCITAÇÃO CC

As pontes de excitação CC são de construção mais simples comparadas às de excitação CA. Por terem resposta rápida, são recomendadas para medições dinâmicas. O equilíbrio da ponte é conseguido com maior facilidade, já que atuam somente resistências ôhmicas no circuito. Além disso, é possível ligar várias pontes CC para medições com múltiplos pontos, que o balanceamento de uma ponte não influencia o balanceamento da outra.

Apresentam a desvantagem quanto aos erros do amplificador de instrumentação e da tensão de excitação da PW em função da temperatura (sensíveis as tensões termoelétricas, tensões galvânica), exigindo dessa forma o emprego de componentes de alta precisão no projeto o que geralmente torna seu custo mais elevado.

5.3.2. EXCITAÇÃO CA

As pontes com excitação CA necessitam de frequência portadora para excitar a PW e a informação da deformação aparece como sinal modulante.

A vantagem nesse processo é a eliminação dos erros dependentes de tensões termoelétricas, permitindo ainda que o equipamento seja projetado para medir deformações em faixas de frequências, para aplicações específicas.

As pontes com excitação CA necessitam de um grande número de circuitos, dispensando no entanto o emprego de componentes de alta precisão no projeto de amplificadores de instrumentação e outros circuitos de relevância.

Na figura 13 está mostrado um diagrama das diversas fases de uma ponte amplificadora de frequência portadora (frequência portadora, modulação, amplificação, demodulação e filtragem) ilustrada com medições estáticas e dinâmicas.

Outra vantagem dessas pontes, quando possuidoras de alta frequência portadora, podem ser utilizadas para medições com transdutores que tenham seu princípio construtivo baseado em efeitos indutivos e capacitivos.

Neste tipo de ponte, indutores e capacitores causam influência no circuito extensométrico, principalmente quando são usados cabos longos para ligação dos EREs. Assim o ajuste não é tão simples como nas pontes com excitação CC, sendo necessário o balanceamento resistivo e de fase.

5.4. CHAVEAMENTO

Para medições com muitos extensômetros especialmente na AET, muitas vezes são usadas uma série de chaves (chaves selectoras SC) com múltiplas possibilidades de interligação. Através das SC os EREs estão sequencialmente ligados a uma unidade ponte amplificadora.

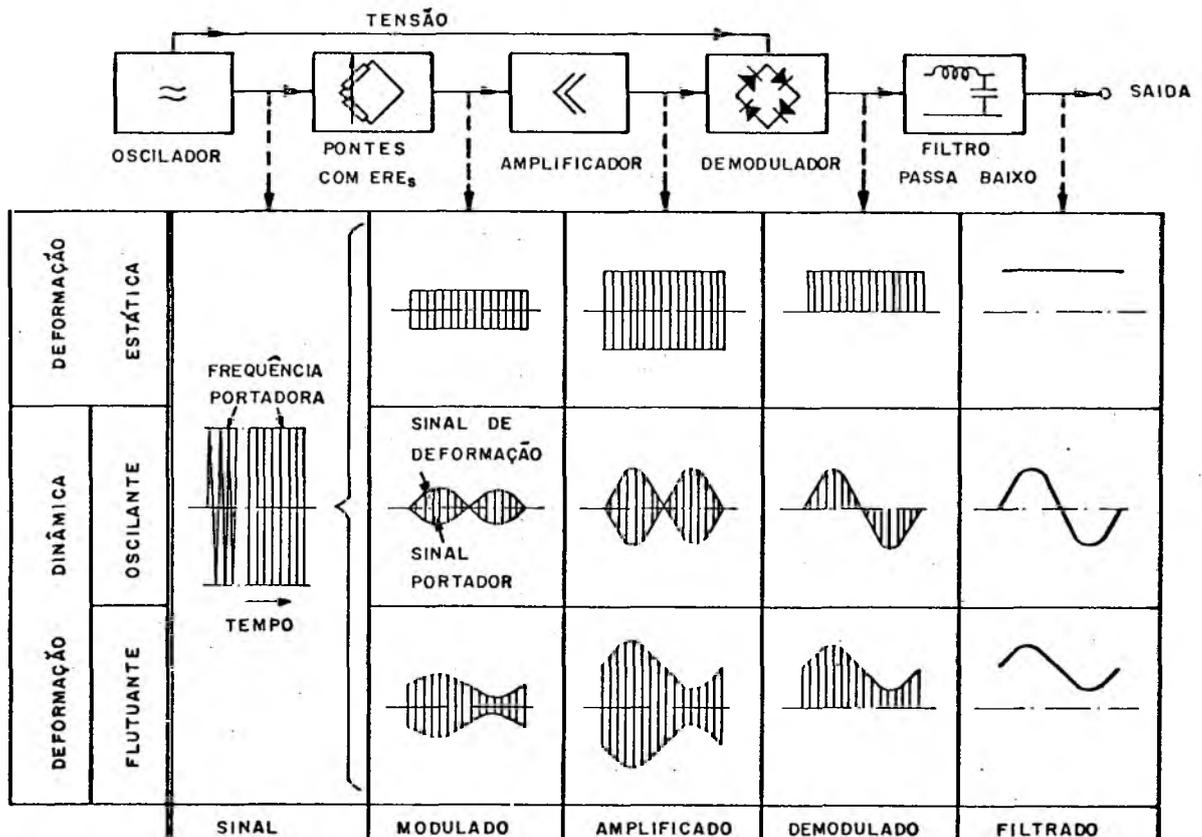


Figura 13 - Diagrama de bloco de uma ponte amplificadora de frequência portadora [8].

Neste ítem serão abordados as grandezas de influência das SC e alguns tipos de chaves mais utilizadas.

5.4.1. INFLUÊNCIAS DAS CHAVES SELETORAS

Segundo [14] e capítulo III no caso de medição de deformação com EREs tem-se que medir grandezas na faixa de micro ohms. Cuidado especial deve-se ter na escolha do circuito de medição, incluindo a chave seletora, devido as grandezas de perturbação relacionadas com esta chave.

Na AET as grandezas de perturbação podem surgir principalmente através de:

- tensões termoelétricas;
- variações do tipo "common mode to normal mode" [4];
- influências dinâmicas.

Tensões termoelétricas aparecem, como na medição de temperatura com termopares, entre lugares de contato de metais e temperaturas diferentes. Tais pontos de contato existem em chaves com relês.

Mudanças de resistências, podem causar na medição, em uma ligação em ponte com extensômetro, um desequilíbrio da ponte ou ainda mudança de sensibilidade.

Na existência de tensões tipo "common mode" por exemplo, na medição em componentes que tem o potencial da rede elétrica ou em medições próximas a ele, podem surgir tensões "normal mode" proveniente de mudanças de resistências assimétricas, distorcendo o resultado da medição.

Um circuito extensométrico pode ter as chaves internas ou externas a ponte. Na figura 14a é mostrado um circuito em 1/2 ponte, onde as chaves S_1 e S_3 estão "internas" a ponte. Os resistores a serem chaveados são os extensômetros E. A resistência da ponte é composta pelas resistências dos EREs, dos cabos e das chaves. Mudanças de resistência das chaves causam perturbação na medição. Usualmente são utilizados as chaves internas a ponte

em medições de pontos remotos.

Caso, chaves de alta qualidade e cabos de baixa resistência sejam usados, os erros serão minimizados.

Deve ser lembrado que o importante para esse circuito, não são os valores absolutos das resistências de contato das chaves, mas sim os valores das variações, que irão desequilibrar a ponte.

Na figura 14b tem-se o mesmo circuito que no caso anterior, somente que agora as chaves e cabos estão externas a ponte, assim a resistência da ponte é formada somente pelas resistências dos EREs, o que é ideal.

Outro tipo de ligação é mostrado na figura 14c, consta de um circuito de 1/4 de ponte com extensômetro compensador de temperatura E_c . Os resistores a serem chaveados são os extensômetros $E_1, E_2 \dots E_n$. O grupo de chaves 2 serve para chaveamento de diferentes EREs. Duas chaves são ligadas de cada vez, junto com dois resistores de acordo com o princípio Thompson.

Para minimizar a influência da variação da resistência de contato das chaves, principalmente quando estas estão internas a ponte, utiliza-se a ligação Thompson (figura 14c). Observa-se neste circuito, que os contatos duplos são arranjos para atenuar a influência da resistência de contatos. As resistências R_1 e R_2 são grandes comparadas com a máxima variação da resistência de contato esperada. Assim a corrente de alimentação flue através da resistência R_1 em paralelo com a resistência R_2 mais as resistências de contato (R_{s3} e R_{s4}); para o outro braço, a corrente de alimentação flue através das resistências ($R_1 + R_{s3}$) em paralelo com as resistências ($R_2 + R_{s4}$). Desta forma, pode ser mantida pequena a influência das mudanças de resistência das chaves 2.1 e 2.2, segundo a referência [15]. Assim, pode-se usufruir as vantagens do chaveamento para medição de deformação, principalmente nesse circuito que é próprio para AET (aonde tem-se normalmente múltiplos pontos de medição).

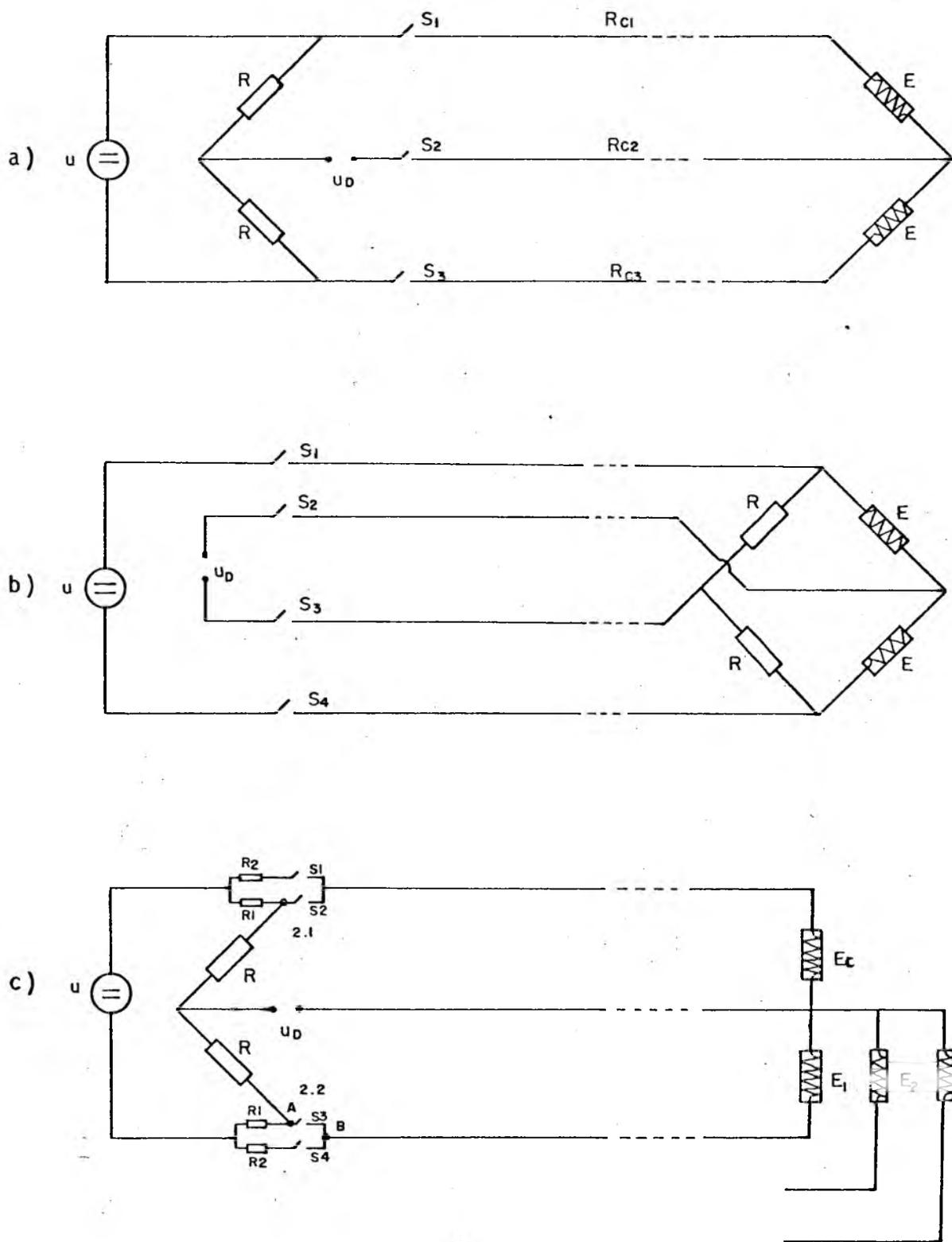


Figura 14 - Influência do chaveamento "interno" e "externo" ao circuito tipo ponte.

5.4.2. GRANDEZAS QUE DEFINEM A CHAVE SELETORA

Segundo [14], resultam como grandezas importantes para equipamentos de medições múltiplas, tensão termoelétrica, resistência de contato e tempo de chaveamento.

Outras grandezas para descrição de elementos para chaveamentos, tais como:

- resistência de chaveamento como função do ambiente, do tempo, e da frequência de chaveamento;
- isolamento;
- capacitância;
- o valor da função de transferência dependente da frequência são consideradas de menor importância.

5.4.3. CHAVES UTILIZADAS

Pode-se utilizar para SC diversos tipos de chaves, tais como:

- relés eletro mecânicos;
- reed switch;
- semi condutores;
- e outros.

O reed switch (chave de lâminas), que foi o usado na construção da SC, consiste de duas lâminas magnetizáveis, colocadas dentro de uma ampola de vidro hermeticamente selada; a figura 15 ilustra uma representação esquemática.

Quando um fluxo magnético Φ é gerado no espaço entre as lâminas, originam-se entre elas pólos magnéticos opostos, fazendo com que as mesmas se aproximem, até se tocarem, fechando o contato. Tão logo o campo magnético desapareça, as lâminas separam-se pela sua própria força elástica.

Para gerar-se o campo magnético necessário, pode-se utilizar um imã permanente ou uma bobina energizada.

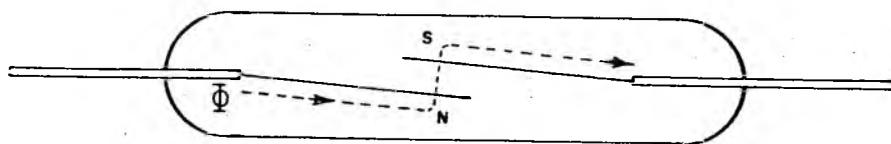


Figura 15 - Esquema de um reed switch.

5.5. CABOS

As características principais dos cabos são:

- Resistência = f (resistividade, comprimento, diâmetro);
- Capacitância = f (constante dielétrica, distância entre fios e casca, área superficial dos fios e casca);
- Indutância = f (corrente, fluxo magnético, número de espiras).

Como geralmente os cabos elétricos são conectados em série com os EREs, as mudanças de resistência que ocorrem nos cabos têm influência no sistema de medição; portanto é recomendável o uso de cabos com baixa resistência e coeficiente de resistividade térmica, além de boas propriedades mecânicas.

Quando são usadas pontes amplificadoras de frequência portadora, além da resistência dos cabos, têm influência no circuito efeitos capacitivos e indutivos.

Para circuitos que utilizam ponte de frequência portadora, os cabos devem ser blindados, além de baixa resistência, capacitância e indutância. Esses fatores combinados facilitam o balanceamento (de impedância) da ponte. Como a impedância do circuito depende da frequência portadora, quanto maior for a frequência, maior influência terão no circuito os efeitos de resistência,

capacitâncias e indutâncias dos cabos. Também devido a esses efeitos, os cabos devem ser fixados, para evitar flutuação do zero da ponte.

Em medições de múltiplos pontos os cabos devem ter o mesmo comprimento, sendo recomendável o mais curto possível, para facilitar o balanceamento da ponte e compensação de temperatura dos cabos, como está mostrado na figura 16.

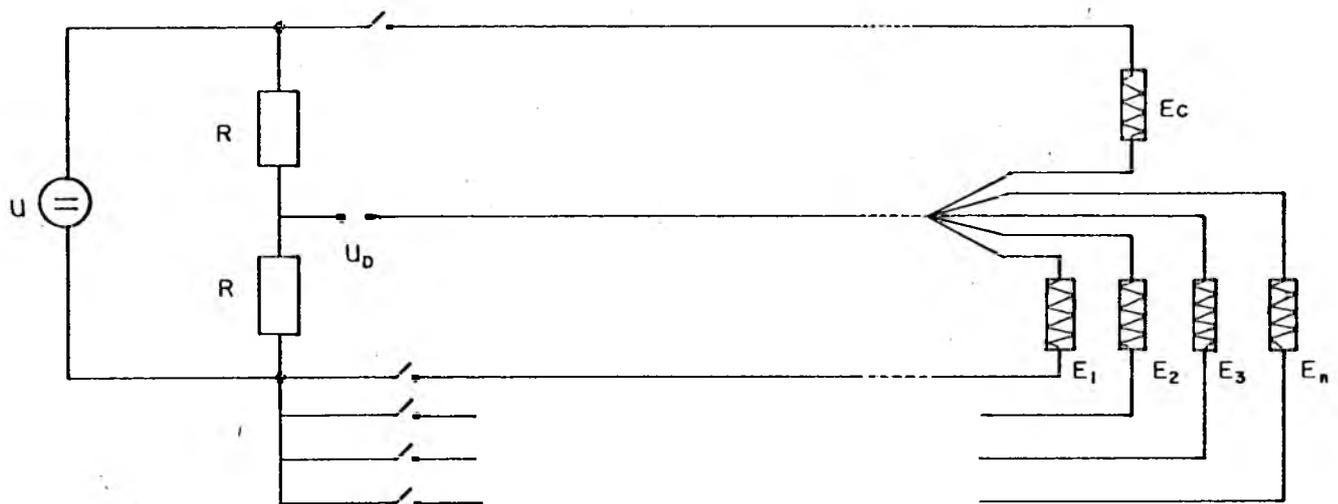


Figura 16 - Exemplo de ligação de 1/4 de ponte para múltiplos pontos de medição com cabos simétricos.

5.6. GRANDEZAS PERTURBADORAS

Neste ítem serão vistos as principais grandezas de perturbação relacionadas a cadeia de medição de deformação com EREs.

5.6.1. MUDANÇAS DE RESISTÊNCIA

A resistência do ERE pode ser considerada como função da deformação ϵ , da temperatura T e do tempo de observação t ;

sendo que a variação de resistência que ocorre nas duas últimas parcelas, quando há mudança de temperatura, é adicionada a deformação ϵ . Assim:

$$R = f(\epsilon, T, t) \quad (41)$$

Já foi dito, que $\Delta R/R$ depende da deformação específica (longitudinal e transversal) e da variação relativa de resistividade do condutor ($\Delta\rho/\rho$), em última análise, do fator K do ERE. Portanto, cabos, extensômetros e chaves, dependendo de sua qualidade, são grandezas de influência no sistema de medição, dependentes da temperatura.

Nas medições de deformação com EREs, muitas vezes é inevitável que um fio passe perto de uma máquina que esteja a temperatura elevada, ou no campo, pode ocorrer, que parte da fiação se encontre ao sol e parte a sombra. Assim ocorrem mudanças de T, as quais irão variar R, gerando erros nas medições, como: tensões termoelétricas, queda de tensão de alimentação, desequilíbrio ou variação da sensibilidade da ponte.

5.6.2. RUÍDO ELETRÔNICO

As tensões Δu_D de um circuito extensométrico são pequenas (normalmente menor que $10 \mu V/\mu\epsilon$). Como consequência, ruídos eletrônicos tem elevada importância no projeto de circuitos com EREs. Esses ruídos são produzidos por campos magnéticos, gerados quando flue uma corrente através de um fio perturbador, colocado próximo, aos fios do extensômetro, como mostra a figura 17. Quando flue corrente alternada no fio de perturbação, há variação do campo magnético produzido por ambos os fios, induzindo um laço de tensão no circuito. Desde que a distância ℓ_1 e ℓ_2 (figura 17) não sejam iguais, a diferença do campo magnético nos dois fios do sinal, induzem a tensão de ruído u_r a qual é superposta a tensão Δu_D do ERE. Em certos casos, aonde o campo de perturbação é grande, a tensão de ruído é significativa, e a separação da tensão devida ao ERE, da tensão de ruído é difícil.

Existem 3 maneiras para reduzir ao m̃nimo essa grandeza de influênc̃ia:

1ª) Todos os fios devem ser esticados e torcidos juntamente, para minimizar a área do laço, fazendo com que as distâncias l_1 e l_2 sejam iguais. Assim a tensãõ de ruído serã minimizada.

2ª) Somente cabos blindados devem ser usados, e as blindagens devem ser conectadas somente ao terra do sinal, como indicado na figura 18. Se a blindagem é conectada em ambos, terra do sinal e terra do sistema, como mostrado na figura 19, é formado um laço de terra. Raramente dois aterramentos têm a mesma tensãõ, podendo ser gerado um sinal de ruído pela diferença de potencial entre os dois aterramentos, como mostra a figura 19. Um segundo laço de terra pode ser formado pelo terra da fonte, blindagem do cabo e terra do amplificador. Como o cabo tem certa capacitância distribuida entre a blindagem e os fios do sinal, quando atuar uma corrente alternada neste laço, haverã geraçãõ de tensões de ruído que irãõ se sobrepor ao sinal do ERE.

Em muitos instrumentos de registros, um terceiro condutor é usado para prover o sistema de aterramento, desde que este terra seja conectado ao chassi do instrumento.

3ª) A terceira maneira de eliminar o ruído, é utilizando o amplificador diferencial. Neste caso os fios são arranjados de tal maneira que qualquer sinal de ruído aparecerã igualmente e simultaneamente em ambos os fios. Assim os sinais de ruídos são rejeitados e os sinais de deformaçãõ amplificados.

5.6.3. TENSõES TERMOELÉTRICAS

Tensões termoeletricas aparecem nos sistemas de mediçãõ de deformações com EREs, especialmente nas juntas cabos-EREs,

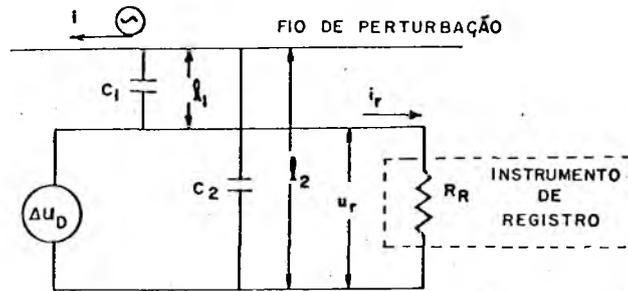


Figura 17 - Geração de ruído eletrônico

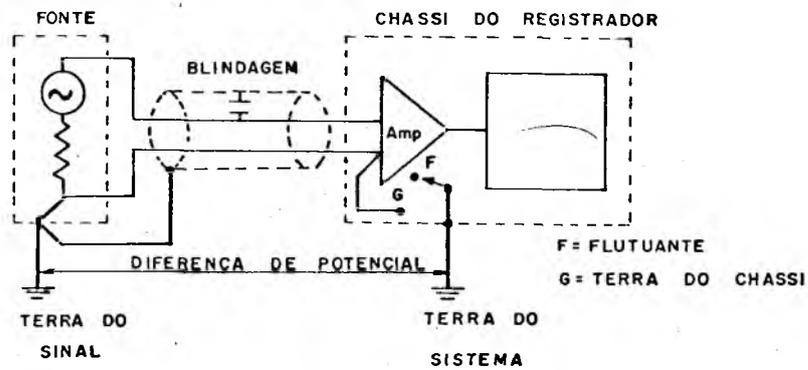


Figura 18 - Método de aterramento da blindagem do cabo

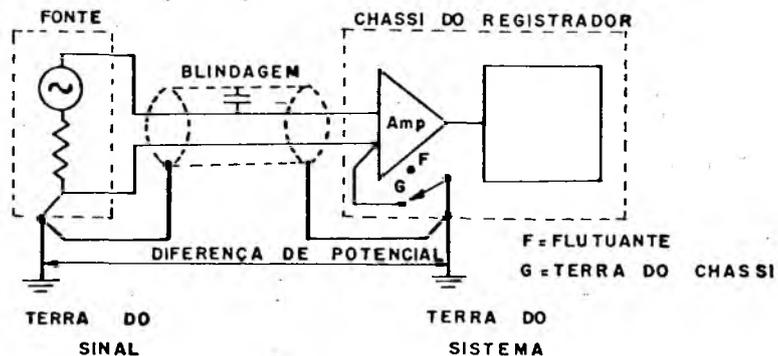


Figura 19 - Método incorreto de aterramento da blindagem do cabo

chaves seletoras, nos componentes das pontes amplificadoras, etc., e se superpõe ao sinal ERE. Diferem das tensões de ruído devido estas serem de características de corrente alternada. Assim as pontes amplificadoras tipo CC são sensíveis a este tipo de perturbação. Segundo [4], o campo dessas tensões é de 1 ... 100 μV .

5.6.4. TENSÕES GALVÂNICAS

As tensões galvânicas tem características de corrente contínua. Aparecem em lugares de contato de diferentes materiais, aonde existe algum elemento que funcione como eletrólito, gerando assim uma tensão constante (funciona como uma pilha).

As pontes amplificadoras tipo CC são sensíveis a este tipo de tensões perturbadoras.

Nos circuitos extensométricos essas tensões podem ser geradas nos pontos de contato entre EREs e os fios de ligação, funcionando como eletrólito o fluxo de solda e a umidade.

Em geral essas tensões (termoelétricas, ruído e galvânica) não podem ser separadas, sendo chamadas de tensões parasitas).

5.6.5. VIBRAÇÕES AMBIENTAIS

Tem-se ainda como grandeza de influência, nos circuitos com extensômetros, as vibrações ambientais. Cuidado especial deve ser dispensado para o controle dessas perturbações, causadas principalmente por ruídos de aparelhos de ar condicionado, batidas de portas, caminhar de pessoas, equipamentos em operação, etc.

Muitas vezes o próprio instrumento de registro é gerador de vibrações, retroalimentando o sistema de medição, criando uma série de perturbações em forma de erros aleatórios.

5.7. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição (SM) transforma a grandeza a medir (sinal de entrada = X_e) em uma medida (sinal de saída = X_s) segundo a sua função de transferência, sendo portanto uma característica do SM (figura 20a).

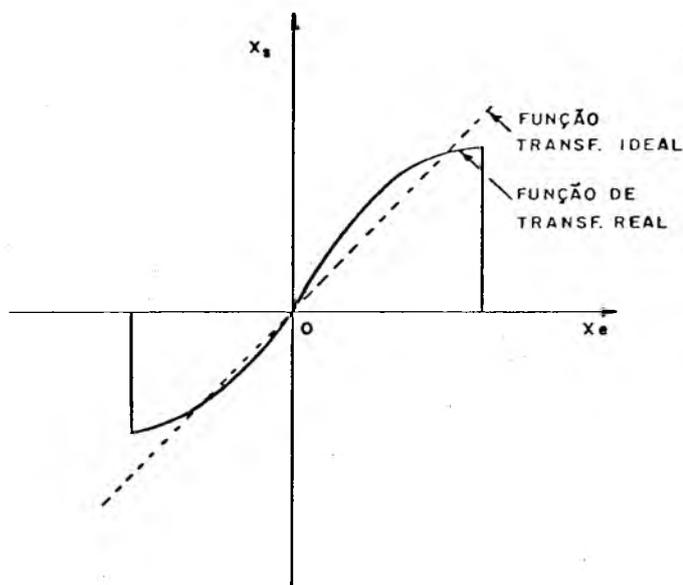


Figura 20a - Função transferência de um SM.

Normalmente a função de transferência real se desvia da ideal, devido à atuação no SM de grandezas perturbadoras, apresentando instabilidade dentro de uma faixa de valores. Esses desvios da função real em relação a ideal são os erros do SM, sendo influenciados pelas características estáticas do SM; as principais são:

SENSIBILIDADE - de um sistema de medição, é a variação do sinal de saída (medida) correspondente a variação unitária da grandeza a medir (figura 20b). Para sistemas lineares é constante e é dada pelo coeficiente angular da tangente a curva de transferência.

Em função da variação das condições de ensaio (tempo de observação, temperatura, etc.) pode ocorrer gradativamente uma mudança da função transferência, ou seja, uma flutuação da sensibilidade (figura 20b).

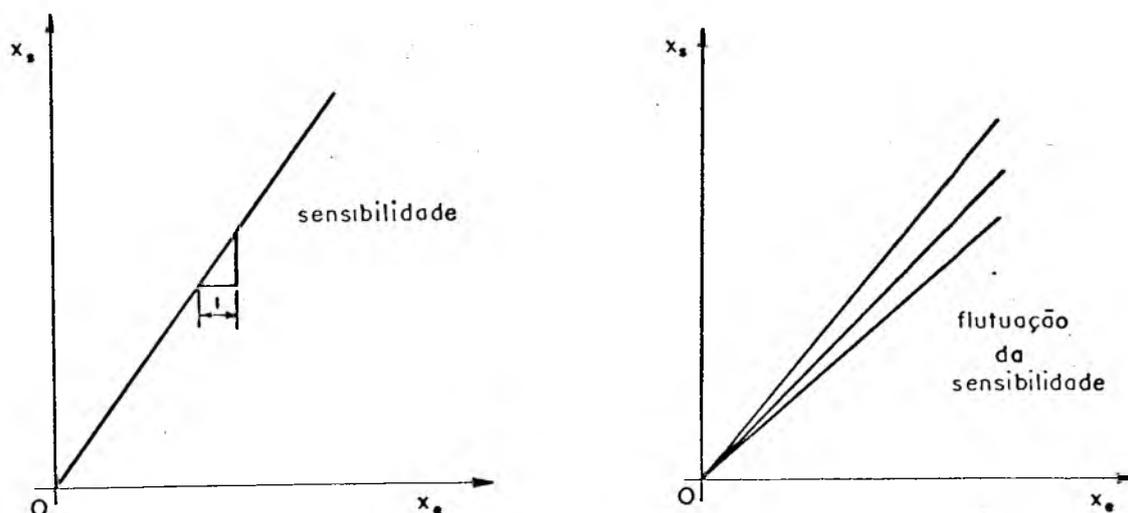


Figura 20b - Conceitos de sensibilidade e flutuação de sensibilidade de um SM.

LINEARIDADE - os sistemas de medição de deformação com EREs devem apresentar características essencialmente lineares para a faixa de medição especificada. Face a isso, os desvios de linearidade constituem fator de erros na medição de deformação com EREs, principalmente na parte relativa ao instrumento de medição, como mostram as diversas equações dos circuitos de ponte em 3.2.3.

A linearidade pode ser definida de diversas maneiras; a definição que será adotada neste trabalho será do método dos mínimos quadrados. Assim a reta de referência é calculada por este método e o maior afastamento da curva de transferência à reta de regressão, estabelece o desvio de linearidade (figura 20c).

REPETIBILIDADE - de um sistema de medição significa que, medindo-se uma determinada grandeza várias vezes seguidas, num curto espaço de tempo, com o mesmo instrumento e nas mesmas condições, obter-se-á sempre a mesma curva de medição.

No presente trabalho, a repetibilidade depende principalmente do chaveamento e do sistema de carregamento da estrutura a ser ensaiada.

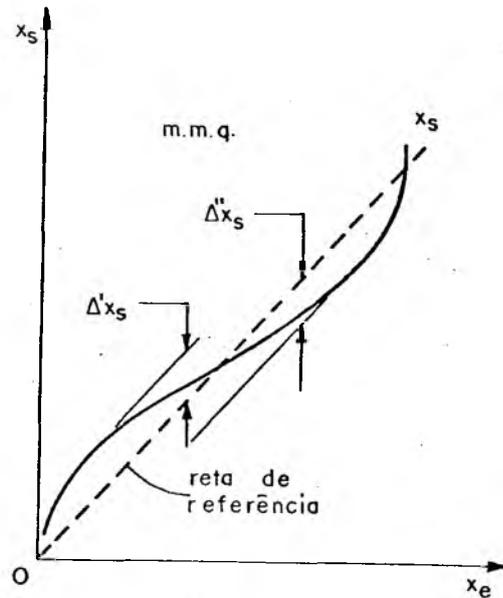


Figura 20c - Conceito de desvio de linearidade pelo método dos mínimos quadrados.

ESTABILIDADE DO ZERO - o deslocamento da curva de calibração para posições paralelas à inicial é definida como não estabilidade do zero. Os erros de não estabilidade do zero ou de flutuação do zero (figura 20d) de um SM de deformação com EREs, são causados principalmente pela instabilidade da fonte de alimentação da PW, compensação incompleta da temperatura dos EREs, fluência dos EREs, colagem, etc.

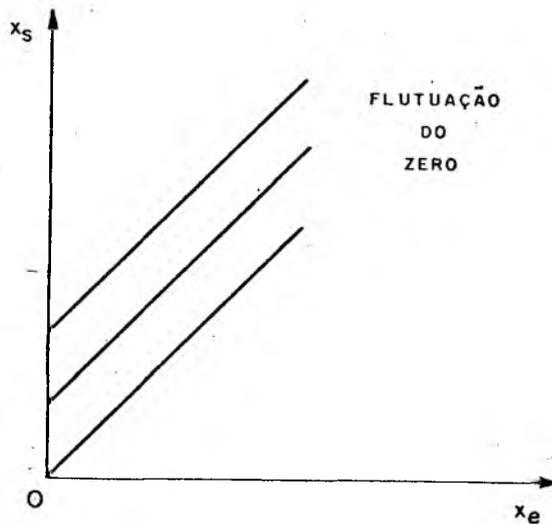


Figura 20d - Conceito de flutuação do zero de um SM.

HISTERESE - é a diferença entre os valores indicados, no ciclo de carregamento e no de descarregamento do SM, para um mesmo valor da grandeza a medir (figura 20e). O efeito de histerese do SM de deformação com EREs, para o presente caso, é devido principalmente ao atrito e folga que ocorrem no dispositivo de carregamento e amortecimento da estrutura sob teste.

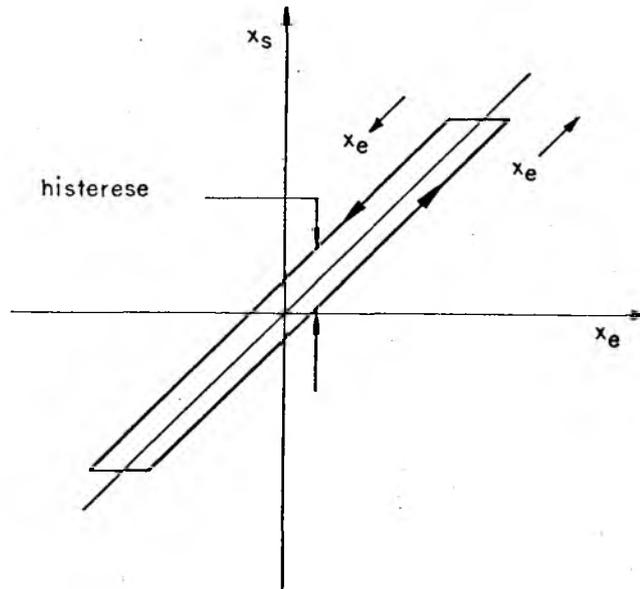


Figura 20e - Conceito de histerese de um ciclo de medição.

CAPÍTULO VI

PROPOSTA PARA TESTES

Neste capítulo serão abordados as propostas para testes, bem como as condições de realização dos mesmos.

6.1. PROPOSTA PARA TESTES

Pelo que foi visto até agora, tempo de observação e temperatura são grandezas de influências em cadeias de medição de deformação com EREs. Portanto, geração de tensões termoelétricas, flutuação do zero da ponte, queda de tensão de alimentação da ponte, mudança de resistência dos cabos, etc., são perturbações causadas pelas variações de temperatura nos EREs, nos cabos ou nas pontes.

Com o objetivo de simular esses efeitos perturbadores, nos principais elementos da cadeia de medição, foi formulada uma proposta para testes, como mostra a figura 21. As medidas de deformação seriam obtidas utilizando-se uma viga de material e de formas geométricas adequadas (figura 22), de tal modo que a força a ser aplicada produza um campo de deformação constante (estado uniaxial de tensões na viga).

Para o carregamento da viga seriam usados 14 pesos calibrados, sendo que as pontes amplificadoras seriam zeradas com 7 pesos. Portanto, a medida que forem sendo adicionados os pesos restantes, tem-se o efeito de tração na viga; caso venham ser subtraídos pesos, dos 7 iniciais, tem-se o efeito equivalente de compressão; Com isso seria utilizada toda escala do aparelho ($\pm 500 \mu\epsilon$), já que por motivos técnicos não seria possível obter os efeitos de tração e compressão na viga.

Os equipamentos a serem utilizados (vigas, cabos e pontes), foram previstos que seriam colocados em estufas, conforme figura 21, para facilitar o controle da temperatura dos mesmos.

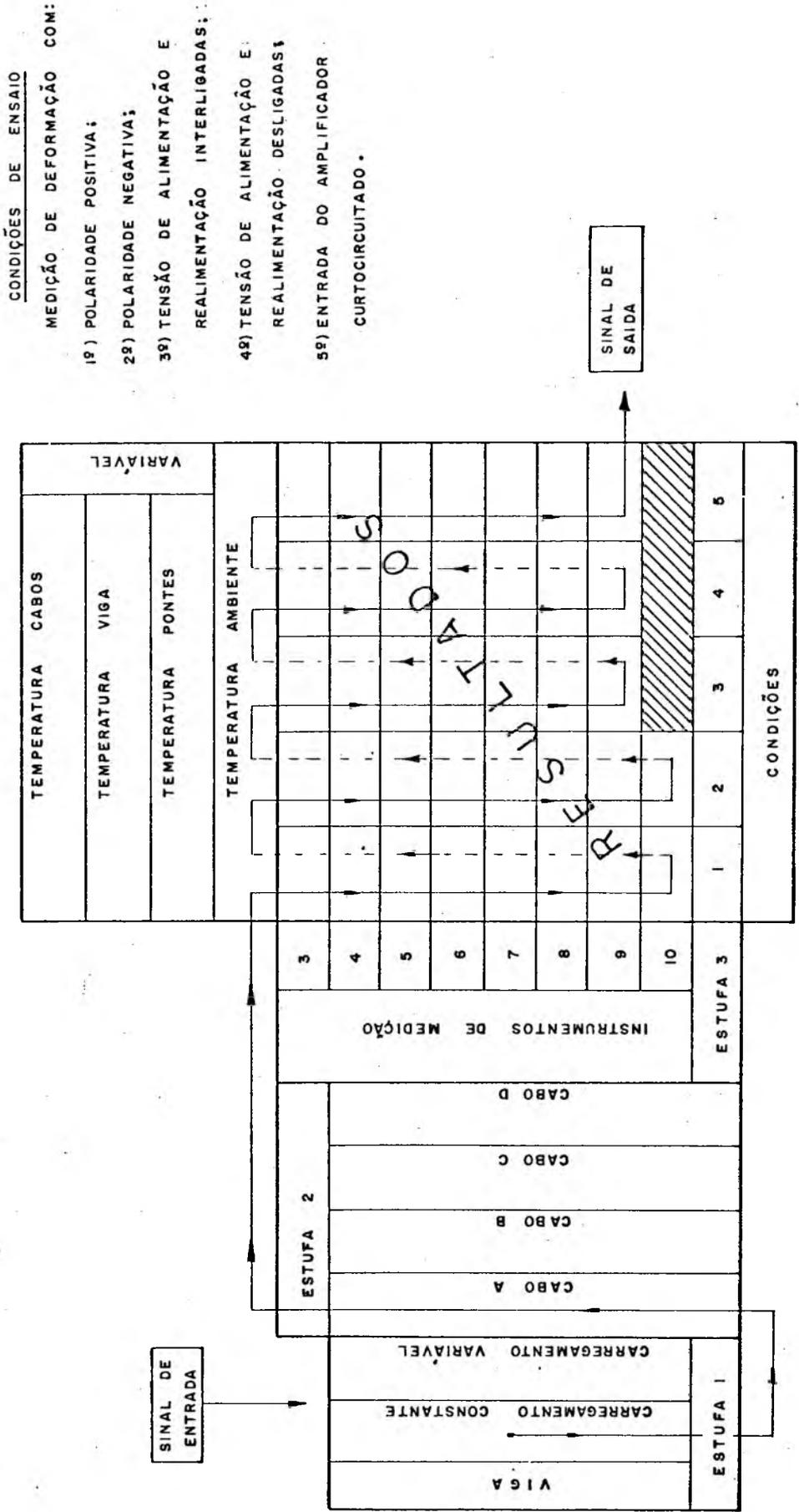


Figura 21 - Ensaio propostos para testes.

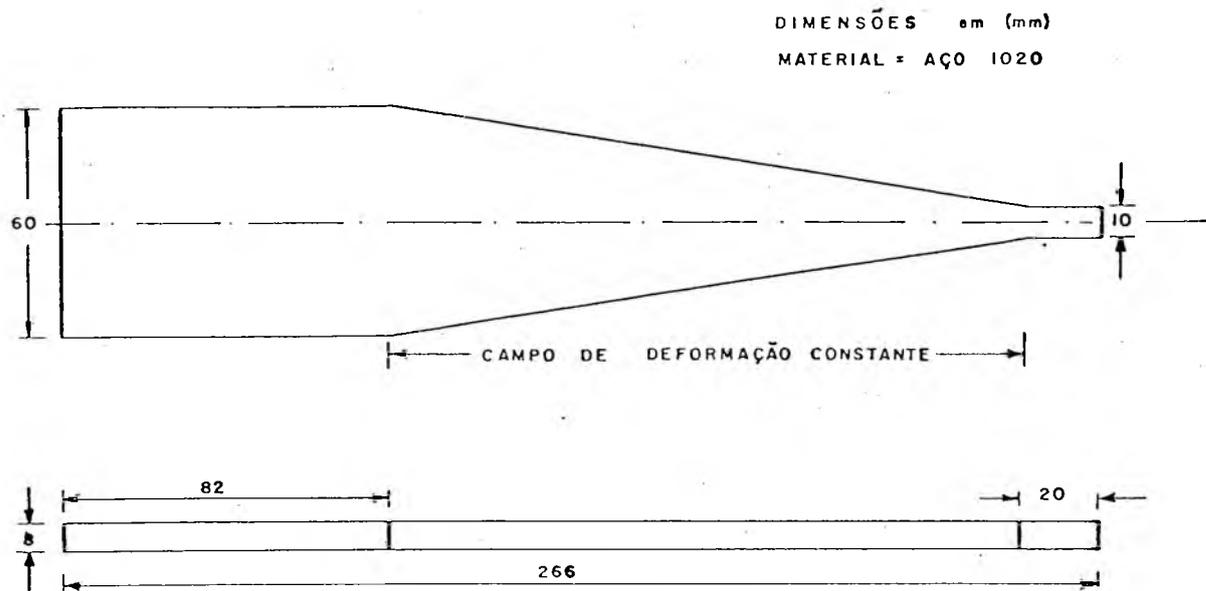


Figura 22 - Viga a ser utilizada nos testes.

Na estufa 1 seria colocada a viga, a qual pode ter carregamento constante (flutuação de deformação) ou carregamento variável.

Os cabos seriam colocados na estufa 2. Foi previsto o uso de cabos nacionais, já que o uso de cabos importados, de melhor qualidade, recomendados principalmente em medições de campo, oneram muito o custo total da medição. As principais características dos cabos propostos estão no quadro abaixo.

Cabos	Comprimento disponível (m)	Resistência ($\Omega/100$ m)	Capacitância contra casca (nF/100 m)	Auto-indutância (mH/100 m)
A	5,8	6,5	9,5	~ 0
B	45,0	10,1	6,5	0,17
C	55,0	4,4	11,3	1,04
D	55,0	22,5	22,7	2,86

Foram previstas também a utilização de 7 pontes amplificadoras (estufa 3), além de um ohmímetro da HP com ligações de 2 e 4 fios como instrumentos de medição.

Os ensaios seriam realizados na seguinte seqüência (figura 21):

- 1º) Escolher carregamento constante ou variável;
- 2º) Escolher o tipo de cabo para conectar o ERE;
- 3º) Fazer o balanceamento das pontes;
- 4º) Escolher a temperatura para o ensaio;
- 5º) Fazer leituras das deformações dos diversos instrumentos de medição.

Na figura 23 estão apresentadas as principais grandezas de influências na medição de deformação com EREs e as alternativas propostas através das condições de ensaio, para as análises dessas grandezas perturbadoras.

6.2. CONDIÇÕES DE ENSAIO

As condições de ensaio são artifícios de medição para obter os efeitos perturbadores através do controle do tempo de observação e da temperatura, somente sendo possível obtê-las nas mesmas condições devido ao uso de chaves.

Neste caso seriam feitas medições de deformação em 5 condições diferentes com:

- 1ª) Polaridade positiva;
- 2ª) Polaridade negativa;
- 3ª) Tensão de alimentação e realimentação interligadas;
- 4ª) Tensão de alimentação e realimentação desligadas;
- 5ª) Entrada do amplificador curtocircuitado.

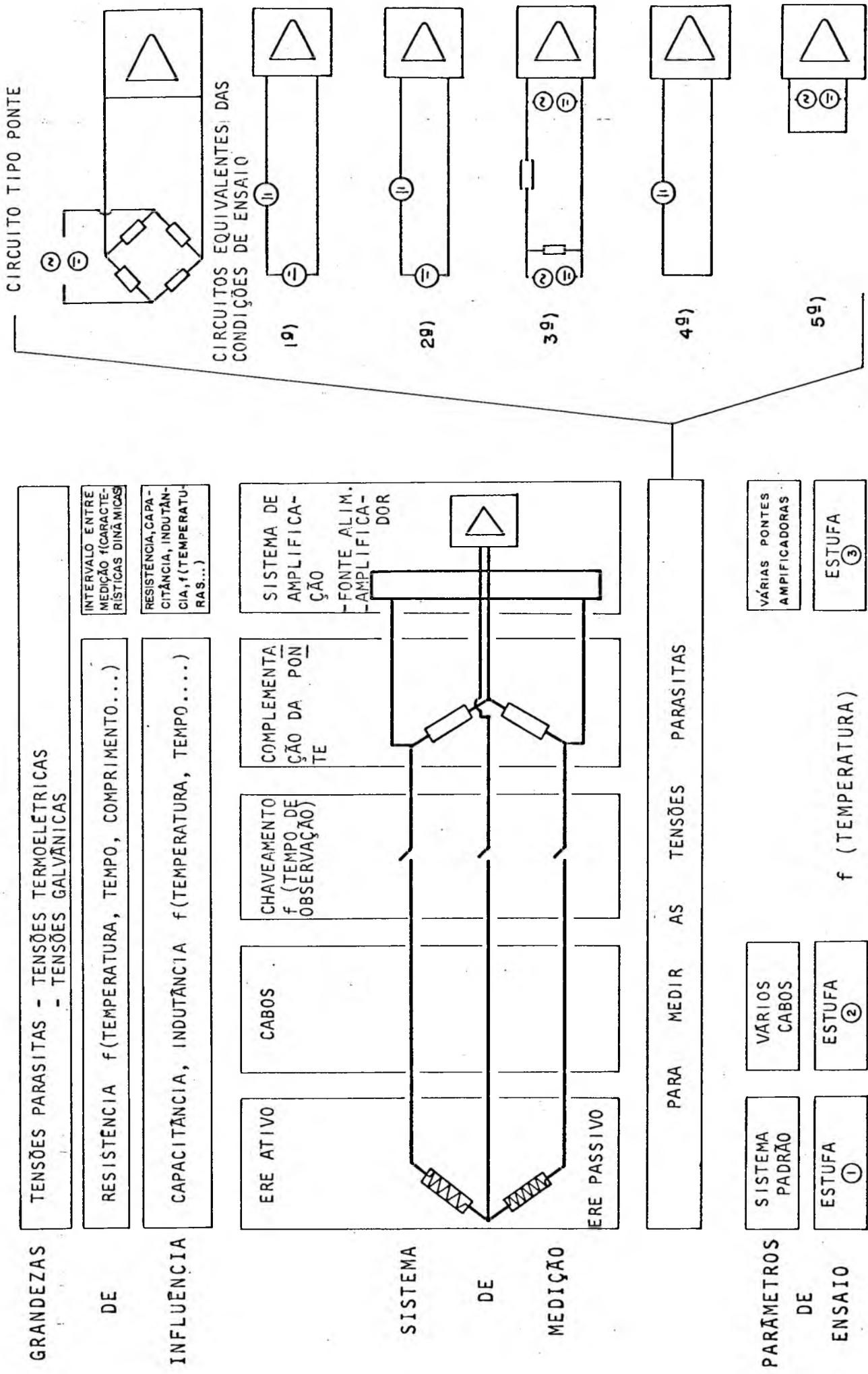


Figura 23 - Principais grandezas de influência na medição de deformação com EREs e os circuitos equivalentes das condições de ensaios.

A 1ª condição mede deformação com polaridade convencionalizada como positiva (normal); já a 2ª condição também mede deformação, mas com polaridade negativa, porque agora os fios da alimentação e realimentação foram invertidos.

Uma das maneiras usadas para constatar tensões termoelétricas em circuitos extensométricos, segundo [2], é plotando a 1ª e a 2ª condição versus o tempo.

Normalmente com as pontes que têm realimentação é possível através de uma chave comutadora trabalhar ora com realimentação ora sem. A 1ª e a 3ª condição medem respectivamente deformação com e sem realimentação; assim, fazendo-se a diferença dessas condições, tem-se a queda de tensão de alimentação da ponte.

Também é possível verificar as tensões termoelétricas e outras na 4ª condição, aonde são isolados os fios de alimentação e realimentação da ponte, permanecendo conectados os fios do sinal de saída do instrumento de medição, sendo amplificados somente os sinais de tensão constantes, já que estes independem da fonte de alimentação da ponte.

Em circuitos tipo PW, quando os fios de entrada do amplificador são curtocircuitados, 5ª condição, o sinal de saída tem que ser zero; isso não acontecendo está ocorrendo flutuação do zero do amplificador.

CAPÍTULO VII

BANCO DE TESTES

Neste capítulo serão apresentados: o sistema de medição empregado, construção de um banco de testes para determinação de erros em cadeias de medições de deformação com EREs, construção de uma chave seletora, construção de um dispositivo de carregamento da viga e instrumentação utilizada.

7.1. SISTEMA DE MEDIÇÃO EMPREGADO

Devido a necessidade de realizar os ensaios nas mesmas condições de contorno, principalmente tempo de observação e temperatura, para todas as pontes amplificadoras e o grande número de medições envolvidas em cada ensaio, foi utilizado um sistema de aquisição de sinais SAS [16]; a figura 24 mostra um esquema do SAS utilizado.

Para o presente trabalho, foram usados como componentes básicos do SAS: um interface modular de processo acoplado a uma chave seletora, de desenvolvimento próprio e um voltímetro digital para conversão A/D de sinais análogos sob o comando de um computador. Partindo de instruções do programa, através do computador, são operados os relés, são selecionados instrumentos, faixas de operação, são buscadas as medidas do voltímetro digital para a memória de trabalho, sendo em seguida processadas, armazenadas em memória permanente, documentadas pela impressora e registradas graficamente para o controle do operador.

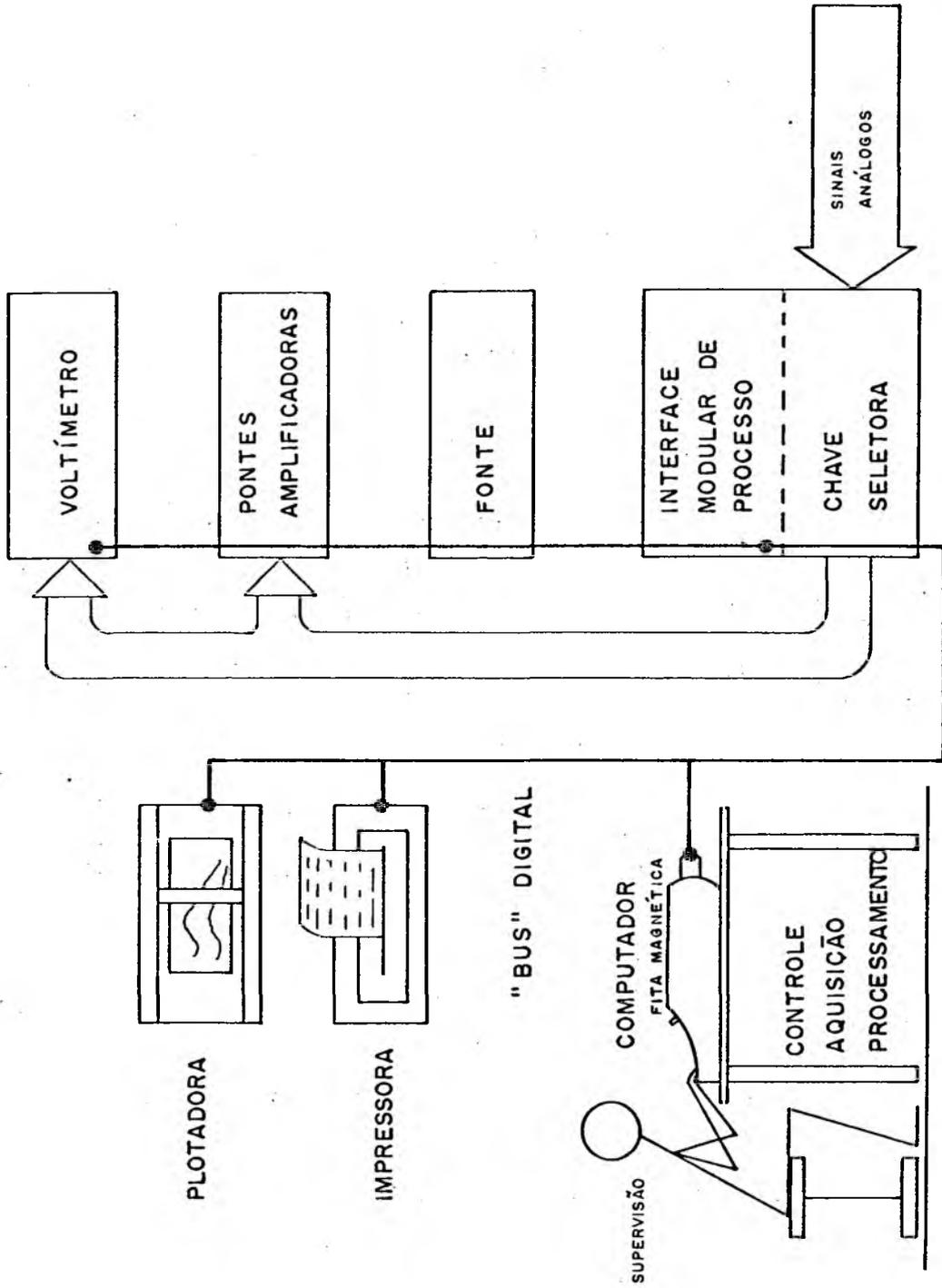


Figura 24 - Esquema do SAS utilizado nos ensaios.

7.2. CONSTRUÇÃO DO BANCO DE TESTES

O objetivo do banco de teste é obter a partir do sinal de entrada conhecido (força), o sinal de saída correspondente (deformação), para diversas pontes amplificadoras automaticamente nas mesmas condições de contorno, com a finalidade de pesquisar fontes de erros nos elementos da cadeia de medição de deformação com EREs e também comparar o desempenho das pontes amplificadoras.

A figura 25* (as figuras acompanhadas de *, por serem maiores, se encontram no final do texto) mostra a construção esquemática de um banco de testes, com o qual podem ser feitas medidas de deformação com 8 instrumentos, em 5 condições de ensaio diferentes e medidas de temperatura com 13 transdutores.

Na construção do banco de testes foram utilizados dois extensômetros do tipo 6/120 LY 61 da HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik). O ERE ativo foi colado em uma viga, ao passo que o ERE compensador foi colado em outra viga igual a primeira, somente que esta não sofre esforço mecânico; foi usado em ambos os EREs, o adesivo de cura rápida X-60 da HBM.

As vigas as quais estão colados os EREs foram montadas em um dispositivo especial e colocadas convenientemente no interior de uma estufa. A figura 26 mostra uma vista geral do interior dessa estufa, sendo vistos a viga do ERE ativo e alguns transdutores de temperatura.

Na figura 25* podem ser observados detalhes da ligação dos EREs, das pontes amplificadoras e dos transdutores ao voltímetro digital, último estágio antes do computador.

A ponte de Wheatstone é completada através do comando do computador ao processador que controla a chave seletora, chaveando a 1/2 ponte formada pelos EREs aos outros dois resistores de 350 Ω cada um, através de 2 relés duplos segundo a ligação Thompson.

O grupo de chaves (1) serve somente para simular o chaveamento como no caso de múltiplos EREs; já que essas chaves não se fazem necessárias nesse caso.

As chaves do grupo (2) servem para a comutação da tensão de alimentação (determinação das tensões termoelétricas).

Os grupos de chave (3) e (4) selecionam respectiva-

mente o sinal de entrada e sinal de saída dos amplificadores.

O grupo de chaves (5) serve para chaveamento dos transdutores de temperatura.



Figura 26 - Vista geral do interior da estufa 1

Na figura 27*, está mostrado o esquema completo dos circuitos usados na construção do banco de testes. Podem ser observadas as chaves para troca de polaridade (6), para interligar a entrada do amplificador (7), para desligar a alimentação e realimentação da ponte (8), para medição de resistência com 2 fios com o ohmímetro da HP (9), para medição de resistência com 4 fios com o ohmímetro da HP (10) e para interligar a alimentação e a realimentação (11).

Observando-se a figura 27*, principalmente o grupo de chaves (3), pode-se verificar que são necessários uma série de chaves com múltiplas possibilidades de interligação para realização desses experimentos. Por exemplo, para se efetuar o chaveamento das pontes que usam realimentação, são necessárias de 6 a 7 chaves em cada relê. Normalmente as chaves seletoras comerciais têm no máximo 4 chaves por relê, sendo de alto custo. Este foi um dos aspectos que levou a construção da chave seletora própria,

já que a disponível no LABMETRO não tem capacidade de chaveamento necessário para realização desses ensaios. Outro aspecto, foi o desenvolvimento de uma tecnologia própria, de construção de chaves seletoras pelo LABMETRO voltada especificamente para a AET e controle de processos.

7.3. CONSTRUÇÃO DA CHAVE SELETORA

Já foi dito a importância da SC em especial quando utilizada em análise experimental de tensões e também os aspectos que levaram a construção de uma SC para este trabalho.

O princípio de funcionamento de uma SC não é complexo, problemas tecnológicos de construção e montagem é que causam dificuldades.

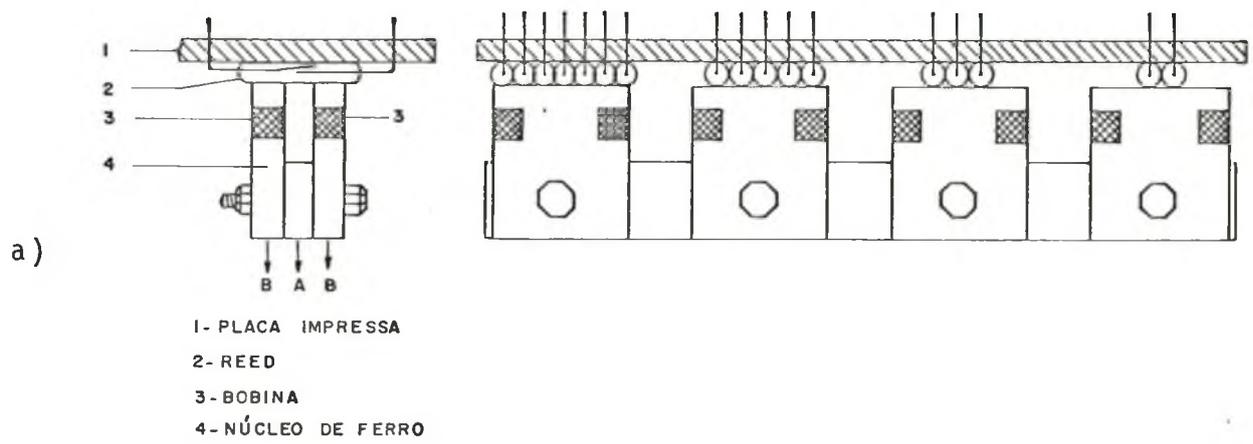
Na construção da SC foi utilizado como chave o "reed switch", normalmente aberto e para geração do campo magnético uma bobina energizada.

Segundo desenvolvimento próprio e conforme figura 28a, a bobina possui um núcleo de ferro. Acima do núcleo de cada bobina podem ser arranjados transversalmente até 7 chaves, usando-se para fixação das mesmas, uma placa de circuito impresso; com isso consegue-se grande flexibilidade de arranjo.

Foi usado para o enrolamento da bobina, fio de cobre AWG 38, sendo cada bobina composta de 2 unidades de 600 espiras cada uma, com resistência total de 60 Ω .

O conjunto chave-bobina foi chamado de relê e a chave, de chave reed. Cada unidade de SC é constituída de 16 relês (figura 28 b,c), sendo variáveis o número de chaves reeds em cada relê, em função da necessidade do experimento.

A figura 28b mostra a base de fixação dos relês de uma unidade SC, ao passo que 28c ilustra a placa de circuito impresso onde as chaves reeds são fixadas.



b)



c)

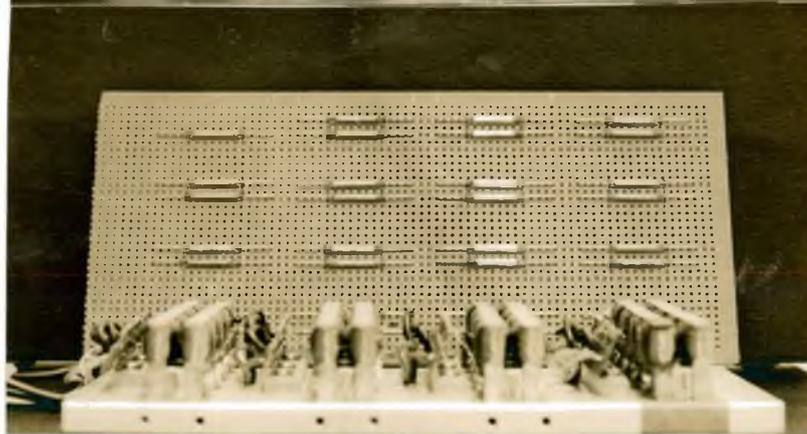


Figura 28 - Aspectos gerais de componentes e montagem de uma unidade SC.

7.4. PROJETO DE UM DISPOSITIVO DE CARREGAMENTO DA VIGA

Para tornar possível a atuação na viga de uma força padrão, na direção vertical, sempre nas mesmas condições de carregamento, com o intuito de causar flexão na viga, foi necessária a construção de um dispositivo especial de carregamento.

As exigências básicas para este dispositivo foram:

- 1º) Que as forças fossem aplicadas externas a estufa;
- 2º) Que o dispositivo fosse dimensionado para forças de até 700 N;
- 3º) Que o dispositivo introduzisse o mínimo de erros aleatórios e sistemáticos nas medições;
- 4º) Que fosse possível o carregamento dos pesos calibrados de maneira rápida, transmitindo o mínimo de vibrações a viga.

7.4.1. TIPOS DE DISPOSITIVOS TESTADOS

Para o cumprimento das exigências (3) e (4) foram encontradas as maiores dificuldades, razão pela qual foram projetados vários tipos de dispositivos de carregamento, como mostra a figura 29.

Dos tipos de dispositivos testados, os que apresentaram melhor desempenho foram, o "f" e o "c" respectivamente. O primeiro, é constituído basicamente de uma haste de aço que é conectada em uma das extremidades a um cabo de aço e este a viga; a outra extremidade da haste é conectada a um suporte, que serve para colocação dos pesos calibrados, tendo na parte inferior deste suporte um amortecedor acoplado.

O amortecedor consta de um eixo principal de aço, o qual tem 4 aletas que formam ângulos retos entre si, soldadas a uma base em forma de disco encontrando-se o conjunto submerso em um tanque de óleo. As aletas servem para absorver as vibrações torsionais, enquanto que a base, vibrações longitudinais. Para absorver efeitos combinados de vibrações foi previsto a ligação da parte superior da haste, até a viga com cabo de aço; a figura 30 mostra o dispositivo "f", destacando-se o amortecedor.

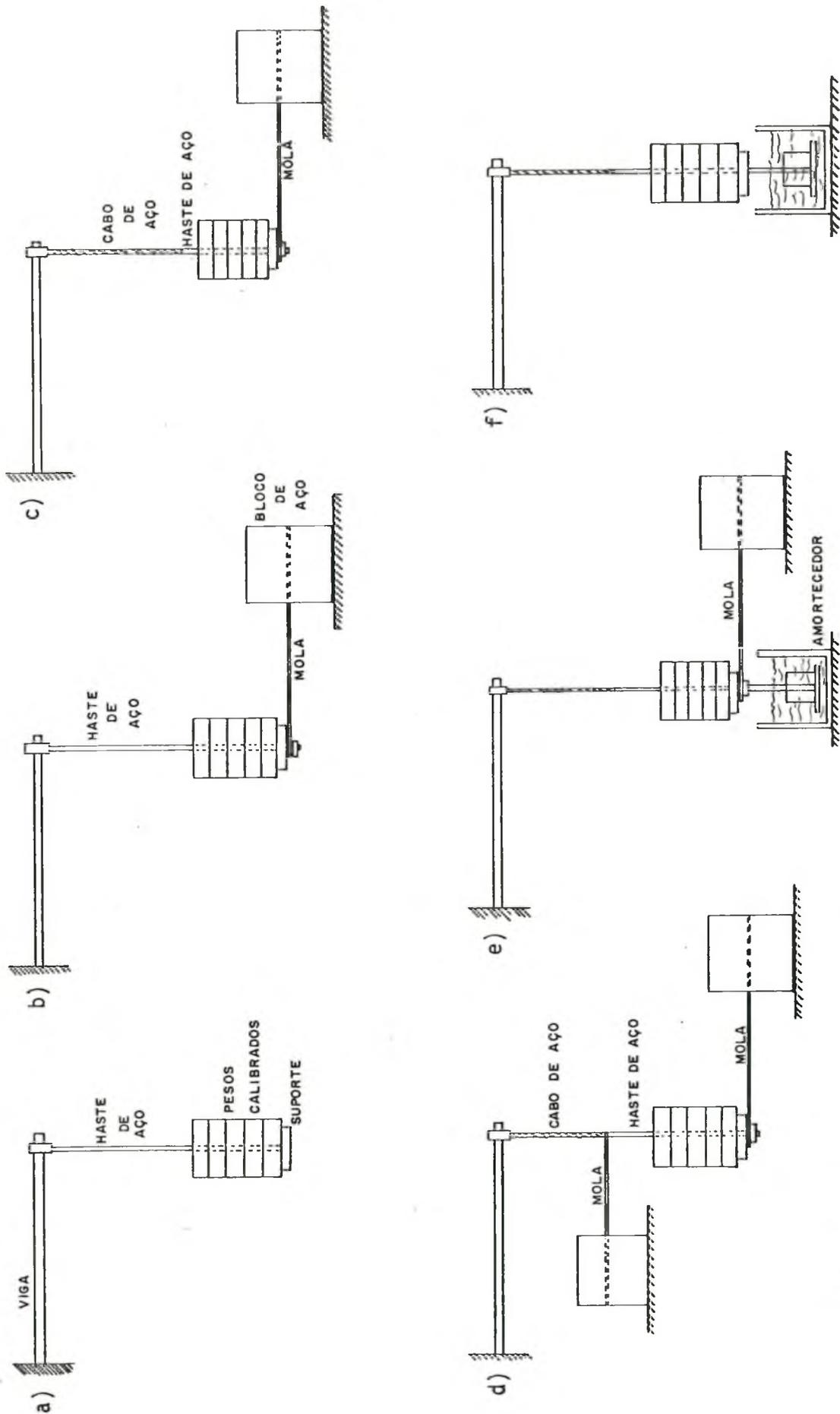


Figura 29 - Esquema dos dispositivos testados para carregamento da viga.

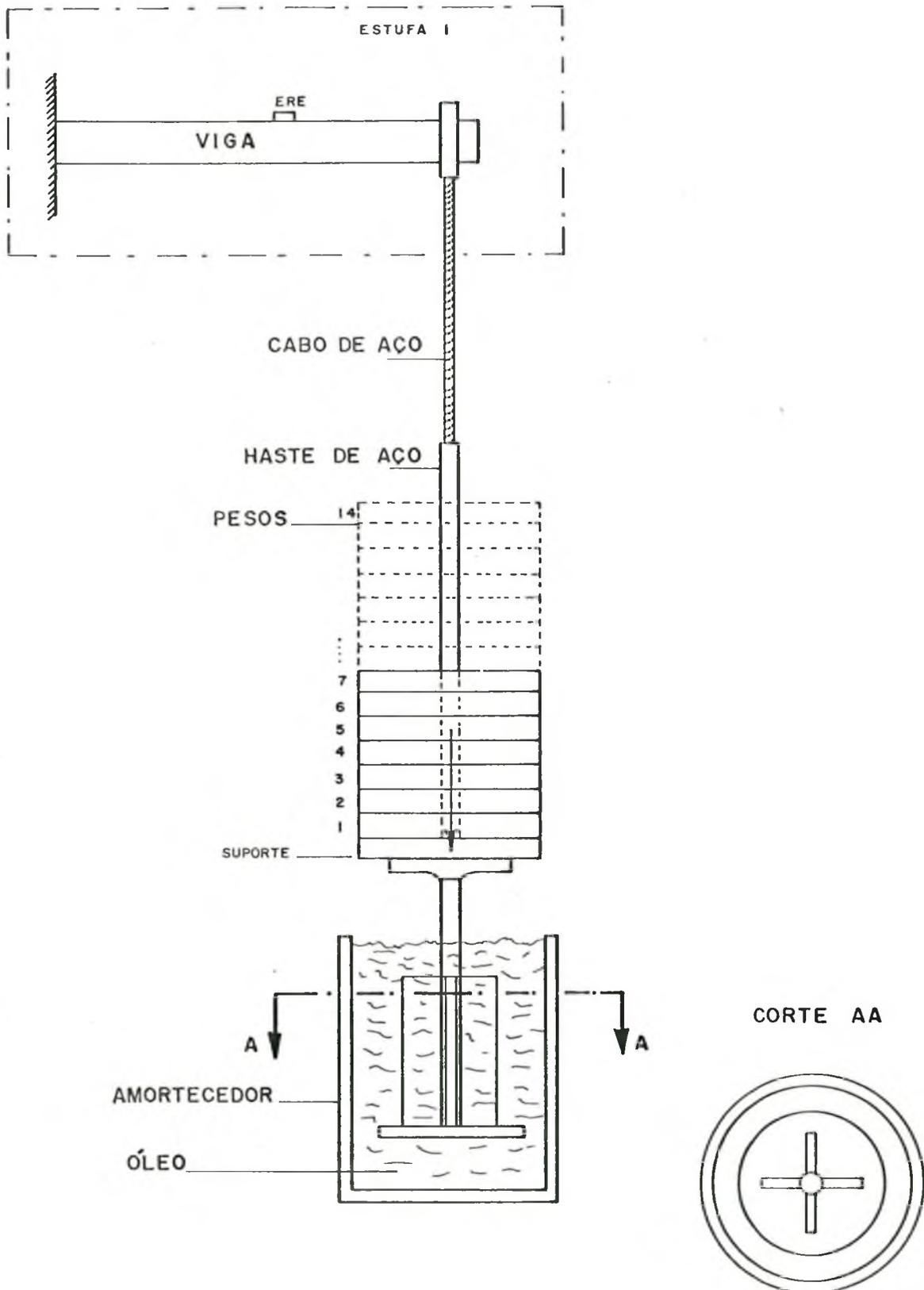


Figura 30 - Dispositivo de carregamento da viga usado para os ensaios.

No dispositivo "c", o amortecedor do dispositivo "f" é substituído por uma mola laminar, de baixa rigidez quanto a flexão, para imobilizar os pesos sem afetar a solicitação a que está submetida a viga. Uma das extremidades da mola está conectada ao suporte dos pesos, enquanto que a outra está engastada num bloco de aço, figura 29.

Um dos problemas encontrados, nos dispositivos que utilizaram haste de aço, como elemento de ligação entre o dispositivo e a viga, foi a rigidez; assim, as vibrações ocasionadas pelo carregamento, se propagavam por algum tempo, prejudicando a velocidade de carregamento. O problema foi solucionado, substituindo-se parte da haste de aço por cabo de aço.

Nas figuras 31a,b são apresentados os resultados obtidos por uma ponte amplificadora tipo CC, de 15 medições de flutuação de deformação, com intervalo entre uma medição e outra de 100 ms, utilizando-se os dispositivos de carregamento "f" e "c" respectivamente.

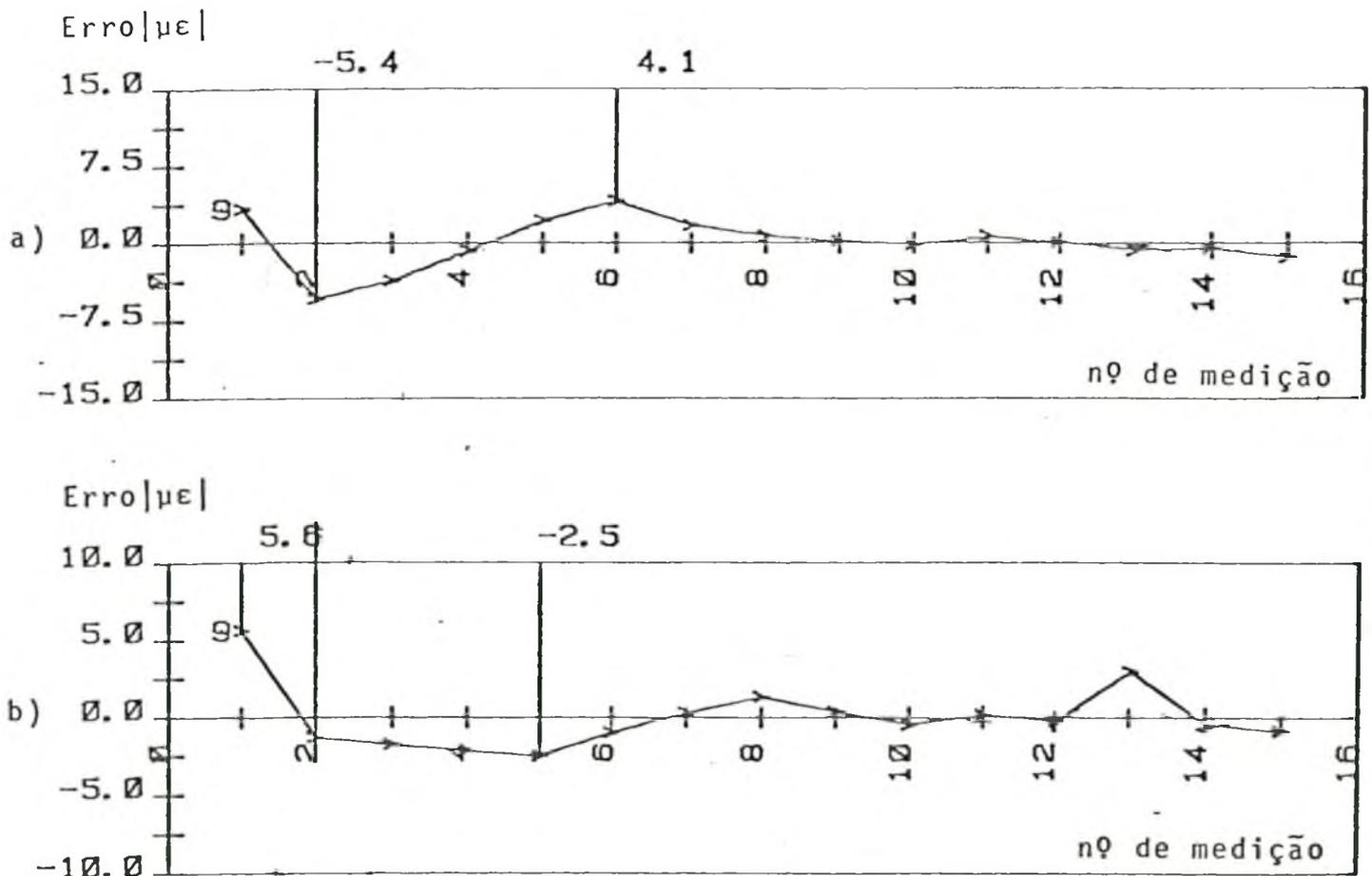


Figura 31 - Resultados obtidos com os dispositivos "f" e "c" respectivamente.

Pode-se perceber que os erros apresentados pelo dispositivo "c" são levemente superiores ao do dispositivo "f", provavelmente devido a histerese causada pela mola. Assim, para os ensaios definitivos, foi utilizado o dispositivo de carregamento tipo "f", que está mostrado na figura 30 com maiores detalhes.

7.5. INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Para medição de deformação foram utilizadas 7 pontes amplificadoras e um ohmímetro da HP, com as características abaixo descritas:

- a) - Fabricante: Kyowa Eletronic Instruments Co. Ltd.
 - Modelo: PM 9V
 - Faixa de operação $\pm 60000 \mu\epsilon$ (Ref. 3)
 - Precisão: não indicada
 - Frequência portadora: 1500 Hz
 - OBS.: usa o método de compensação;

- b) - Fabricante: Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)
 - Modelo: KWS/3S-5
 - Faixa de operação $\pm 100000 \mu\epsilon$ (Ref. 4)
 - Precisão: 0,25
 - Frequência portadora: 5 KHz $\pm 1\%$;

- c) - Fabricante: HBM
 - Modelo: KWS 3150 A
 - Faixa de operação $\pm 0,2 \dots \pm 10 \text{ mv/V}$
 - Precisão: 0,05 (Ref. 5)
 - Frequência portadora: 225 Hz $\pm 1\%$
 - Realimentação com 6 fios;

- d) - Fabricante: HBM
 - Modelo: MG 3172
 - Faixa de operação $\pm 0,2 \dots \pm \text{mv/V}$
 - Precisão: 0,1 (Ref. 6)
 - Frequência portadora: 5 KHz $\pm 1\%$
 - Realimentação com 5 fios;

- e) - Fabricante: HBM
 - Modelo: KWS 3080
 - Faixa de operação $\pm 100000 \mu\epsilon$ (Ref. 7)
 - Precisão: 0,1
 - Frequência portadora: 5 KHz $\pm 1\%$
 - Realimentação com 5 fios;
- f) - Fabricante: HBM
 - Modelo: MG 3120 A
 - Faixa de operação $\pm 0,2 \dots \pm 10 \text{ mv/V}$ (Ref. 8)
 - Precisão: 0,05
 - Excitação tipo CC
 - Realimentação com 5 fios;
- g) - Fabricante: HBM
 - Modelo: KWS 3020 B
 - Faixa de operação $\pm 0,1 \dots \pm 2 \text{ mv/V}$ (Ref. 9)
 - Precisão: 0,5
 - Excitação tipo CC
 - Realimentação com 6 fios;
- h) - Fabricante: Hewlett Packard
 - Modelo: Ohmímetro acoplado ao voltímetro digital
 3455 A (Ref.10)
 - Precisão: para medição com 2 ou 4 fios escala
 $1 \text{ K}\Omega = 0,003\%$.

O número de referência serve para posterior identificação dos instrumentos de medição nos gráficos.

Os instrumentos de medição foram escolhidos de maneira a possibilitar a comparação das pontes de diferentes frequências portadoras e as do tipo CC, com e sem realimentação. O ohmímetro da HP foi utilizado com o objetivo de ser avaliado seu comportamento como instrumento de medição de deformação com EREs.

Para o controle das diferenças de temperatura entre o ERE ativo e o ERE de compensação foram instalados 3 termopares nas vigas. Para o controle de temperatura ambiente da estufa foram instalados um termopar e um termoresistor.

Na estufa dos cabos foram instalados um termoresistor em cada cabo e um termopar para controlar a temperatura média

da estufa.

Para o controle de temperatura das pontes, que estavam numa estufa, foram usados um termistor, um termoresistor e um termopar.

No controle da temperatura ambiente foi usado um termoresistor. O esquema das ligações dos instrumentos utilizados nas medições, podem ser vistos na figura 25*.

Alguns componentes dos SAS estão mostrados na figura 32; a figura 33 ilustra as pontes amplificadoras, utilizadas nos ensaios, bem como o ohmímetro da HP.



Figura 32 - Alguns componentes do SAS, (1 - voltímetro digital, 2 - fonte, 3 - interface, 4 - interface modular de processo).

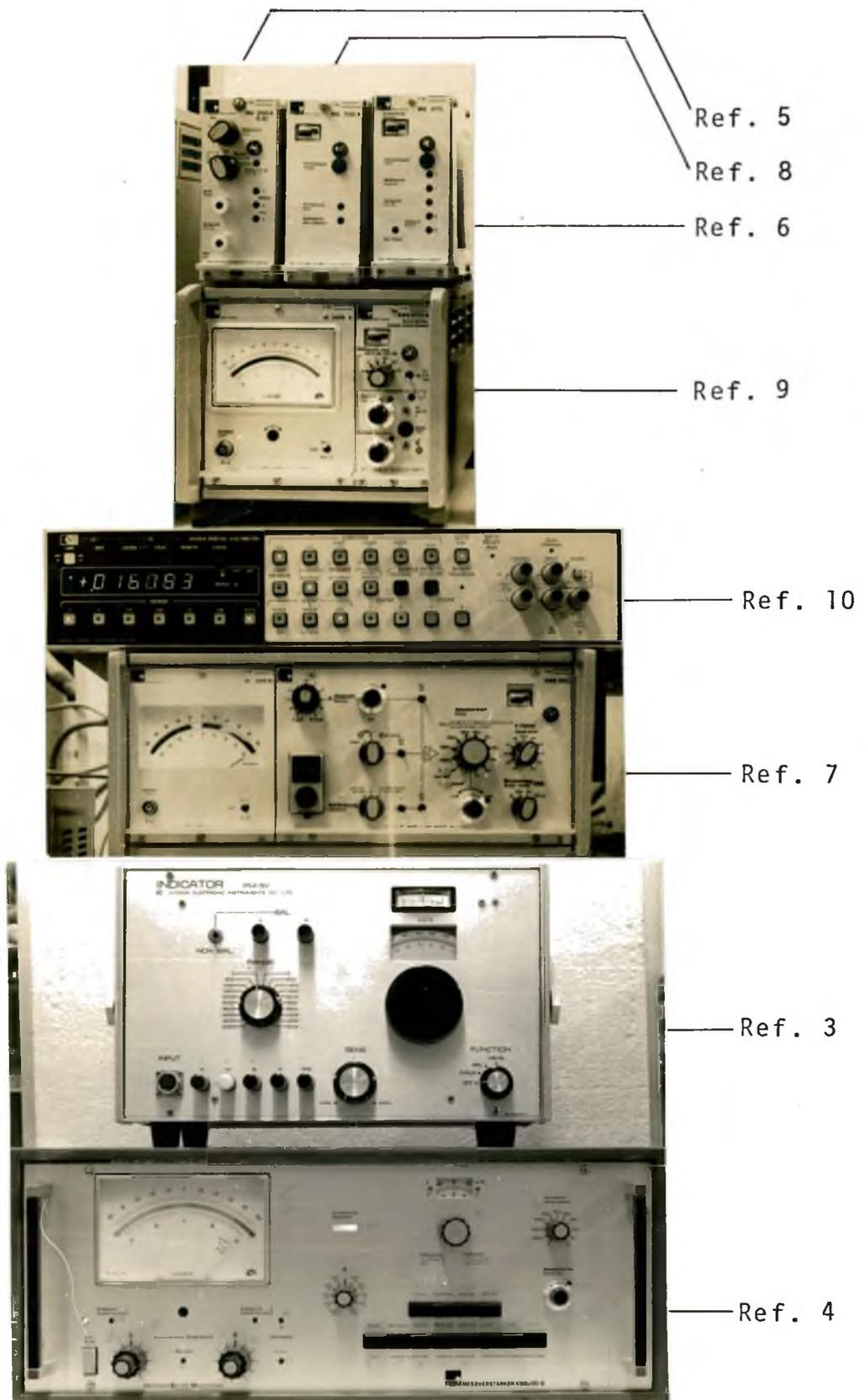


Figura 33 - Instrumentos de medição utilizados nos ensaios.

7.5.1. CALIBRAÇÃO DAS PONTES AMPLIFICADORAS

Para uma correta utilização das pontes amplificadoras, as mesmas foram calibradas antes de serem utilizadas nos testes.

Fez-se primeiro a calibração da ponte nº 7, da seguinte maneira:

- 1º) Foi feito o balanceamento da ponte;
- 2º) Foi ligada a chave para calibração da ponte;
- 3º) Ajustado o fator $K = 2$ para calibração;
- 4º) Foi selecionada a faixa de medição esperada;
- 5º) Com o potenciômetro de calibração, que tem uma escala graduada em $\mu\epsilon$, foi simulado o sinal de entrada independente da tensão de alimentação da ponte. Assim, simulava-se diversos sinais de entrada com este potenciômetro e comparava-se com o indicado no instrumento. Caso esses valores não fossem coincidentes, então fazia-se o ajuste do valor apresentado no indicador com o do calibrador, através de 2 potenciômetros, um de ajuste grosseiro e outro de ajuste fino até que os sinais do instrumento e do calibrador fossem iguais.

Após foram feitas as medições de deformação da viga com os 14 pesos padrão com a ponte calibrada (nº 7). Assim, como a deformação provocada por cada peso padrão estava conhecida, os mesmos foram utilizados para calibrar as outras pontes amplificadoras. Nesse caso, em vez de se utilizar o potenciômetro para calibração foram utilizados os pesos. Portanto, para cada peso aplicado na viga (sinal de entrada) correspondia a um sinal de deformação na saída; caso esses valores não coincidissem, então eram feitos os ajustes de amplificação, até que o sinal de entrada fosse igual ao sinal de saída.

No presente caso não era tão importante saber o valor exato da deformação produzida pelos pesos padrão na viga, mas assegurar a todos os instrumentos de medição o mesmo sinal de calibração (entrada) e assim possibilitar o estudo comparativo dos sinais de saída, dos diversos instrumentos de medição em função dos parâmetros de ensaio.

7.5.2. BALANCEAMENTO DAS PONTES AMPLIFICADORAS

Das 5 condições de ensaio possíveis de trabalhar, pode-se fazer o balanceamento das pontes amplificadoras somente nas 3 primeiras condições, já que a 4ª condição apresenta a alimentação e a realimentação das pontes desligadas e a 5ª condição a entrada do amplificador está curto circuitado.

Uma das maneiras de se verificar as tensões termelétricas, segundo [2], seria a adição das condições 1 e 2. Para isso seria necessário fazer o balanceamento das pontes simultaneamente nas condições 1 e 2. No presente caso, não se conseguiu fazer o balanceamento nas 2 condições requeridas, com as pontes de frequência portadora mais elevada. Portanto, foi feito o balanceamento das pontes nº 5 (225 Hz), nº 8 (CC) e nº 9 (CC) nas condições 1 e 2 simultaneamente e as demais pontes somente na condição 1.

Também para 3ª condição de ensaio, não se conseguiu fazer o balanceamento simultâneo com a condição 1 o que proporcionaria a investigação da queda de tensão de alimentação nas pontes que trabalham ora com alimentação ora com realimentação.

As prováveis causas da impossibilidade de balanceamento simultâneo das condições 1, 2 e 1, 3 são: os cabos de conexão dos EREs para as diversas condições de ensaio não terem a mesma resistência, chaves com resistência diferentes, os EREs não terem a mesma resistência e para as pontes de frequência portadora pode-se acrescentar ainda os efeitos das capacitâncias e auto-indutâncias.

CAPÍTULO VIII

PROGRAMAÇÃO UTILIZADA E ENSAIOS REALIZADOS

8.1. INTRODUÇÃO

A automatização no presente trabalho não teve apenas o objetivo de facilitar a execução dos ensaios, mas, proporcionar a execução de estudos mais amplos com a utilização de diversos amplificadores e transdutores na cadeia de medição, limitados até pouco tempo, a capacidade de processamento manual de cada operador.

Por exemplo, neste trabalho as condições de contorno de cada ensaio são dadas por 5 condições, 8 aparelhos de medição e pode-se repetir a medição 15 vezes para a avaliação estatística, considerando a memória do computador. Assim resulta uma matriz de dados brutos $5 \times 8 \times 15 = 600$ valores de medições para um ensaio, o que seria praticamente impossível usando processamento manual.

Através da utilização do processamento automatizado dos dados, procurou-se obter inúmeras informações complementares. Estas informações trouxeram o conhecimento das características do banco de testes bem como da chave seletora, possibilitando para as próximas medições a elevação da precisão das medições por diminuição de erros aleatórios e compensação dos erros sistemáticos.

8.2. PROGRAMAS DE MEDIÇÃO E PROCESSAMENTO PRÉVIO

Para a operação com SAS computadorizados, é necessário a utilização de um pacote de programas e sub-programas para aquisição, controle e processamento dos dados de medição.

Neste trabalho foi usada a programação desenvolvida pelo LABMETRO [17], descrita a seguir:

Esses programas foram elaborados baseados na técnica do diálogo entre o terminal alfanumérico e o operador.

Através do terminal alfanumérico, o computador solicita textualmente ao operador dados específicos do ensaio como: pista da fita magnética a serem gravados os dados brutos, se o número de pesos utilizados é 7 ou 14, intervalo de medição, número de leituras do voltímetro digital, etc.

Outras informações importantes tais como: maneira pela qual as pontes amplificadoras e transdutores estão conectados ao sistema, quais as operações de chaveamento para a obtenção do sinal de medição, qual a seqüência de leitura dos transdutores, quais as operações de controle, modo de armazenagem e documentação dos dados brutos, quais as operações e parâmetros do processamento prévio, etc., foram definidas no início do programa.

Seguindo as instruções codificadas das matrizes de conexão, medição e processamento o computador desenvolve automaticamente o roteiro prescrito para a medição (figura 34*), fazendo a aquisição, controle e processamento prévio de dados. Todas essas informações são armazenadas em matrizes e gravadas em fita magnética.

Foram utilizados dois roteiros para medições de deformação. No primeiro, é chaveada a ponte amplificadora 3, na 1ª condição de ensaio, então são efetuadas 15 medições de deformação. Após é chaveada a ponte amplificadora 4 na 1ª condição de ensaio e são realizadas outras 15 medições de deformação. Assim a operação se repete para as demais pontes amplificadoras na 1ª condição. A seguir é chaveada novamente a ponte amplificadora 3, na 2ª condição de ensaio e assim a operação se repete sucessivamente para todos os instrumentos até a 5ª condição. O ohmímetro HP (instrumento 10) faz medições somente nas condições 1 e 3. Para concluir a primeira metade do ciclo de medição (ida) são feitas as medições de temperatura. Logo a seguir, é iniciada a segunda parte do ciclo de medição obedecendo a mesma seqüência da primeira, somente que a medição dos pontos são tomados na ordem decrescente como mostra a figura 34a*.

No segundo roteiro de medição, figura 34b*, são utilizados para o 1º ponto, medições com todos os instrumentos (de 3 a 10) para a 1ª condição de ensaio; a seguir para 2ª condição de

ensaio, e assim sucessivamente até a 5ª condição (exceto o instrumento 10, que faz medições na 1ª e na 3ª condição), para após iniciar as medições do 2º ponto e repetir todas as operações do primeiro.

Após realizada as medições do 15º ponto, para as 5 condições de ensaio, são feitas as medições de temperatura e a primeira parte do ciclo de medição está concluída. Agora, repete-se a mesma seqüência na ordem decrescente dos pontos de medição e obtêm-se os pontos da volta, concluindo um ciclo de medição.

O processamento e a documentação dos dados também são obtidos seguindo um roteiro codificado. Os dados são analisados por rotinas matemáticas e estatísticas, rotinas especiais de correlação, etc. Podendo serem em seguida documentados, compondo-se tabelas, gráficos, conforme definição do operador.

8.3. POSSIBILIDADES DA AVALIAÇÃO

Este pacote de programas é utilizado para avaliação de valores de medição correspondente a 1 grandeza de medição (por exemplo, temperatura da viga), 1 objeto de ensaio (por exemplo, escolha da ponte amplificadora 8) e 15 medições; permite calcular a reta ajustada de ida e de volta pelo método dos mínimos quadrados [18], desvio padrão de cada ponto para vários ciclos de medição, pontos de máximos valores de erros (positivos e negativos) e pontos de máximos valores de histerese (positivos e negativos).

A figura 35 mostra algumas etapas da apresentação dos resultados, para 15 medições com 3 ciclos de repetição, usando a ponte amplificadora 8 (MG 3120 A). Neste gráfico está representada a condição de ensaio (4).

Na figura 35a está mostrado a curva real de medição e sua reta ajustada de ida (eixo x), também são indicados os pontos de máximos valores de erro.

A curva real de medição e a reta ajustada foram deslocadas, posicionando-se sobre o eixo central.

Para a execução deste artifício geométrico, determina-se analiticamente, a equação da reta ajustada na forma:

$$y = (PV) + (INCL) \cdot x$$

Utilizando-se os valores de "PV" (coeficiente linear da reta) e "INCL" (coeficiente angular da reta), leva-se a reta ajustada a coincidir com o eixo central, na forma da figura 36a; nela a curva real é deslocada linearmente de "PV" e angularmente de "INCL", mantendo-se a diferença entre a curva real e reta ajustada quando transportada para a nova posição.

A curva de volta também é deslocada, somente que neste caso, é calculada a diferença entre as duas curvas (ida e volta) mantendo-se a diferença entre elas no processo de transporte das curvas. A figura 36b, mostra a mesma curva real e a reta ajustada da figura 36a, somente representada de outra maneira, onde o movimento de ida está deslocado para o eixo central, enquanto que o movimento de volta indica a diferença entre as curvas de ida e volta, com os pontos do movimento de volta, plotados na ordem decrescente.

A figura 35b, mostra a curva de ida e volta com as respectivas retas ajustadas, além dos pontos de máximos valores de erros e pontos de máximos valores de histerese (na parte inferior do gráfico).

A figura 35c, mostra a curva real de medição (ida) com sua reta ajustada, juntamente com o desvio padrão de cada ponto de medição calculado segundo |18|. As duas curvas que envolvem a curva real representam o desvio padrão, sendo que, para obter o valor do desvio basta subtrair o valor da curva de contorno da curva central (real), em cada posição.

Os três gráficos da figura 35 apresentados separadamente podem ser executados em um único.

Quando um ensaio é executado sob certas condições, pode-se fazer a avaliação (avaliação total) correspondente a evolução do ensaio. No caso de mudanças destas condições, por exemplo parâmetros de ensaio, armazenam-se os resultados particulares de cada ensaio em fita magnética.

Vários sub-programas permitem a análise comparativa dos resultados e investigações mais amplas de diversos ensaios executados sob condições diferentes, entre os quais destacam-se:

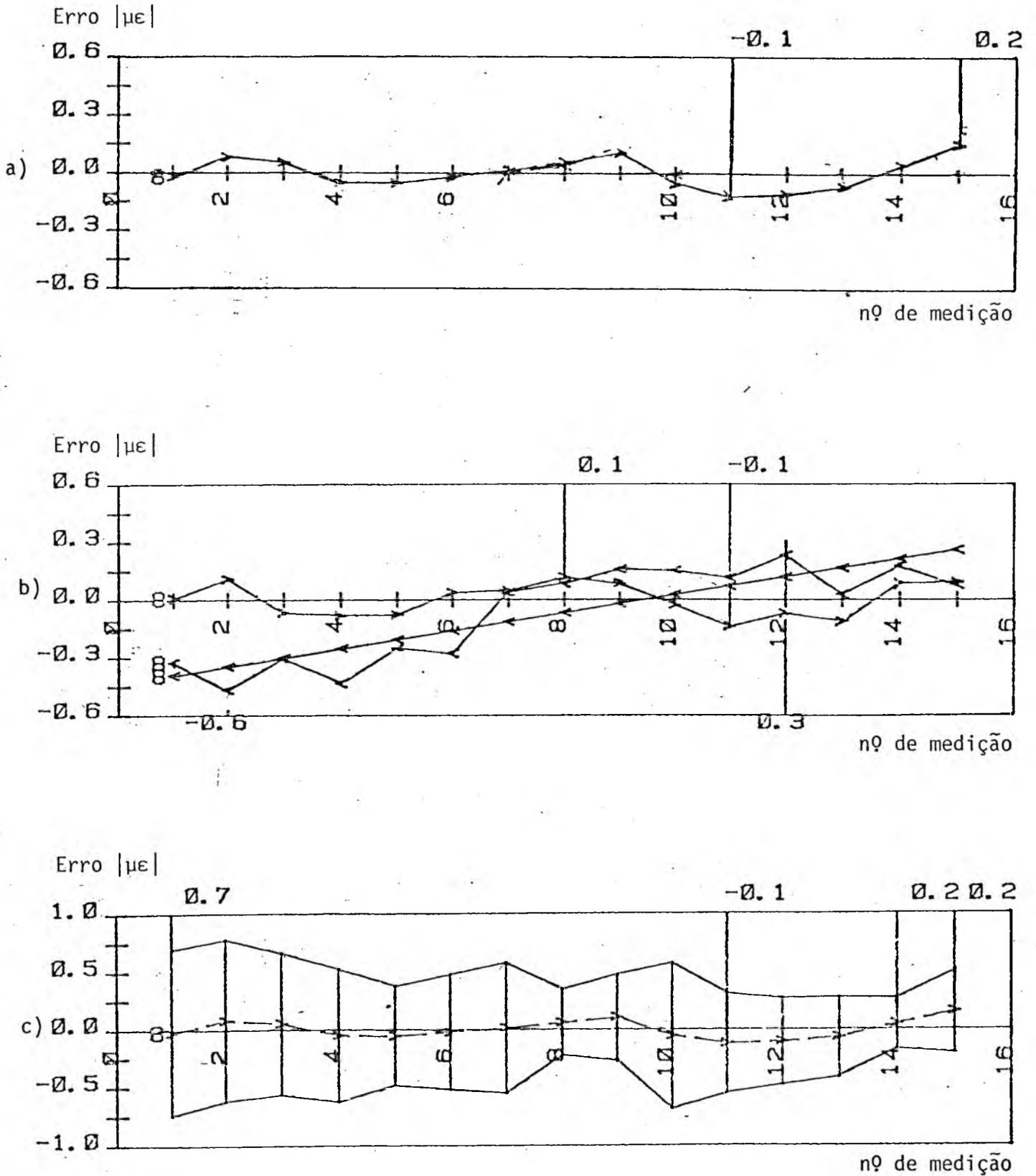


Figura 35 - Exemplo das possibilidades de avaliação de um ensaio particular.

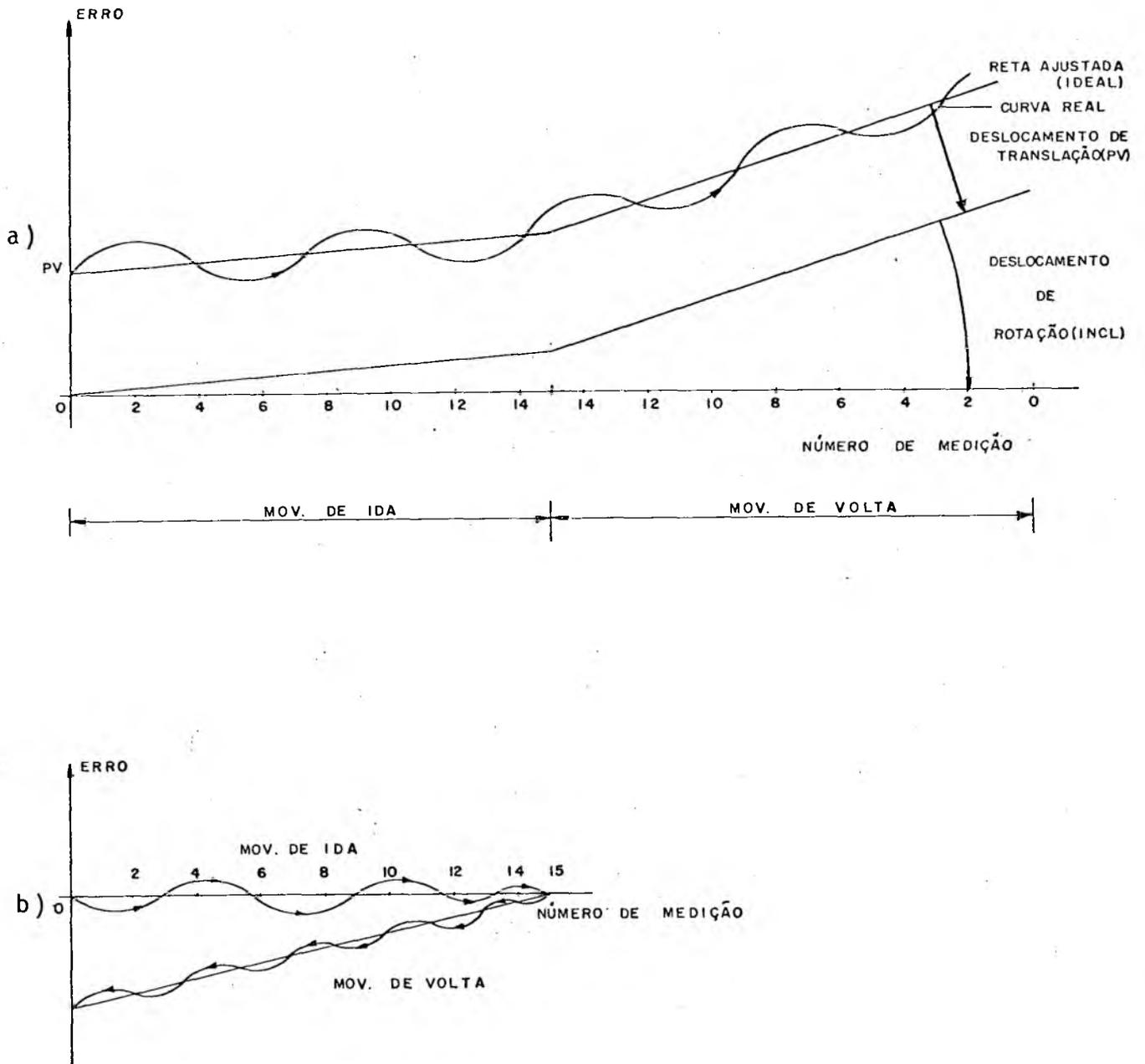


Figura 36 - Esquema da localização da reta ajustada de ida sobre o eixo central e da nova localização da reta ajustada de volta.

19) AVALIAÇÃO TOTAL DE IDA E VOLTA:

Este programa reúne os resultados da "INCL" de vários ensaios particulares e calcula a regressão dos mesmos (ida e volta), obtendo-se assim, um novo valor de "INCL" e "PV" da evolução do teste. O mesmo pode ser feito para os valores de "PV" dos ensaios particulares e também obter um novo valor de "INCL" e "PV" relativo a evolução do teste.

Os resultados obtidos permitem avaliações sobre flutuação do zero da ponte, tensões termoelétricas, etc. Assim, é dado, por exemplo, o erro como coeficiente linear da reta, enquanto a inclinação da reta descreve, por exemplo, uma variação da temperatura da viga com o decorrer das medições.

Na figura 37 tem-se um exemplo esquemático da avaliação total da evolução de um teste em função da temperatura da viga. Assim, para cada ensaio particular tem-se um PV e uma INCL; plotando-se de uma vez somente os PV ou as INCL tem-se um gráfico de erro em função da temperatura da evolução do teste, e obtém-se um novo valor de PV e INCL, indicando assim um resultado resumido da evolução do teste.

29) AVALIAÇÃO TOTAL DE IDA E VOLTA - MÁXIMOS E MÍNIMOS:

Neste programa são calculados a partir dos pontos de máximo valor, de cada ensaio particular, a regressão ("INCL" e "PV") permitindo uma análise mais geral da evolução do teste. Também o mesmo pode ser feito para os pontos de mínimo valor; assim, o resultado indica a faixa máxima ou mínima de erro do teste.

Na figura 38 é apresentado como exemplo, o gráfico de máximos e mínimos valores (ida) de 15 medições por vez, para várias pontes amplificadoras, na condição (1), com o intervalo de medição variável de 1 a 800 ms.

39) AVALIAÇÃO TOTAL DE IDA E VOLTA - DESVIO PADRÃO:

Neste programa são reunidos os valores dos desvios padrão de cada ensaio particular e é calculada a regressão (ida e

volta) apresentando os resultados em função da "INCL" e "PV".

Este programa permite analisar o teste em função dos erros aleatórios.

Um exemplo da aplicação desse programa está mostrado na figura 39, onde são apresentados os resultados resumidos do desvio padrão do ensaio da figura 38.

8.4. ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios realizados tiveram as seguintes características: foi usada a viga com carregamento constante, portanto as medições foram flutuação de deformações, com o cabo A (quadro da pag. 49) de 7 fios, blindado, de boas qualidades mecânicas para conexão ao ERE.

Como principais parâmetros de ensaios, foram variados:

- intervalo de medição;
- número de leituras do voltímetro (DVM);
- tempo de observação;
- tempo de pré-aquecimento do ERE;
- temperatura da viga.

A ordem de apresentação dos parâmetros de ensaios que foram variados, obedeceu a seqüência da realização dos ensaios, sendo os 3 últimos parâmetros os mais importantes para esse trabalho; também os resultados obedecerão essa mesma seqüência. Isso deve-se a utilização nos ensaios de uma chave seletora de construção própria, que exigiu o levantamento de algumas de suas características para aplicação na AET.

Como os ensaios foram realizados com carregamento constante, o conceito de histerese segundo o ítem 5.7, não pode ser caracterizado, já que não existe um ciclo de carregamento e descarregamento e sim um ensaio em duas etapas (15 medições de ida e 15 medições de volta). Portanto, na apresentação dos resultados foi usado o termo histerese, embora se saiba que não é o correto.

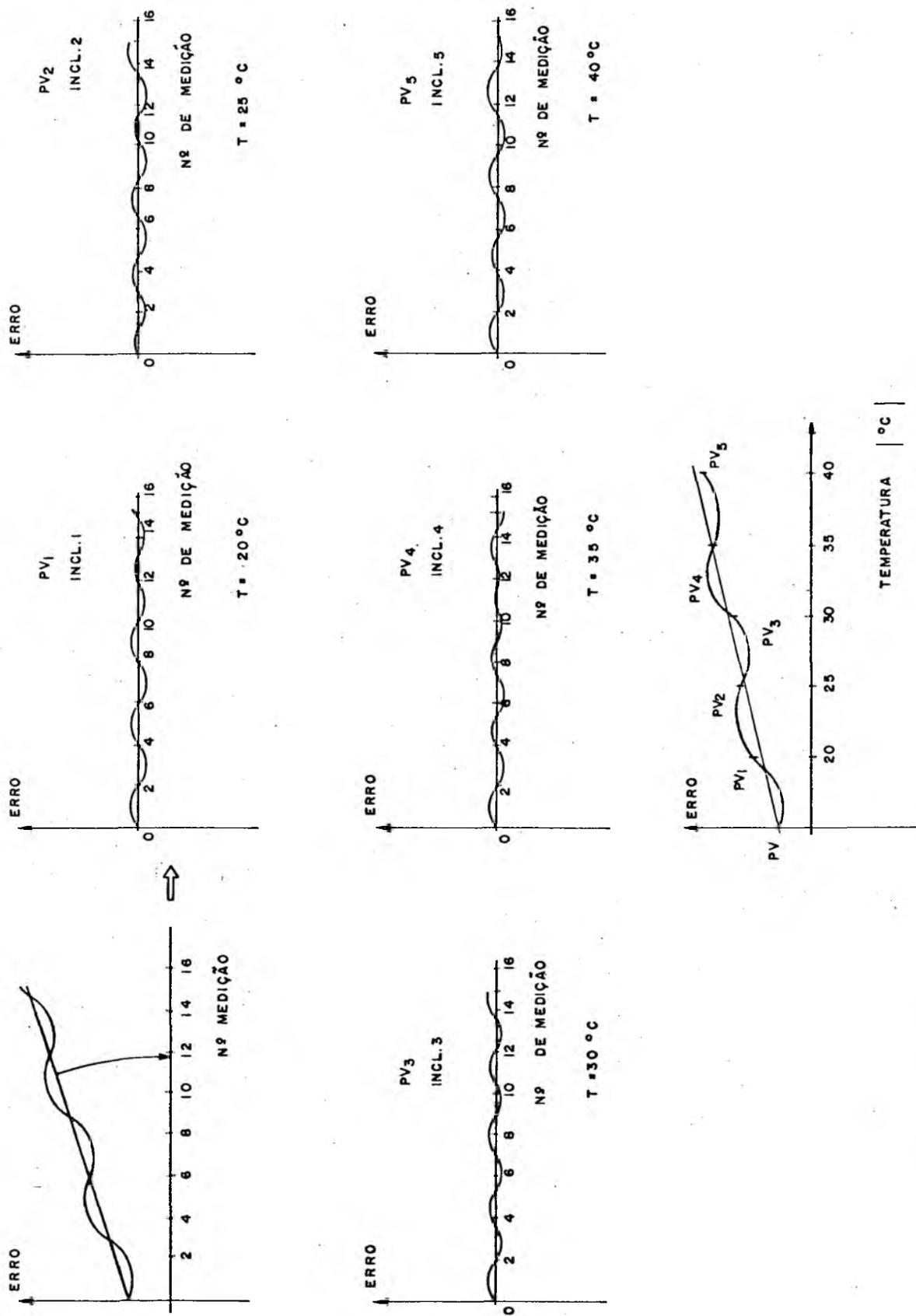


Figura 37 - Exemplo esquemático da avaliação da evolução da evolução de um ensaio em função de "PV".

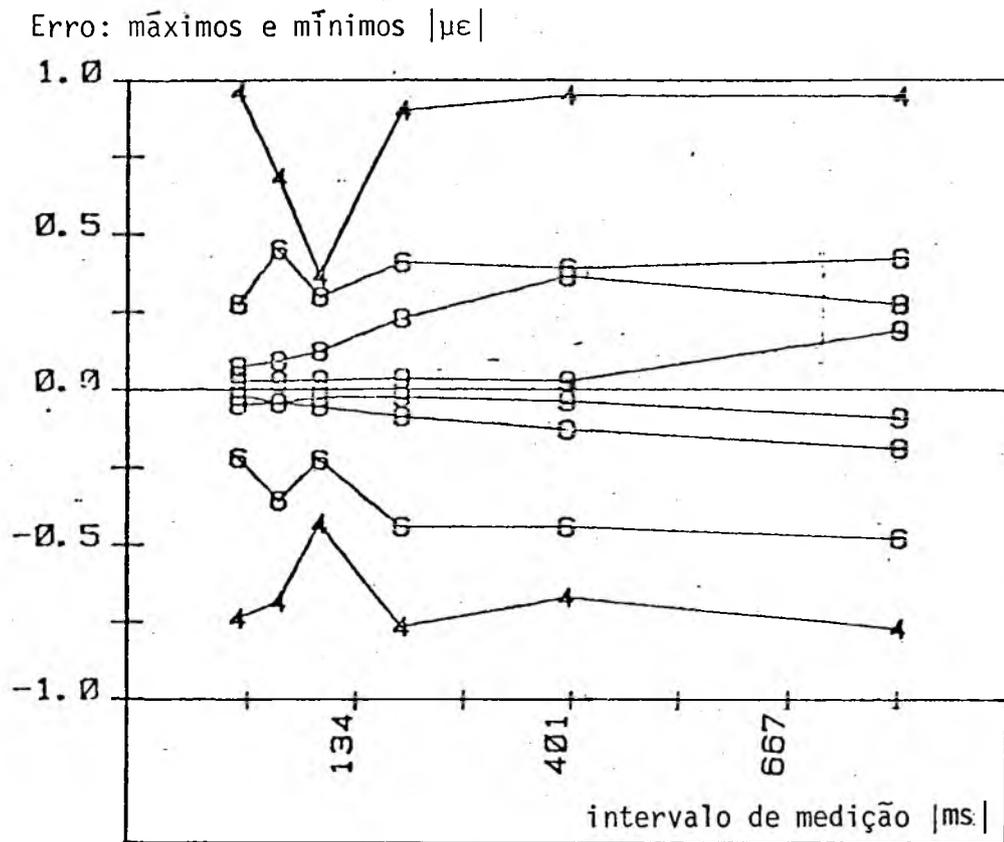


Figura 38 - Exemplo de avaliação (máximo e mínimo) da evolução de um ensaio.

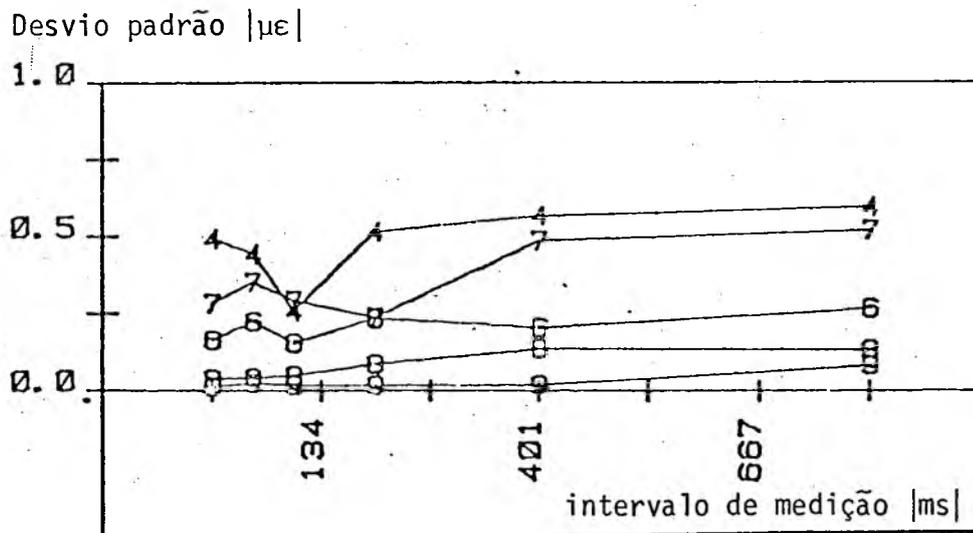


Figura 39 - Exemplo de avaliação (desvio padrão) da evolução de um ensaio.

CAPÍTULO IX

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo está apresentado o resumo dos resultados obtidos nesse trabalho. Para melhor compreensão do texto, os resultados e análises comparativas, são apresentados juntamente, em razão dos resultados estarem em forma de gráficos.

Os resultados estão divididos basicamente em duas etapas:

- 1º) Resultados em função da chave seletora;
- 2º) Resultados em função do sistema de medição.

9.1. RESULTADOS EM FUNÇÃO DA CHAVE SELETORA

O ideal de uma medição de deformação com EREs, seria sem o uso de chaves, devido aos erros introduzidos na cadeia de medição pelas mesmas, mas, principalmente em medições de múltiplos pontos, exigem a sua utilização.

9.1.1. RESULTADOS DEPENDENTES DO CHAVEAMENTO NA MEDIÇÃO

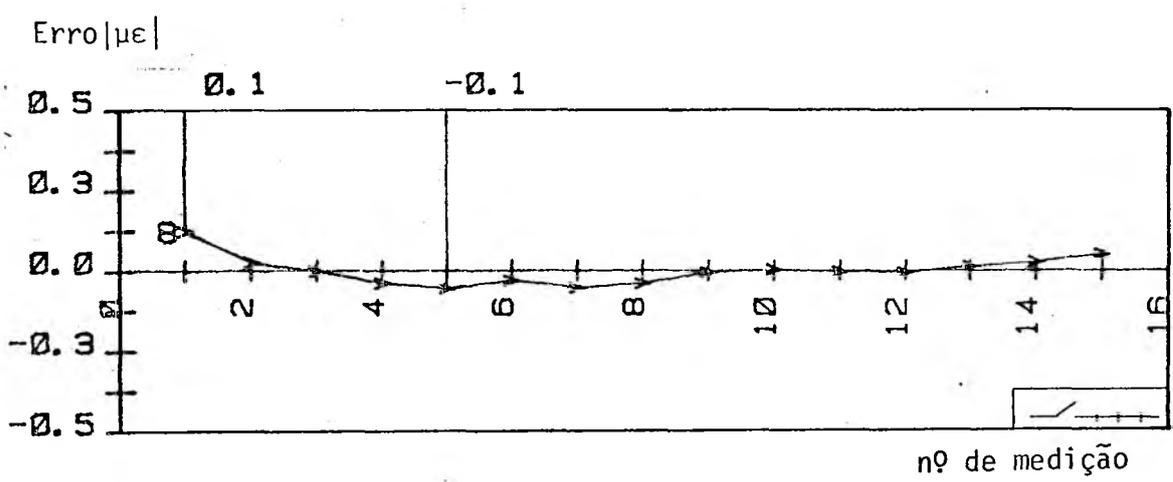
Para verificação da influência do chaveamento na medição de deformação com EREs, foram realizados dois tipos de testes, da seguinte maneira:

- 1º) Com chaveamento antes da primeira medição (—/++++), conforme roteiro da figura 34a*.
- 2º) Com chaveamento antes de cada medição (—/—/—/—), conforme roteiro da figura 34b*.

Na figura 40 são apresentados os resultados, de 15 medições de flutuação de deformação de cada vez. Foi usada uma ponte amplificadora tipo CC, nº 8, como aparelho de medição.

No caso da figura 40a, foram fechadas todas as chaves antes de efetuar a medição do primeiro ponto, e depois somente foram lidas as tensões na saída do amplificador, em intervalos de tempo de 100 ms.

a) Com chaveamento antes da primeira medição.



b) Com chaveamento antes de cada medição.

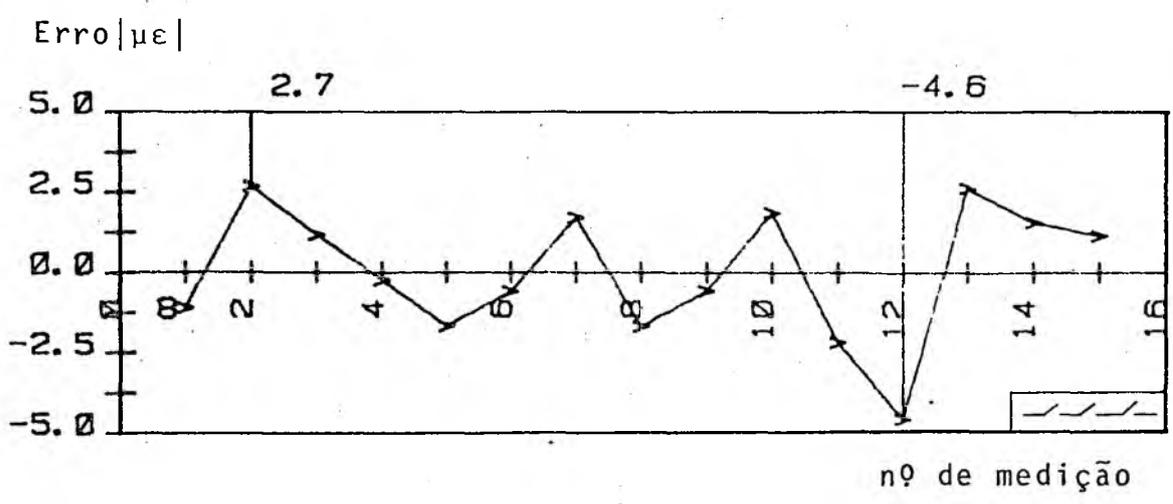
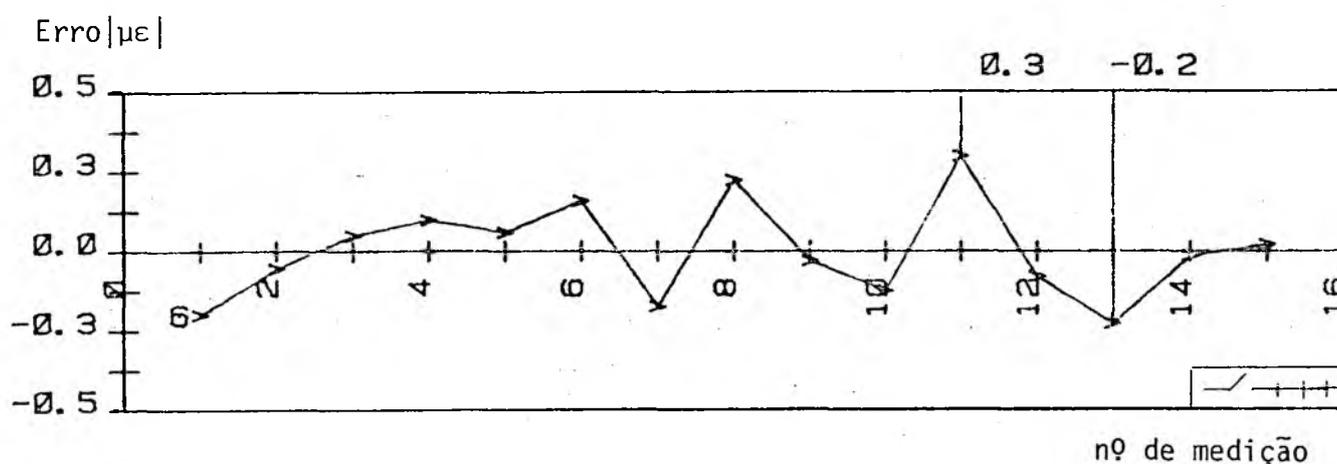


Figura 40 - Influência do chaveamento na medição de flutuação de deformação com uma ponte amplificadora tipo CC.

No caso da figura 40b, foram abertas, e de novo fechadas todas as chaves após cada leitura. Neste caso pode-se perceber nitidamente (fator de escala é 10 vezes maior), uma variação maior dos valores lidos. Isto deve ter surgido, basicamente, das mudanças de resistência das chaves.

Nas figuras 41 e 42, também são apresentados os resultados de 15 medições de flutuação de deformação de cada vez, somente que os instrumentos de medição foram: ponte amplificadora de frequência portadora de 5 KHz e o ohmímetro HP, respectivamente.

a) Com chaveamento antes da primeira medição.



b) Com chaveamento antes de cada medição.

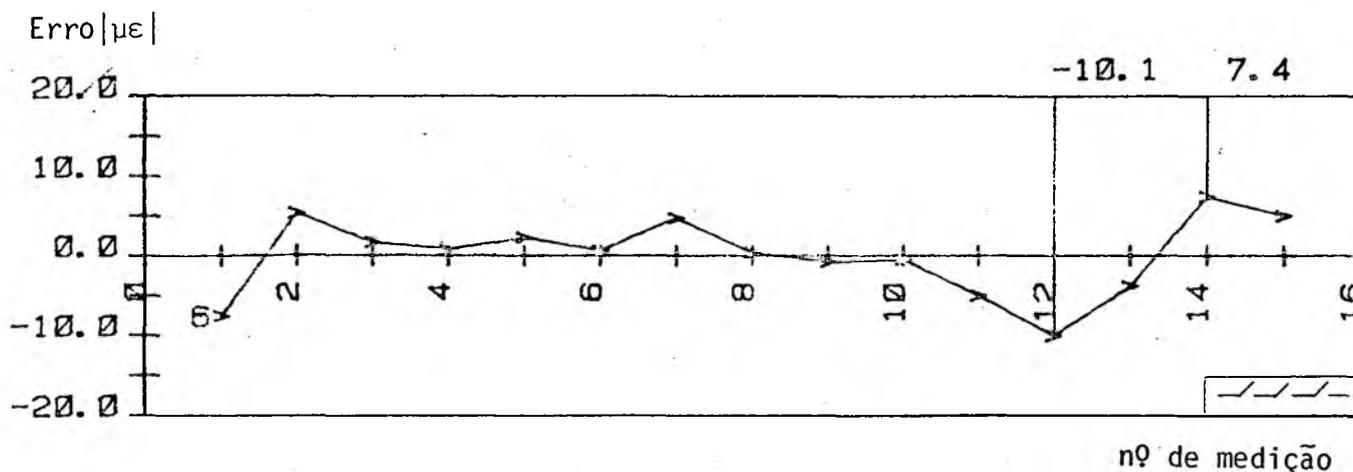
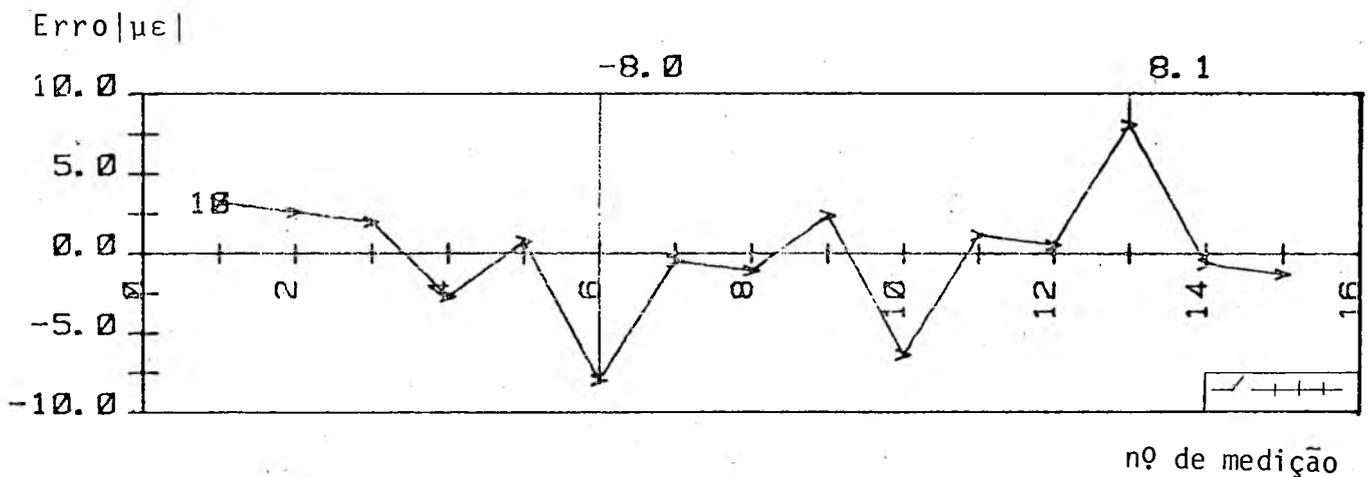


Figura 41 - Influência do chaveamento na medição de flutuação de deformação com uma ponte amplificadora de frequência portadora.

Observando as figuras 40a, 41a e 42a, nota-se, que mesmo utilizando-se chaveamento somente antes da primeira medição, os erros aleatórios apresentados pelo ohmímetro da HP são significativos ($8 \mu\epsilon$), considerando que a medição é de flutuação de deformação. Também para esse mesmo caso a ponte amplificadora de frequência portadora apresenta erros aleatórios superiores a ponte de corrente contínua. Torna-se mais crítico ainda, quando é usado o chaveamento antes de cada medição, figuras 40b, 41b e 42b. O ohmímetro HP apresenta erros aleatórios da ordem de $100 \mu\epsilon$, sendo seguido pela ponte de frequência portadora ($10 \mu\epsilon$) e ponte de corrente contínua ($5 \mu\epsilon$).

a) Com chaveamento antes da primeira medição.



b) Com chaveamento antes de cada medição.

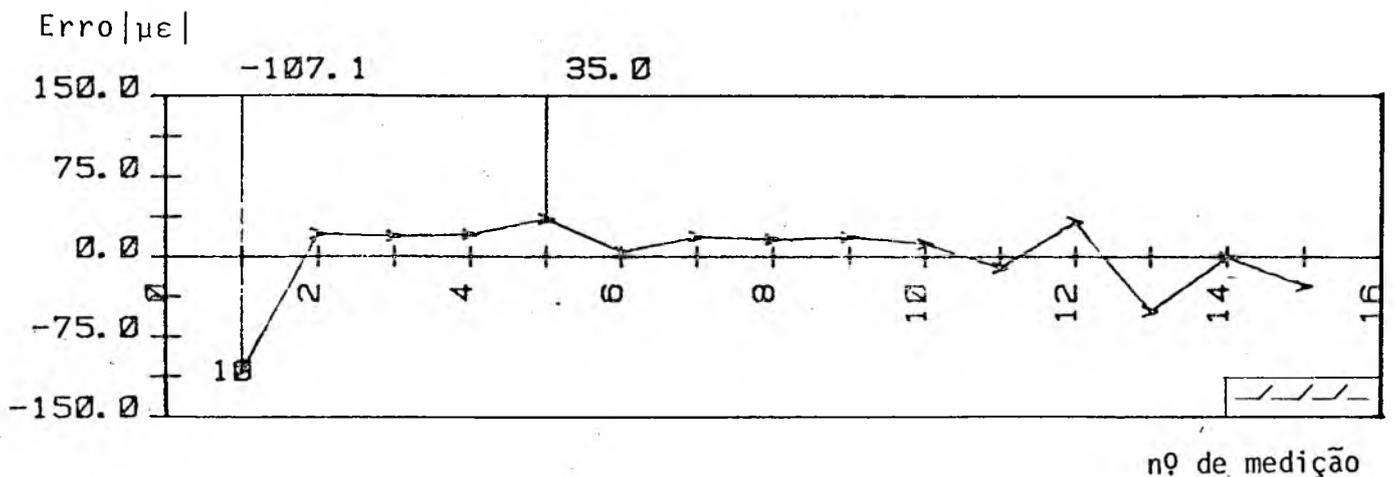


Figura 42 - Influência do chaveamento na medição de flutuação de deformação com um ohmímetro HP.

Lembrando, que para simular uma medição de campo, é necessário que o sinal de entrada (carregamentos) seja variável com o número de medição, o que exige o uso de chaveamento antes de cada medição. Pelos resultados apresentados pelo ohmímetro da HP e também pelas pontes de frequência portadora, em menor intensidade, esse banco de teste não seria o ideal para análise de fonte de erros, em cadeia de medição de deformação com EREs e carregamento variável, utilizando esses instrumentos.

É de se esperar, que esses erros não se originem somente de mudanças de resistências das chaves, mas também de vibrações ambientais e falta de repetibilidade do sistema de medição.

Como ohmímetro mede resistência diretamente, é provável que a mudança da resistência das chaves, aliada a mudança de resistência do ERE devido ao aquecimento, em razão do grande número de medições realizadas ininterruptamente, sejam os fatores determinantes do elevado erro.

As pontes amplificadoras de frequência portadora, apresentaram erros mais elevados que as pontes amplificadoras tipo CC, quando chaveadas antes de cada medição, provavelmente devido a perturbações como: desequilíbrio das capacitâncias devido a temperatura, variação de resistência das chaves, etc., que fazem as pontes de frequência portadora elevada (5 KHz), apresentar praticamente o dobro de erros das pontes de corrente contínua (figura 40b e 41b).

9.1.2. RESULTADOS DEPENDENTES DO INTERVALO DE MEDIÇÃO

Para encontrar o tempo entre uma medição e outra (intervalo de medição) mais adequado, para cada instrumento de medição foram realizados 6 ensaios particulares com os tempos entre uma medição e outra variáveis, de 1 a 800 ms, versus flutuação de deformação. Os ensaios foram realizados com chaveamento antes da primeira medição.

Nas figuras 43 e 44, tem-se a avaliação total da

evolução do teste. Em 43a observa-se, o menor desvio padrão para tempo de 100 ms. Em 43b tem-se o gráfico dos máximos e mínimos valores lidos, que mostram com maior clareza a tendência dos instrumentos nº 4, 6, 7, 8 e 9, pelo tempo de 100 ms.

Os demais instrumentos estão mostrados na figura 44. A ponte amplificadora nº 5, (figura 44a), de frequência portadora, apresenta uma diminuição do desvio padrão com o aumento do intervalo de medição; o mesmo acontece para os máximos e mínimos valores (figura 44b); assim os valores apresentados pela ponte amplificadora nº 5 em ambos os gráficos, são bem superiores aos resultados das outras pontes, indicando problemas perturbadores; que são causados por problemas dinâmicos de amplificação, já que a ponte tem frequência limite baixa.

Também os instrumentos nº 3 e 10, (figura 44), apresentaram valores de desvio padrão bem superior a média, sendo confirmado pelo gráfico 44b. A ponte nº 3 é de balanceamento nulo, o qual não é adequado para o uso em sistemas de medição automatizado.

Na figura 45, são apresentados os resultados de 15 medições de flutuação de deformação de cada vez utilizando o chaveamento antes da primeira medição. Foi usada uma ponte amplificadora, com uma frequência limite baixa (225 Hz), nº 5, como instrumento de medição. O tempo entre uma medição e outra foi variado. Foram realizados 4 ensaios com os tempos de 50, 100, 200 e 400 ms.

No início da medição, pode-se ver claramente (figura 45a) a perturbação do sinal de medição, devido as características dinâmicas do amplificador. A seqüência das figuras mostra a redução da perturbação com o aumento do intervalo de medição, estabilizando-se em 400 ms.

Assim, quando usa-se chaves seletoras rápidas, tem-se que harmonizar o intervalo de medição ao tempo de acomodação dos amplificadores.

As figuras 46 e 47, apresentam os resultados particulares de uma medição sob as mesmas condições das apresentadas na figura 44, apenas, que agora com o uso do ohmímetro com a ligação de 4 e 2 fios, respectivamente. Ambas ligações apresentam maior erro, para o tempo entre uma medição e outra (intervalo de medição) de 100 ms (figura 46b e 47b); exceto para o tempo de 50 ms, a dimi-

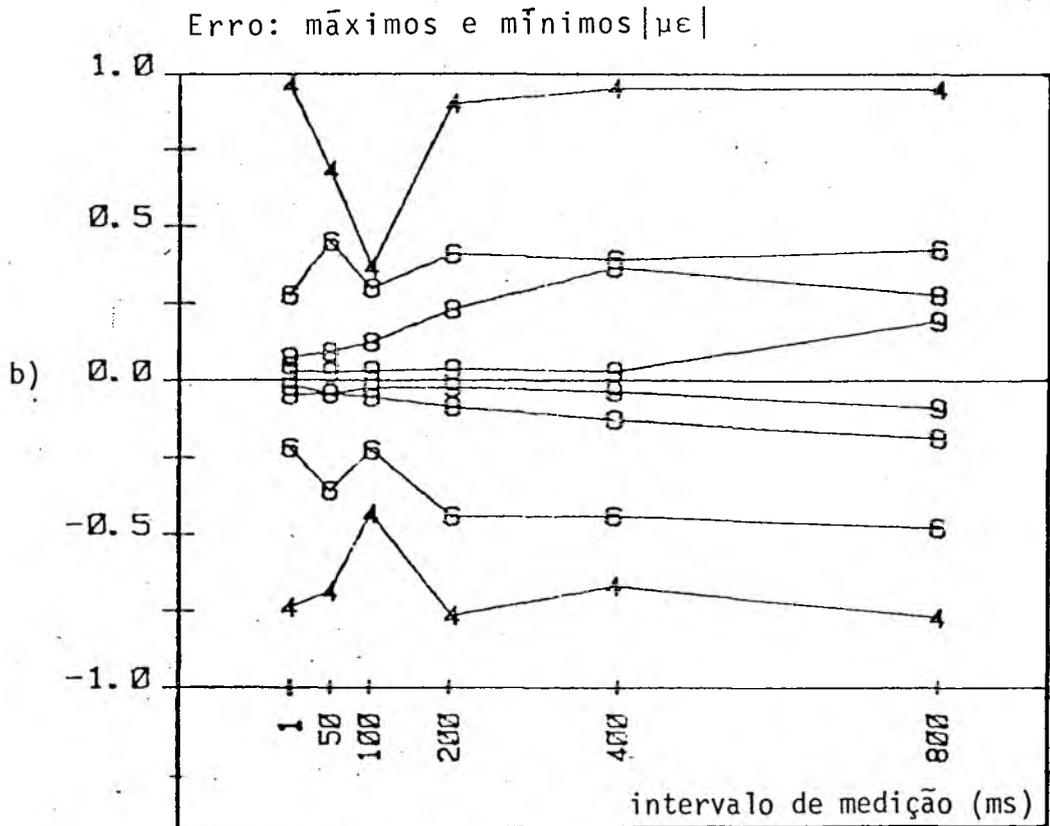
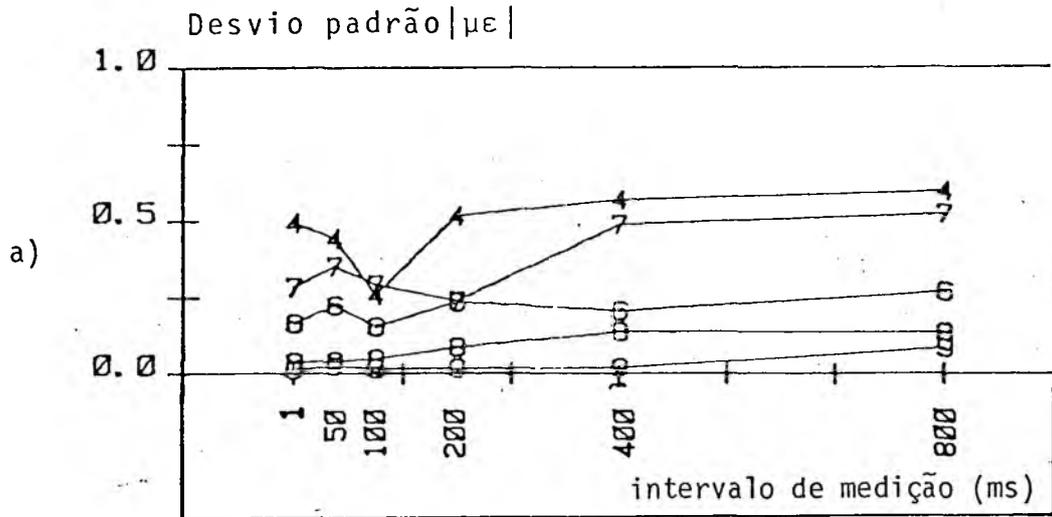


Figura 43 - Influência do chaveamento dependente do intervalo de medição.

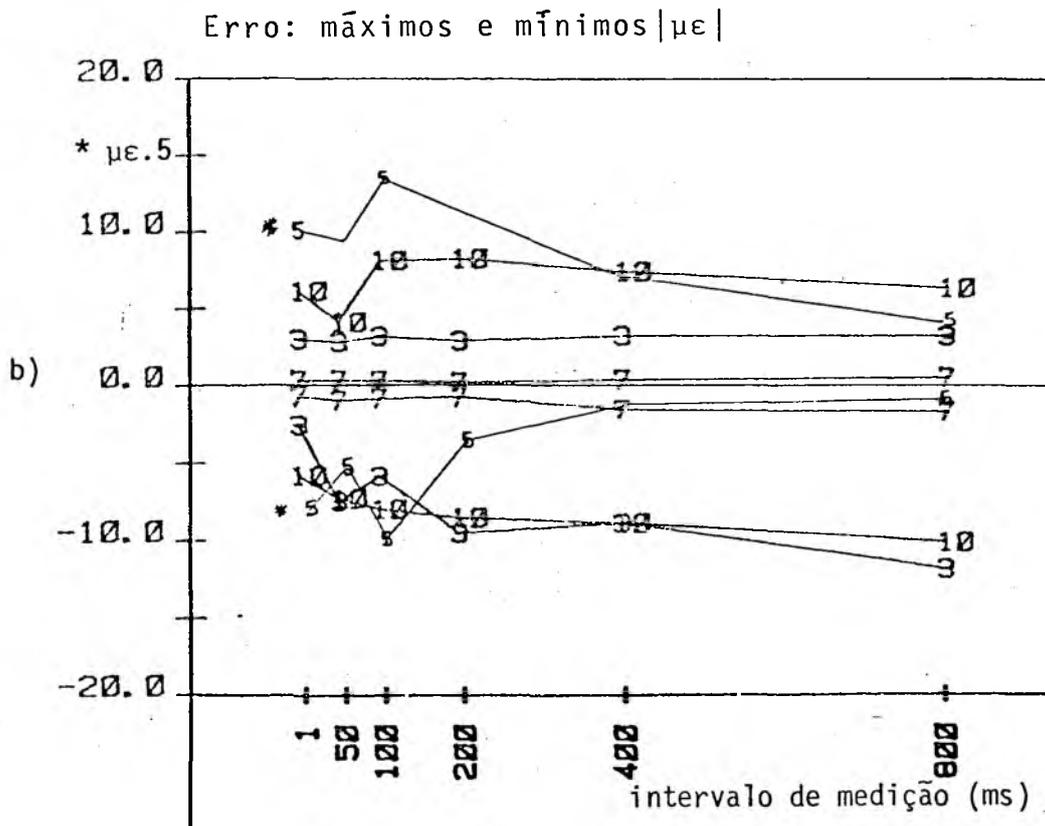
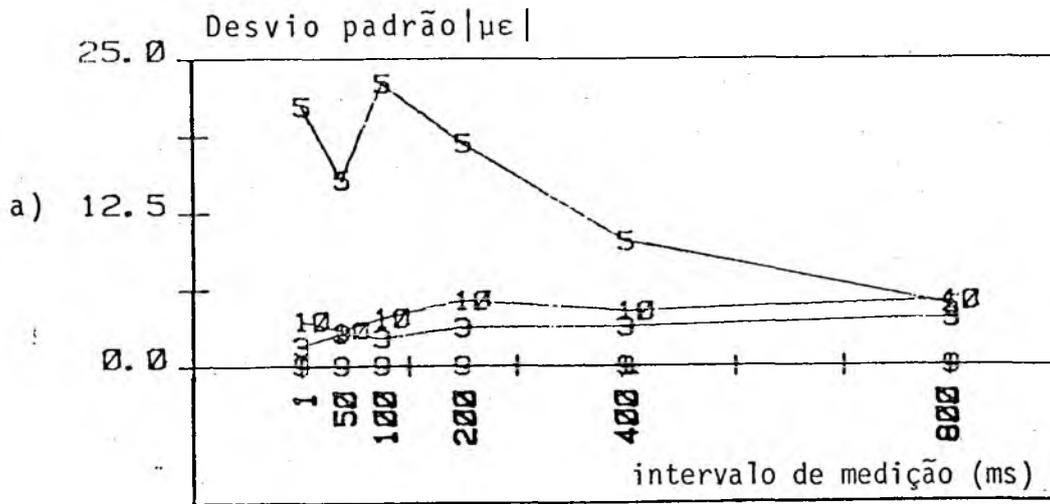


Figura 44 - Influência do chaveamento dependente do intervalo de medição.

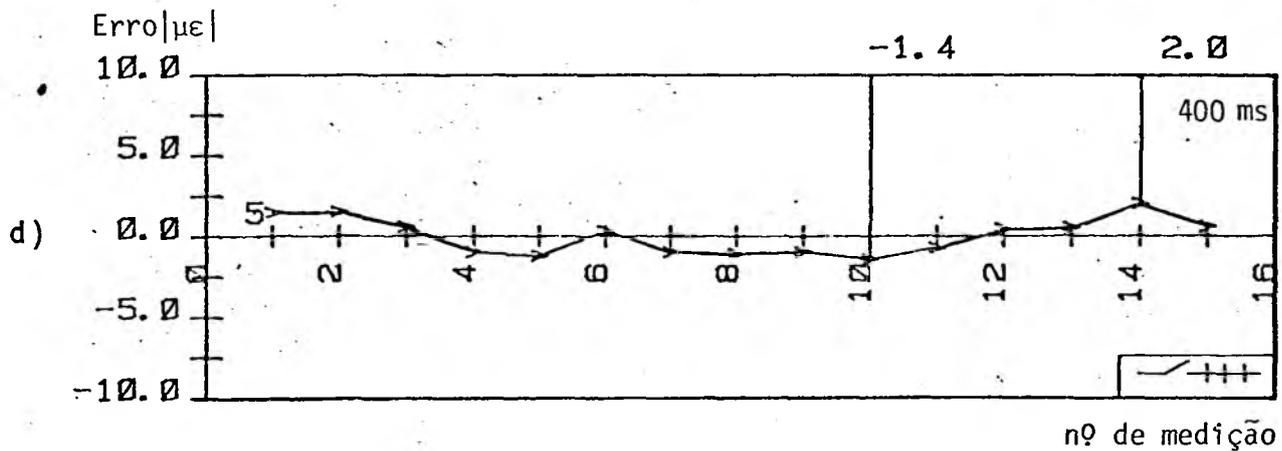
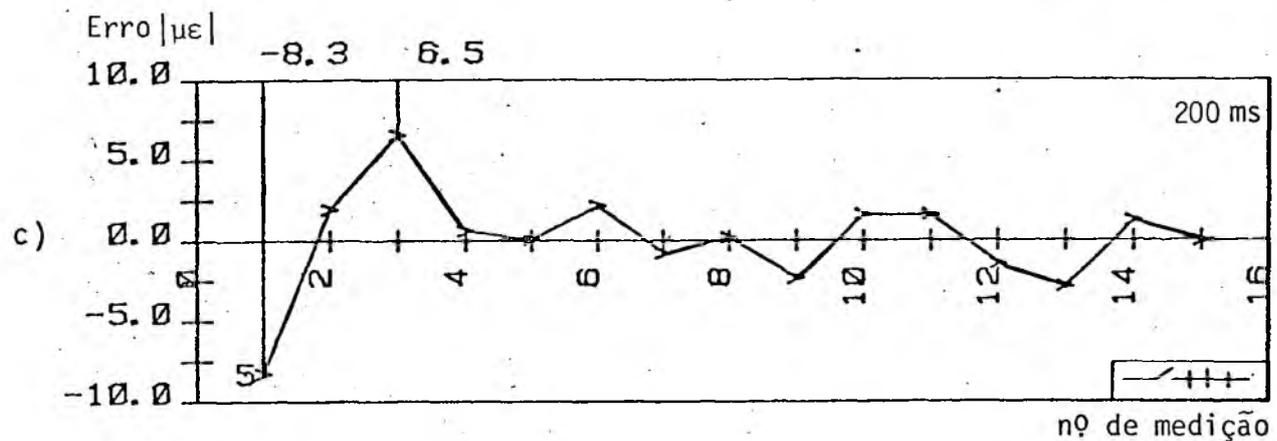
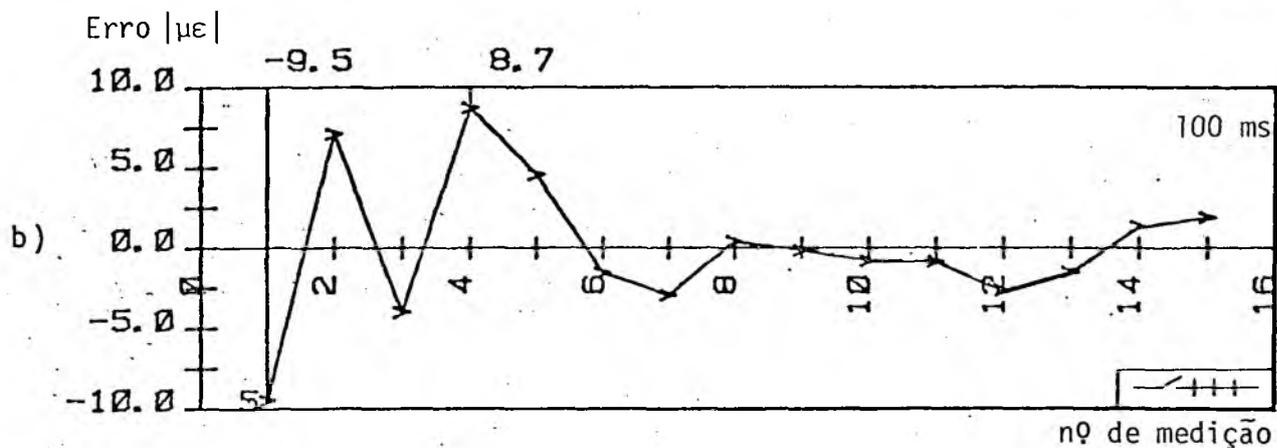
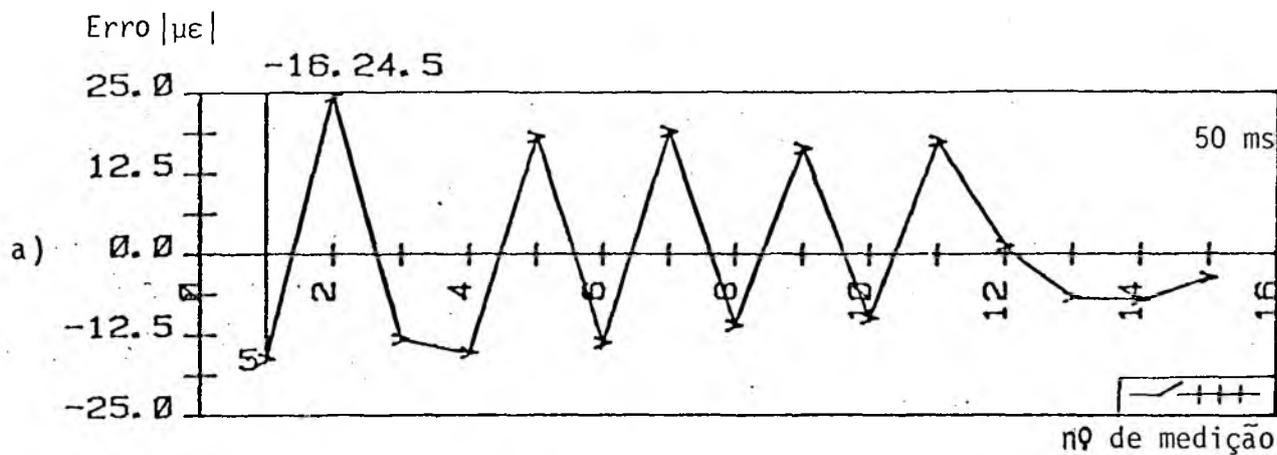


Figura 45 - Resultado dependente do intervalo de medição, na ponte de frequência portadora de 225 Hz.

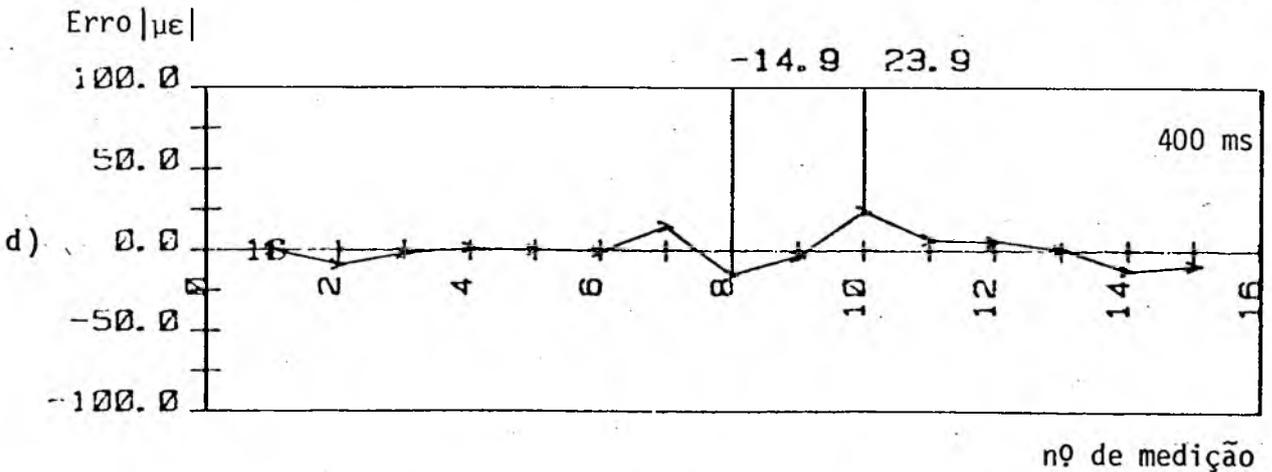
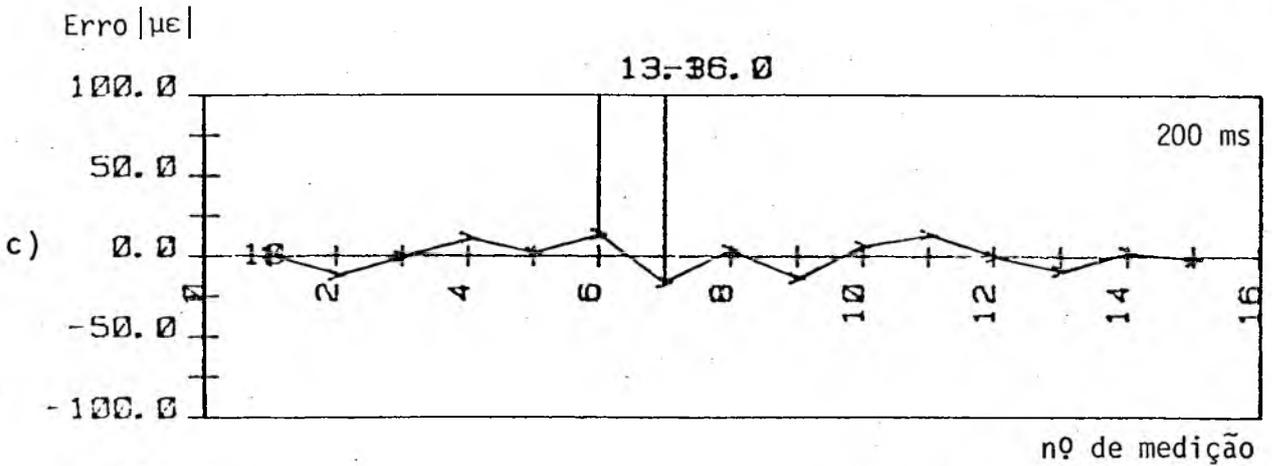
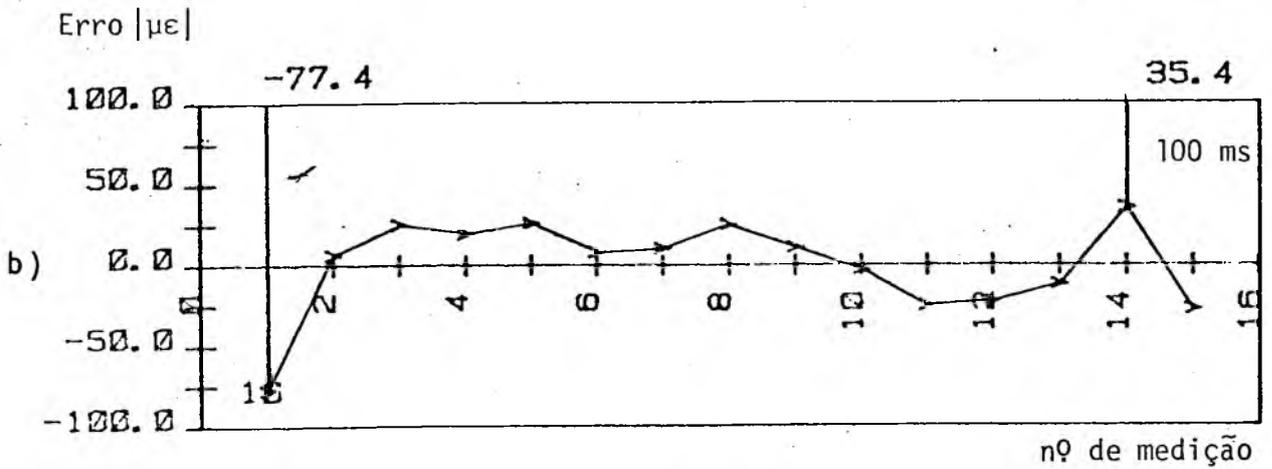
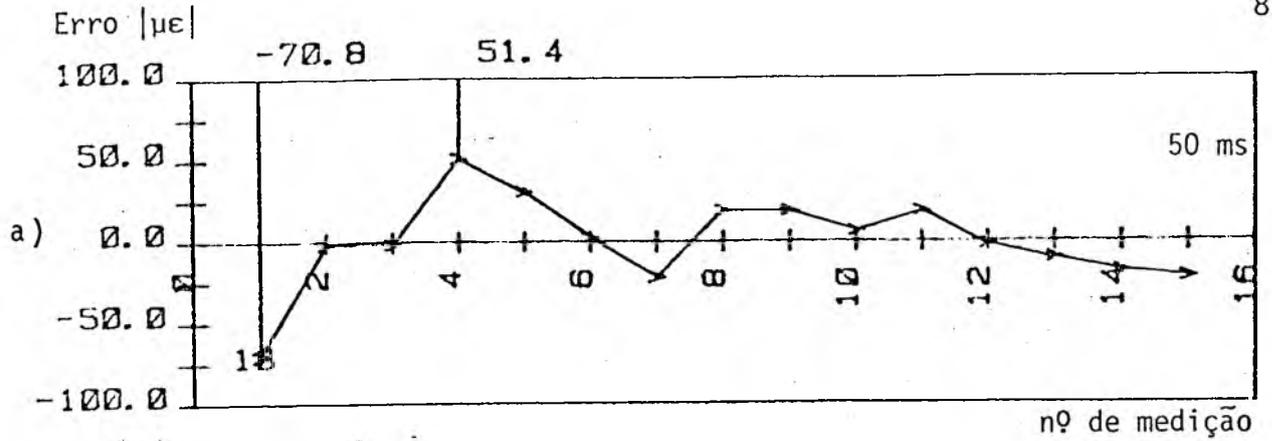


Figura 46 - Resultado dependente do intervalo de medição no ohmímetro da HP (4 fios).

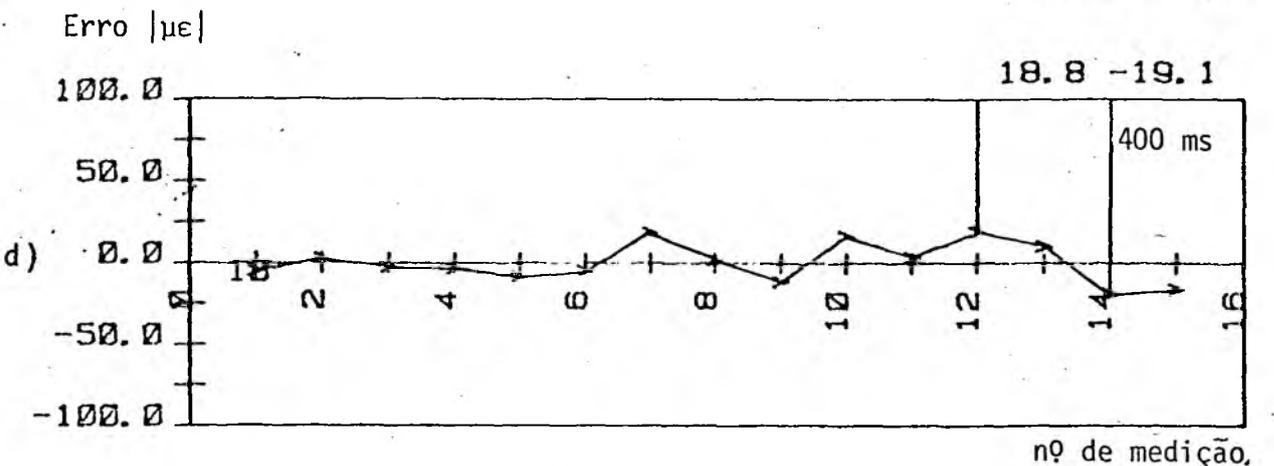
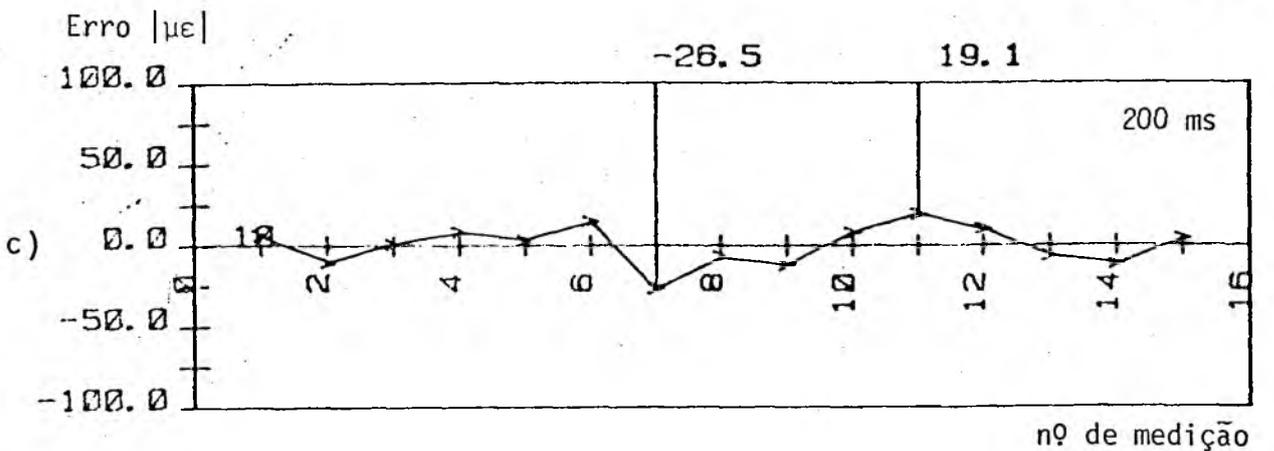
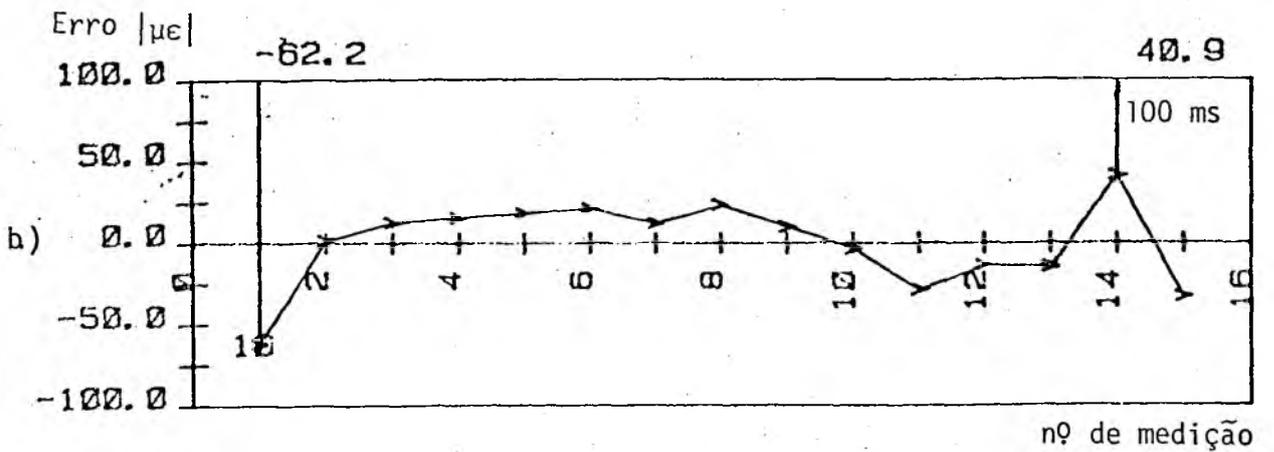
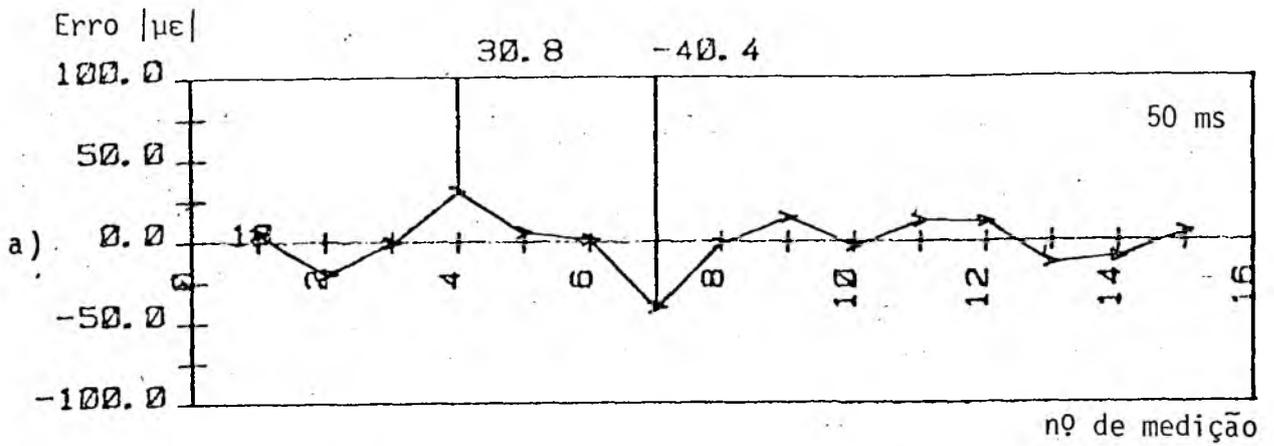


Figura 47 - Resultado dependente do intervalo de medição com ohmímetro da HP (2 fios).

nuição do erro coincide com o aumento de intervalo de medição tanto para ligação de 4 como de 2 fios, estabilizando em 400 ms.

No caso de 4 fios, o erro apresentado é $\sim 25 \mu\epsilon$ para 400 ms e $\sim 77 \mu\epsilon$ para 100 ms, ou seja, aproximadamente 3 vezes menor. O mesmo ocorre para 2 fios, onde tem-se erro de $\sim 20 \mu\epsilon$ para 400 ms e $\sim 60 \mu\epsilon$ para 100 ms, também 3 vezes menor.

Portanto, obteve-se os menores erros com os seguintes intervalos de medição:

- instrumentos nº 4,6,7,8 e 9 = 100 ms;
- nº 3,5 e 10 = 400 ms.

Assim, para os demais ensaios foram utilizados esses intervalos de medição.

9.1.3. RESULTADOS DEPENDENTES DO Nº DE LEITURAS DO VOLTÍMETRO

Na figura 48, estão apresentados os resultados obtidos na medição de flutuação de deformação, com intervalos de medição conforme item 9.1.2., variando-se o número de leituras do voltímetro digital (DVM). Para medição, o voltímetro faz uma série de leituras, o computador armazena na sua memória e indica o valor médio lido.

Em 48a, observa-se um aumento dos máximos valores até 4 leituras, para os instrumentos nº 4,6,7,8 e 9 caindo levemente e mantendo-se com pequenas mudanças até 16 leituras, exceto a ponte 4, que se mantém estável, a partir de 4 leituras.

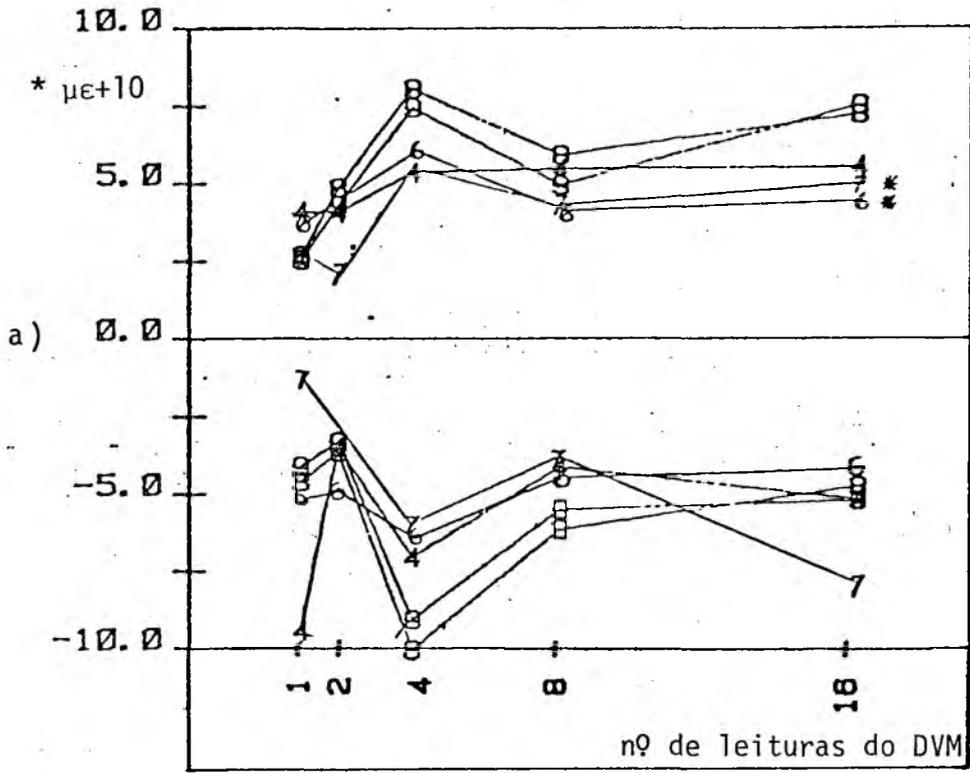
Os mínimos valores também aumentam até 4 leituras, para depois cair gradativamente até o final; exceto as pontes nº 4 e 7. Os resultados dos demais instrumentos estão mostrados na figura 48b.

O gráfico da figura 48, apresenta as seguintes faixas de erros:

- instrumentos nº 4, 8 e 9 $\pm 10 \mu\epsilon$
- instrumentos nº 6 e 7 $\pm 15 \mu\epsilon$
- instrumentos nº 3 e 5 $\pm 50 \mu\epsilon$
- instrumento nº 10 $\pm 100 \mu\epsilon$

Como pode-se observar, os resultados dependentes do número de leitura do voltímetro apresentam grande incerteza. Portanto o número de leituras do voltímetro digital, utilizado para os testes subseqüentes foi igual a 5.

Erro: máximos e mínimos $|\mu\epsilon|$



Erro: máximos e mínimos $|\mu\epsilon|$

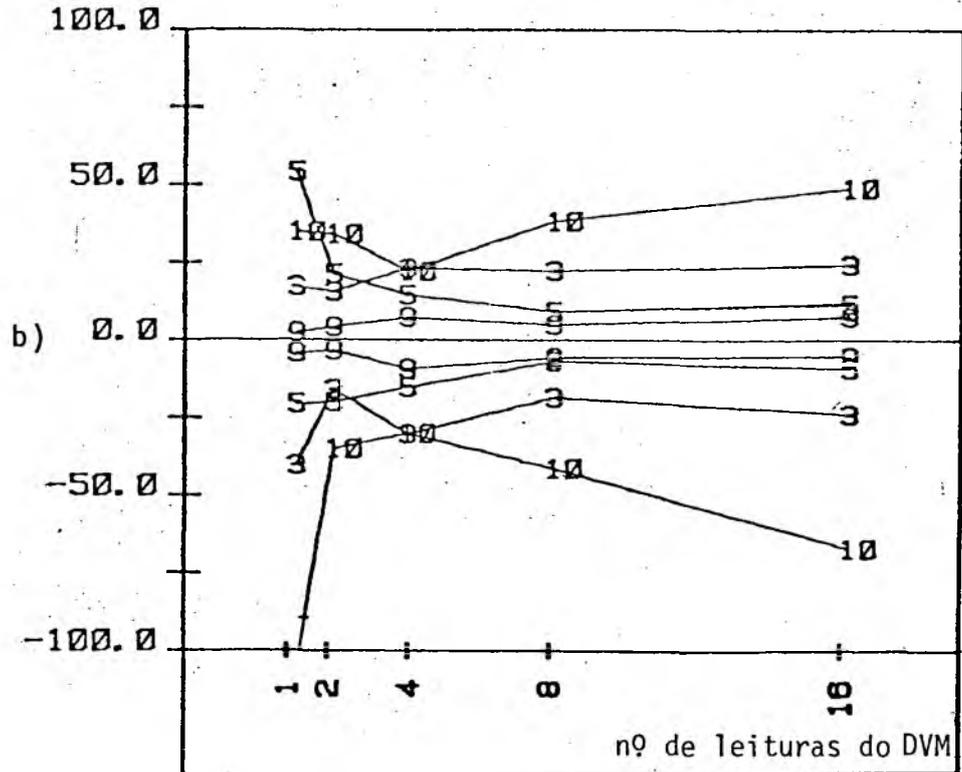


Figura 48 - Influência do chaveamento dependente do número de leituras do DVM.

9.2. RESULTADOS EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Nesta 2^a etapa, são apresentados os resultados dos principais resultados dependentes da cadeia de medição, em função do tempo de observação e temperatura.

9.2.1. RESULTADOS DEPENDENTES DO TEMPO DE OBSERVAÇÃO

Para verificação da influência do tempo de observação do SM, realizou-se um teste com 7 ensaios particulares.

Os instrumentos de medição foram ligados 15 minutos antes do 1º ensaio, sendo desligados somente no final do teste, portanto 22 horas mais tarde.

No 1º ensaio, o intervalo entre cada medição foi de 30 segundos, ao passo que nos demais foi 60 segundos. O 1º e o 2º ensaio foram seguidos, enquanto que para os restantes, houveram intervalos de 1 hora, exceto entre o 5º e o 6º ensaio que foi de 14 horas (figura 49*).

Na figura 49* são apresentados os resultados (flutuação de deformação versus número de medição, ida e volta) da evolução dos 7 ensaios para as pontes nº 4, 5 e 9, respectivamente 5 KHz, 225 Hz e CC. Pode-se observar que a inclinação é negativa na ida para todos ensaios, exceto o 2º, que é levemente positivo; também para volta, o 1º e o 2º ensaio apresentaram inclinação levemente negativas. Observa-se a maior estabilidade das pontes no movimento de volta, conforme mostra o resumo da figura 49*; a variação da deformação ao longo do teste foi:

movimento de ida:	ponte nº 4	\approx	15 $\mu\epsilon$
	ponte nº 5	\approx	30 $\mu\epsilon$
	ponte nº 9	\approx	30 $\mu\epsilon$

movimento de volta:	ponte nº 4	\approx	10 $\mu\epsilon$
	ponte nº 5	\approx	20 $\mu\epsilon$
	ponte nº 9	\approx	20 $\mu\epsilon$.

Isso leva a acreditar que o comportamento apresentado pelas pontes, falta de estabilidade ao longo do teste, seja inerente ao banco de ensaios, já que as curvas obedeceram a mesma tendência para todas as pontes; sendo também provável a existência de um patamar de equilíbrio dos EREs e das chaves em função da temperatura.

No quadro da figura 50 tem-se o resumo das histereses máximas, para o 1º, 2º, 3º e 6º ensaios particulares, ou seja, histerese como função da estabilidade. Pode-se observar a obtenção das menores histereses no 2º ensaio, justamente naquele ensaio em que não houve intervalo entre ele e o anterior, ou seja, o ERE estava mais aquecido; também é clara a tendência das histereses serem negativas para maioria dos instrumentos de medição cujos ensaios tiveram intervalos entre um e outro.

Instrumentos de medição	HISTERESE $ \mu\epsilon $			
	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio	6º ensaio
nº 3	- 77,0	28,3	- 70,3	- 47,5
4	- 11,0	6,0	- 12,4	- 7,5
5	- 20,5	6,6	- 22,8	- 20,4
6	- 15,8	9,1	- 29,9	- 26,6
7	28,7	- 9,0	26,7	22,6
8	- 18,9	7,6	- 25,9	- 24,0
9	- 18,5	5,7	- 22,4	- 20,4
10	- 66,0	71,2	50,5	56,2

Figura 50 - Resumo das histereses máximas obtidas dos resultados particulares do teste de tempo de observação versus nº de medição.

Como exemplo das avaliações particulares, tem-se na figura 51, a ponte nº 5, de frequência portadora 225 Hz, condição 1. Os ensaios particulares mostram a máxima histerese $\sim 23 \mu\epsilon$, para o 3º ensaio, enquanto que a menor é $\sim 7 \mu\epsilon$ para o 2º ensaio.

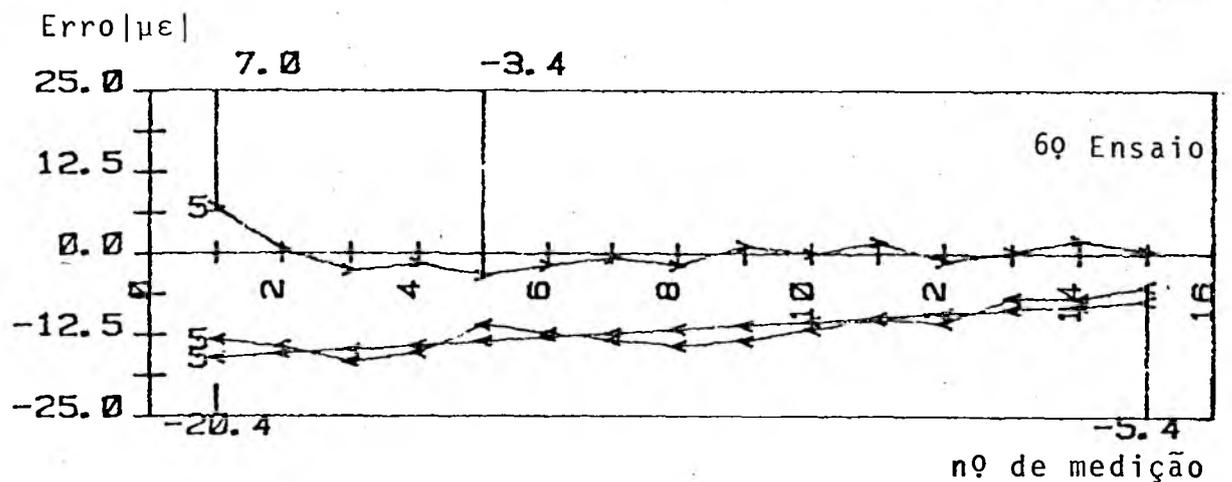
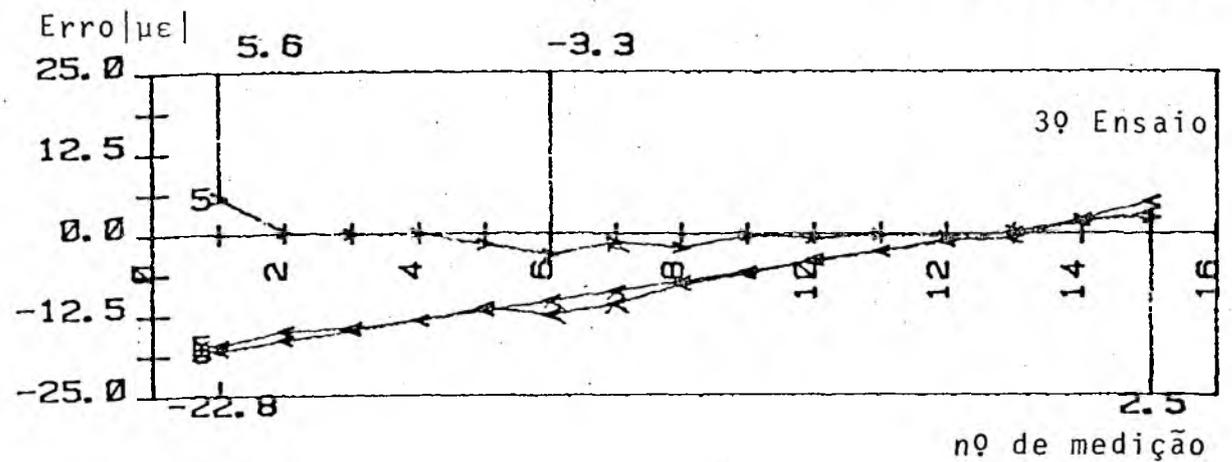
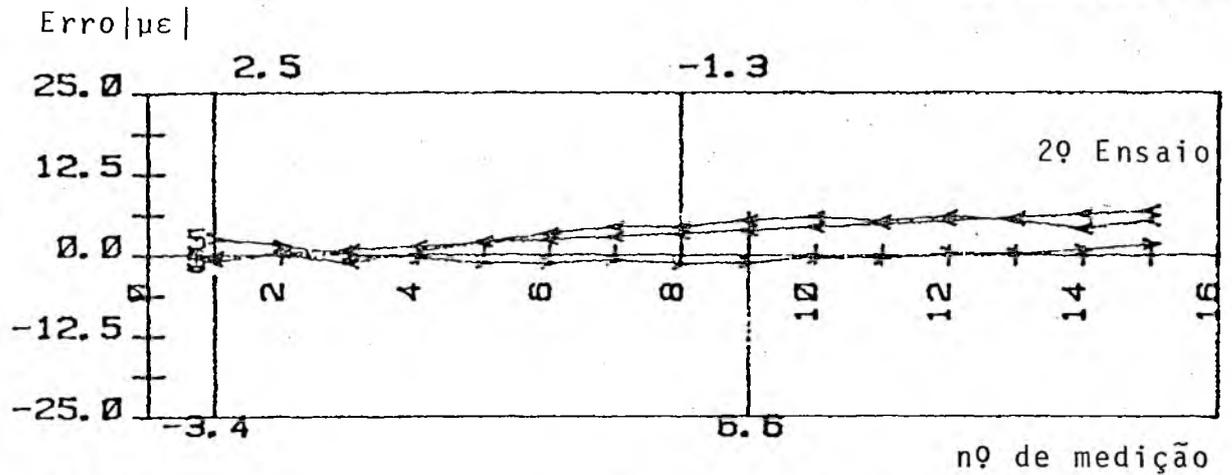
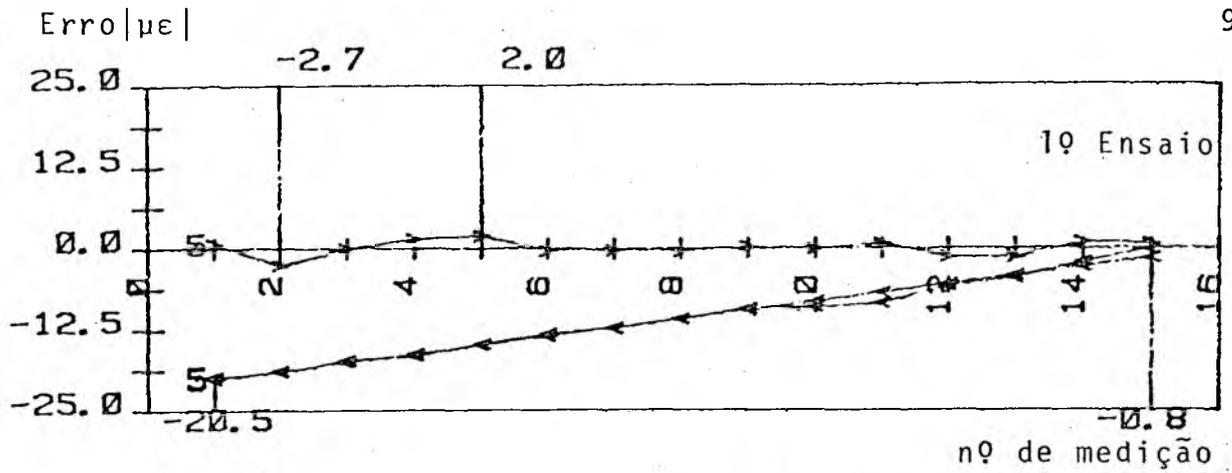


Figura 51 - Resultados das avaliações particulares do 19, 29, 39 e 69 ensaio em função do tempo de observação para a ponte de frequência portadora 225 Hz.

Nas figuras 52a,b estão apresentados os resultados obtidos através da avaliação total "PV" (coeficiente linear da reta) em função do tempo de observação. Em 52a são mostradas as condições 1 e 2, ao passo que em 52b, essas condições foram adicionadas, conforme |2|, e indicam a existência de tensões perturbadoras (tensões termoelétricas, galvânicas, etc.).

No gráfico da figura 52b as pontes 8 e 9 apresentaram um salto de PV do 1º para o 2º ensaio sendo causados provavelmente devido a falta de aquecimento inicial das pontes, já que estas são CC e seus amplificadores são sensíveis a tensões constantes.

Pode-se resumir o gráfico da figura 52b, pelo erro e pelo valor final de escala:

ponte nº 5 - 225 Hz	\approx	3 $\mu\epsilon$ = 0,6% VFE
8 - CC	\approx	14 $\mu\epsilon$ = 2,8% VFE
9 - CC	\approx	5 $\mu\epsilon$ = 1,0% VFE

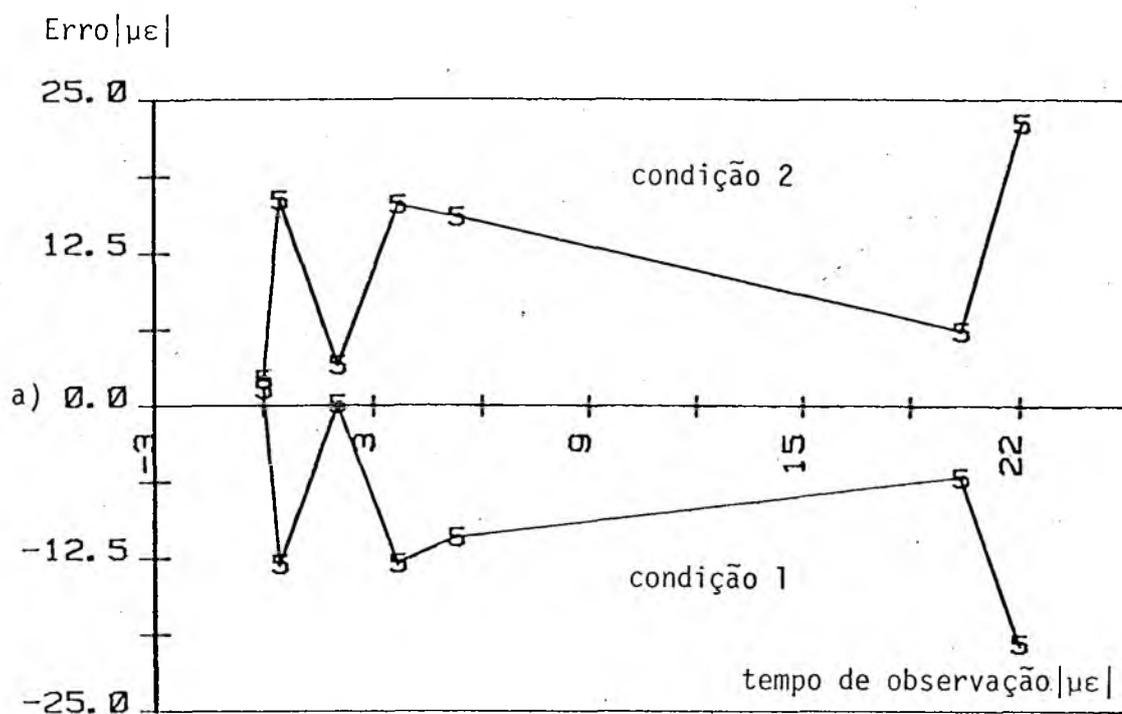
VFE = Valor final da escala ($\pm 500 \mu\epsilon$).

Esses valores vêm a confirmar as pontes CC como sensíveis a tensões constantes.

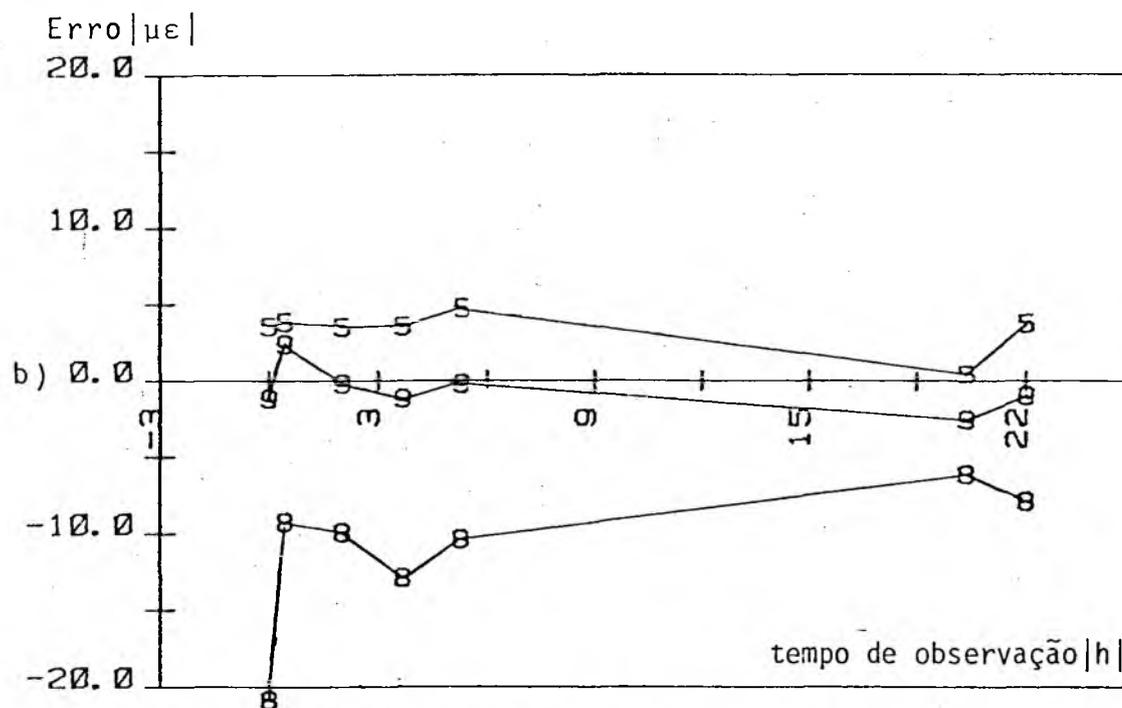
As figuras 53a,b também apresentam os resultados do mesmo teste anterior somente que nas condições 4 e 5 respectivamente. A condição 4 é outra maneira de constatar tensões perturbadoras (constante) nos circuitos extensométricos; ao passo que a condição 5 indica a flutuação do zero do amplificador.

Comparando-se os gráficos das figuras 52b e 53a respectivamente, nota-se uma certa semelhança das curvas 8 e 9 correspondentes as pontes tipo CC, apresentando uma pequena atenuação as curvas da figura 53a o que mostra a validade dos dois processos de verificação de tensões perturbadoras.

A figura 54 mostra o desvio padrão (erros aleatórios) de cada ensaio particular em função do tempo de observação, para condição 1. Pode-se observar que a maior incerteza de medição ocorreu no final do teste ($\pm 10 \mu\epsilon = \pm 2\%$ VFE), provavelmente devido a perturbações mecânicas, já que os primeiros ensaios foram realizados à noite, ao passo que o último foi em horário do expediente do

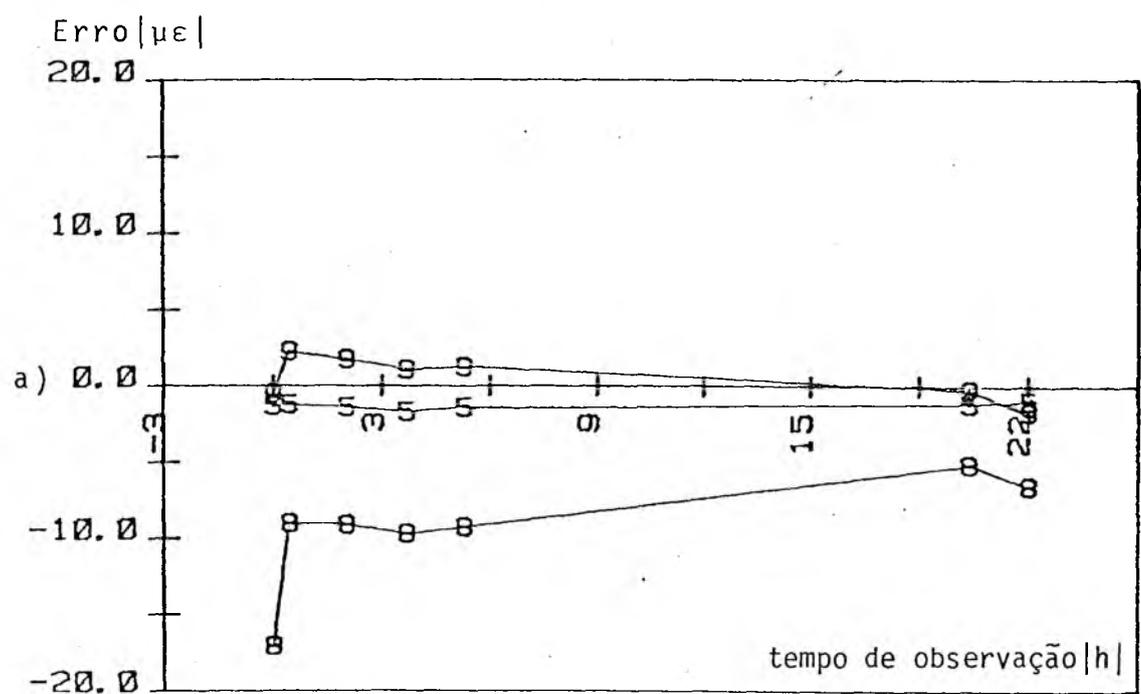


a) Condição 1 e condição 2.

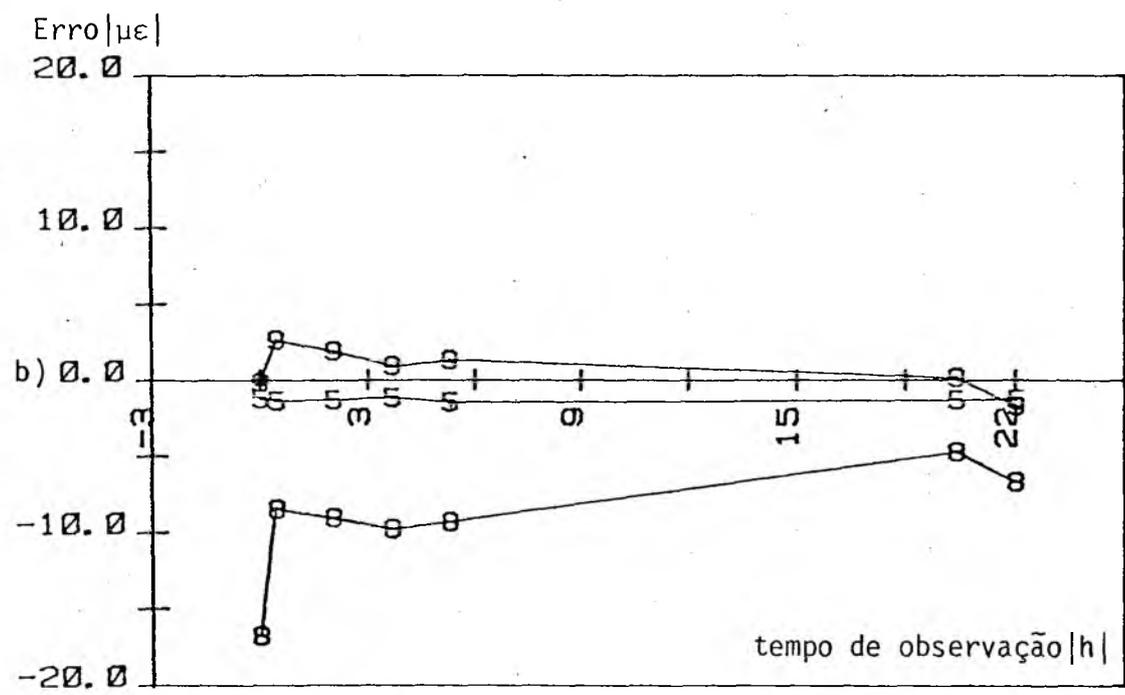


b) Condição 1 + condição 2.

Figura 52 - Avaliação total "PV" em função do tempo de observação.



a) Condição 4.



b) Condição 5.

Figura 53 - Avaliação total "PV" em função do tempo de observação.

laboratório.

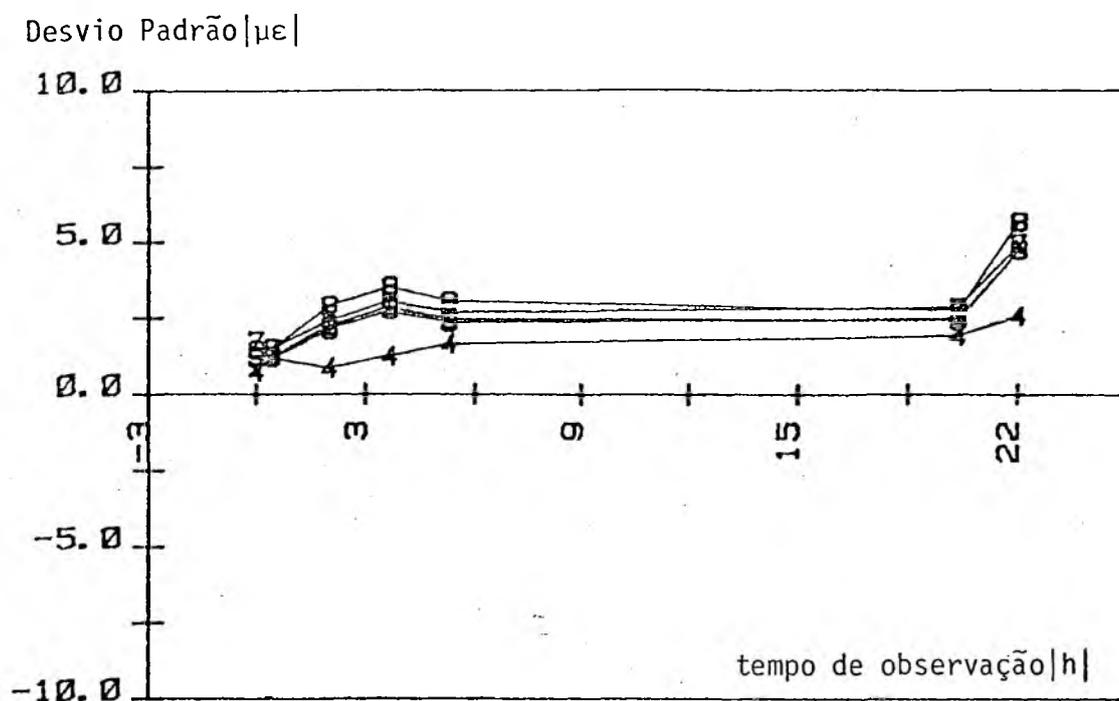


Figura 54 - Desvio padrão da evolução do teste em função do tempo de observação.

9.2.2. RESULTADOS DEPENDENTES DO TEMPO DE PRÉ-AQUECIMENTO DO ERE

Nos resultados apresentados no ítem anterior notou-se maior estabilidade do SM, justo no ensaio que não teve intervalo entre ele e o anterior, ou seja o SM já estava aquecido; então, com o objetivo de verificar o comportamento do SM ao aquecimento dos EREs, realizou-se um teste, com 7 ensaios particulares.

Os instrumentos de medição foram ligados 1 hora antes do 1º ensaio, sendo desligadas somente no final do teste, ou seja, 4,5 horas mais tarde.

Cada ensaio foi iniciado chaveando-se a ponte de frequência portadora nº 7 ao circuito extensométrico, permanecendo assim por um tempo determinado (tempo de pré-aquecimento), antes de serem feitas as 15 medições do movimento de ida e de volta, com intervalos de medição de 100 ms para as pontes nº 4, 6, 7, 8 e 9; os demais instrumentos de medição usaram intervalos de 400 ms. Os tempos de pré-aquecimento variaram de 15 a 1920 segundos. O intervalo entre um ensaio e outro foi de 30 minutos.

Na figura 55* são apresentados os resultados (flutuação de deformação versus número de medição, ida e volta) da evolução do teste, para as pontes nº 4, 5 e 9 respectivamente 5 KHz, 225 Hz e CC. Observa-se a ocorrência de inclinação positiva ao longo de todo o teste com excessão da primeira metade do 1º ensaio no movimento de ida, provavelmente devido a queda de tensão de alimentação provocada pelo desequilíbrio térmico entre o ERE ativo e o de compensação.

A variação da deformação ao longo do teste, conforme figura 55*, pode ser resumida:

movimento de ida: ponte nº 4 \approx 34 $\mu\epsilon$
 ponte nº 5 \approx 38 $\mu\epsilon$
 ponte nº 9 \approx 38 $\mu\epsilon$

movimento de volta: ponte nº 4 \approx 32 $\mu\epsilon$
 ponte nº 5 \approx 38 $\mu\epsilon$
 ponte nº 9 \approx 38 $\mu\epsilon$.

Diante dos resultados apresentados pela figura 55* e pelas figuras 56a,b, nota-se uma melhora da estabilidade do SM a partir do 3º ensaio particular, o que presume-se que além do equilíbrio térmico dos EREs, sejam ainda necessários o equilíbrio térmico das chaves, já que as pontes amplificadoras estavam aquecidas à mais de uma hora.

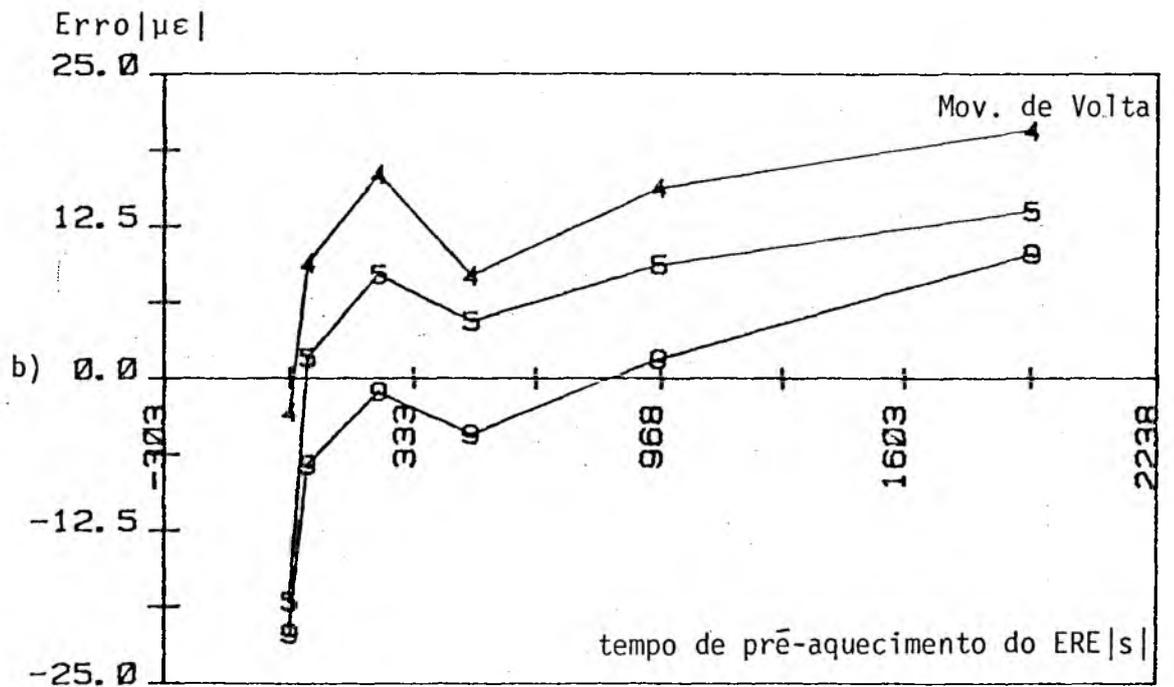
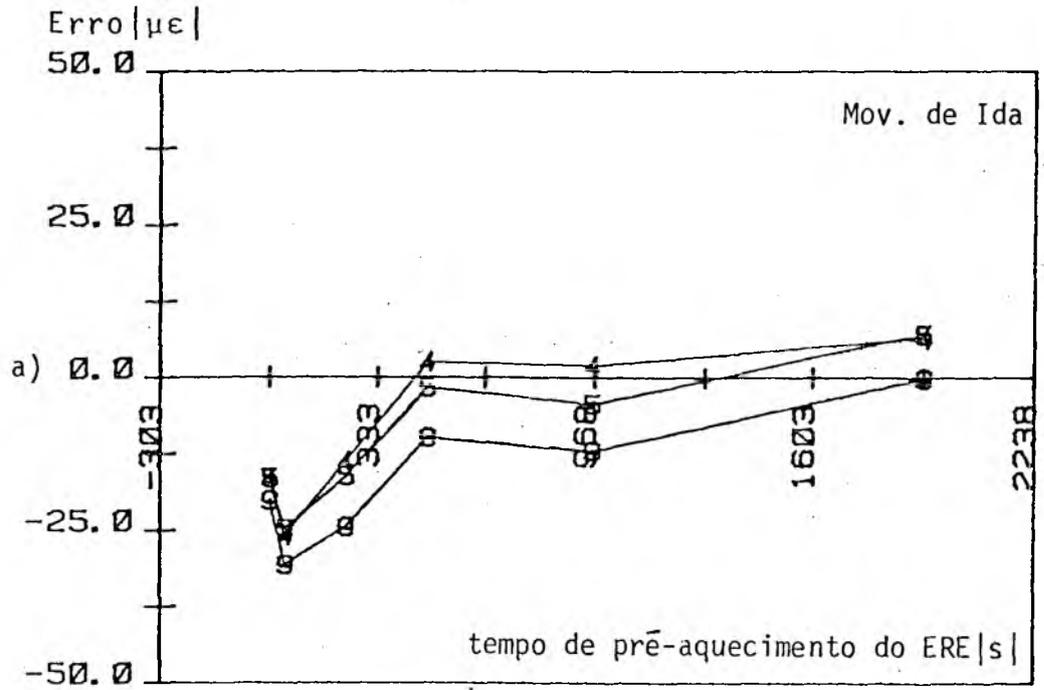


Figura 56 - Resultados da evolução do ensaio de "PV" em função do tempo de pré-aquecimento do ERE.

9.2.3. RESULTADOS DEPENDENTES DA TEMPERATURA NA VIGA

Para observar o comportamento do banco de testes em função da mudança de temperatura na viga fez-se um teste com 7 ensaios particulares com 12 horas de duração.

Foi usado o intervalo de medição de 100 ms para as pontes nº 4, 6, 7, 8 e 9 enquanto que para os demais instrumentos foi de 400 ms.

As pontes amplificadoras tinham sido ligadas 24 horas antes do teste. Foi feito o aquecimento da estufa 1 (que contém a viga) até aproximadamente 55°C e desligado o aquecimento para iniciar a medição de flutuação de deformação próximo a 50°C , tendo sido previsto a medição em ordem decrescente de temperatura, em intervalos de 5°C .

Como o resfriamento da estufa ocorreu rapidamente, surgiram diferenças acentuadas entre a temperatura da viga e a do ambiente, como mostra a figura 57*.

A figura 57* mostra a evolução do teste (flutuação de deformação versus número de medição, movimento de ida e volta) em função da temperatura na estufa 1, para as pontes amplificadoras nº 4, 5 e 9.

Nota-se que cada ensaio apresentou um conjunto de curvas bastante uniforme, as quais representam o comportamento do sistema, embora não apresentem estabilidade; alias, a melhor estabilidade conseguida nesse teste, ocorreu no movimento de volta dos ensaios 6 e 7, a temperaturas próximas a ambiente.

Os 4 ensaios iniciais, apresentaram as curvas para o movimento de ida, com certa concavidade, provavelmente devido a diferenças de temperaturas mais acentuadas entre o ERE ativo e o compensador, já que a estufa que abrigou a viga tem o seu aquecimento na parte inferior, o qual provoca convecção natural.

A variação de deformação apresentada pelo teste da figura 57* é a seguinte:

movimento de ida:	ponte nº 4	\approx	23 $\mu\epsilon$
	ponte nº 5	\approx	24 $\mu\epsilon$
	ponte nº 9	\approx	27 $\mu\epsilon$

movimento de volta: ponte nº 4 \approx 25
 ponte nº 5 \approx 29
 ponte nº 9 \approx 28.

Como pode-se observar, os erros apresentados pelo movimento de ida são levemente inferiores ao movimento de volta, ao passo que nos ensaios anteriores ocorria sempre o inverso.

Na figura 58 está mostrado o gráfico da avaliação total "PV" (coeficiente linear da reta) em função da temperatura ambiente na estufa 1 na condição 4. Pode-se observar a ocorrência de tensões termoelétricas, causadas principalmente pelos instrumentos de medição estarem ligados a mais de 24 horas antes do teste e pelo aumento da temperatura na viga. A presença dessas tensões não foi maior porque o aquecimento da estufa não causou pontos de diferenças acentuadas de temperatura, mas mesmo assim nota-se as pontes CC mais sensíveis a essas tensões.

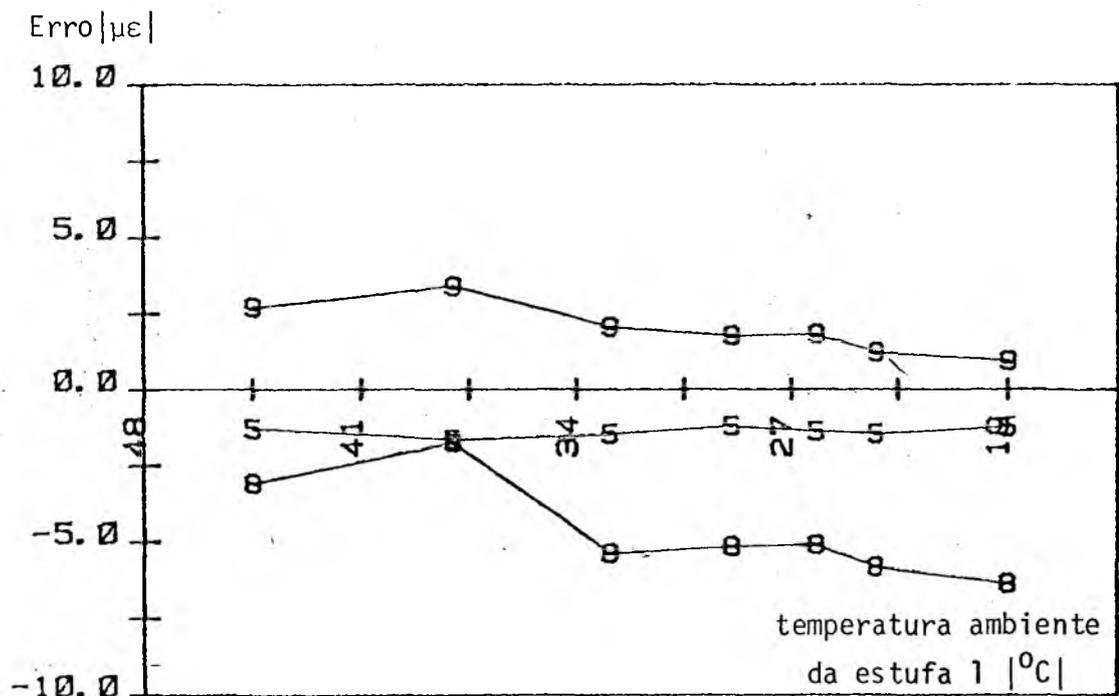


Figura 58 - Resultados da avaliação total "PV" em função da temperatura ambiente da estufa 1 na condição 4.

CAPÍTULO X

CONCLUSÕES

Com base no trabalho desenvolvido e nos resultados obtidos pode-se concluir:

1º) Os ensaios mostraram que a influência do chaveamento não pode ser desconsiderada em medições múltiplas de deformação com EREs, principalmente nesse caso, que foi utilizada uma chave seletora de desenvolvimento próprio.

2º) A repetibilidade apresentada pelo SM pode ser resumida pelo erro e pelo valor final de escala:

instrumento de medição	nº		Erro $ \mu\epsilon $	$ \% VFE $
nº 8 - CC			$\approx 0,1$	= 0,02
nº 6 - 5 KHz			$\approx 0,5$	= 0,1
nº 10 - Ohmímetro HP			≈ 10	= 2

3º) A repetibilidade apresentada pelo SM + chaveamento, pode ser resumida pelo erro e pelo valor final de escala:

instrumento de medição	nº		Erro $ \mu\epsilon $	$ \% VFE $
nº 8 - CC			≈ 5	= 1
nº 6 - 5 KHz			≈ 10	= 2
nº 10 - Ohmímetro HP			≈ 100	= 20

4º) Para ensaios de curta duração, usando chaveamento, as pontes tipo CC apresentaram os menores erros (1% VFE), ao passo que as de frequência portadora apresentaram o dobro (2% VFE), ($VFE = \pm 500\mu\epsilon$).

5º) Tornou-se crítico o uso do ohmímetro da HP como instrumento de medição de deformação com EREs, quando utiliza-se chaveamento ou quando o tempo de observação é prolongado, devido as mudanças de resistência das chaves, variação da temperatura, etc.

6º) Quando utiliza-se chaveamento para as pontes de frequência portadora baixa, é necessário harmonizar o intervalo de medição com

o tempo de acomodação dos amplificadores. Assim, para o presente caso obteve-se os seguintes intervalos de medição:

instrumentos de medição nº4,6,7,8 e 9 = 100 ms
 nº3,5 e 10 = 400 ms

79) Os resultados obtidos em função do tempo de observação mostraram as pontes de frequência portadora mais elevada com melhor desempenho do que as pontes CC. Esse mesmo ensaio mostrou a necessidade de aquecimento dos componentes do SM para obter o equilíbrio térmico e a conseqüente estabilidade.

movimento de ida: ponte nº 4 (5KHz) \approx 15 $\mu\epsilon$
 ponte nº 5 (225Hz) \approx 30 $\mu\epsilon$
 Ponte nº 9 (CC) \approx 30 $\mu\epsilon$

movimento de volta: ponte nº 4 (5KHz) \approx 10 $\mu\epsilon$
 ponte nº 5 (225Hz) \approx 20 $\mu\epsilon$
 ponte nº 9 (CC) \approx 20 $\mu\epsilon$

89) As tensões (termoelétricas, galvânicas, etc.) constatadas em função do tempo de observação provocaram erro de no máximo 15 $\mu\epsilon$ = 3% VFE, o que confirmou as pontes tipo CC como sensíveis a essas perturbações.

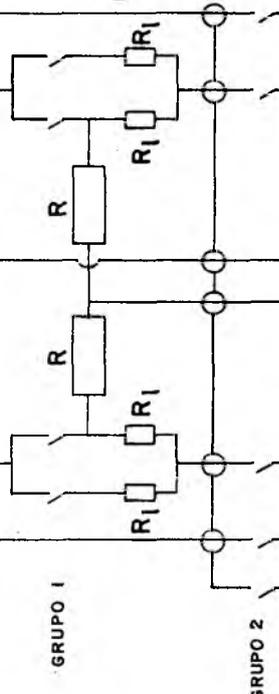
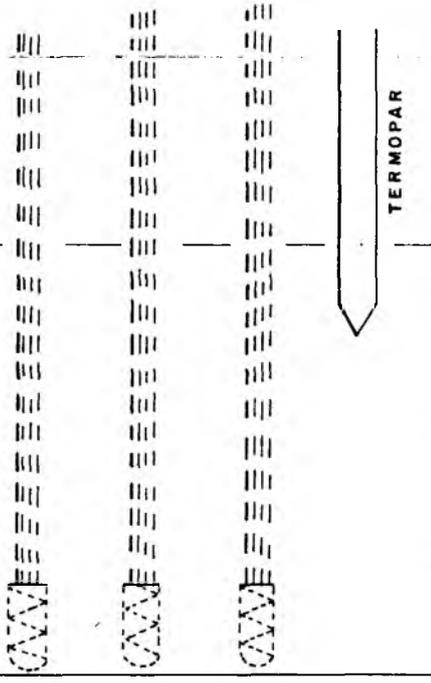
99) Mesmo fazendo-se um pré-aquecimento do ERE, a estabilidade do SM melhorou muito pouco, o que presume-se, que além do equilíbrio térmico dos EREs, sejam ainda necessários o equilíbrio térmico das chaves, já que as pontes amplificadoras estavam aquecidas a mais de uma hora.

109) A comparação entre as pontes que utilizaram circuito com e sem realimentação ficou prejudicada pelo cabo de conexão do ERE ser curto.

119) Limitações surgem ao banco de teste automatizado quando o VFE esperado é baixo, devido a influência do chaveamento.

129) O projeto, construção e montagem da chave seletora, proporcionou o desenvolvimento de tecnologia própria de construção de chaves seletoras pelo LAMBMETRO para atender as necessidades da AET, controle de processos, etc.

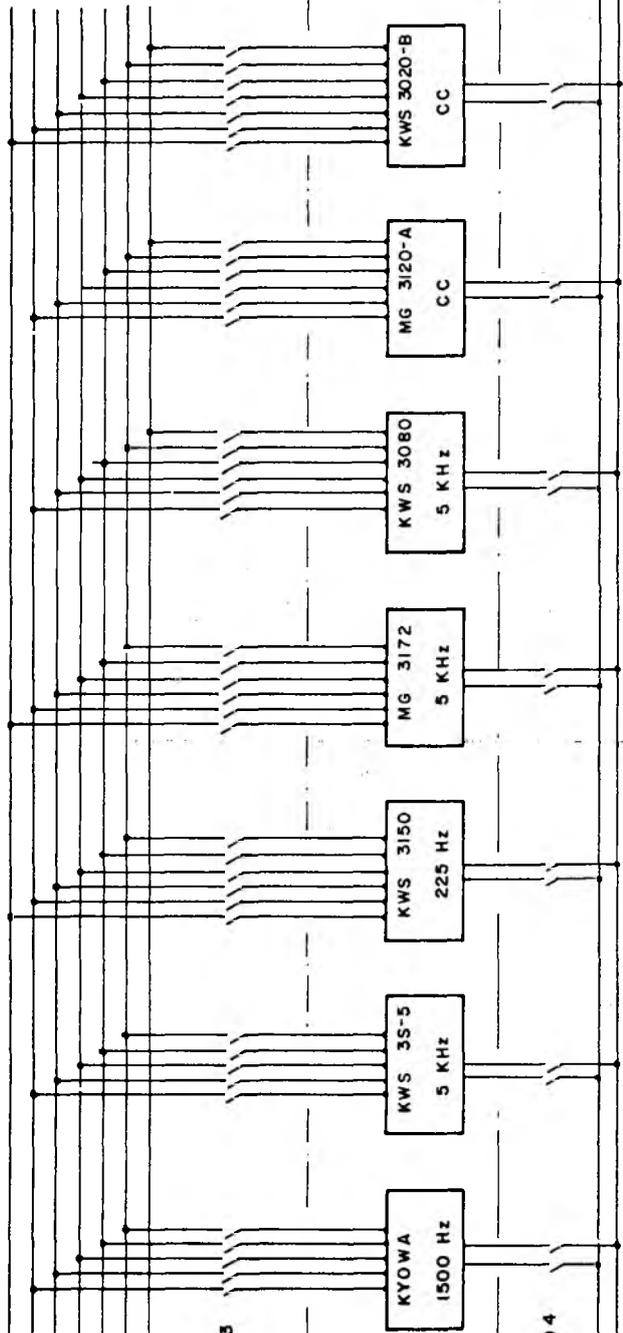
ESTUFA ②
ABOS



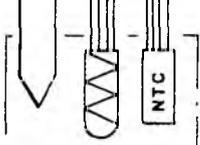
GRUPO 1
GRUPO 2
AÇÃO
AÇÃO
AÇÃO
ERRA
SINAL
SINAL
AÇÃO

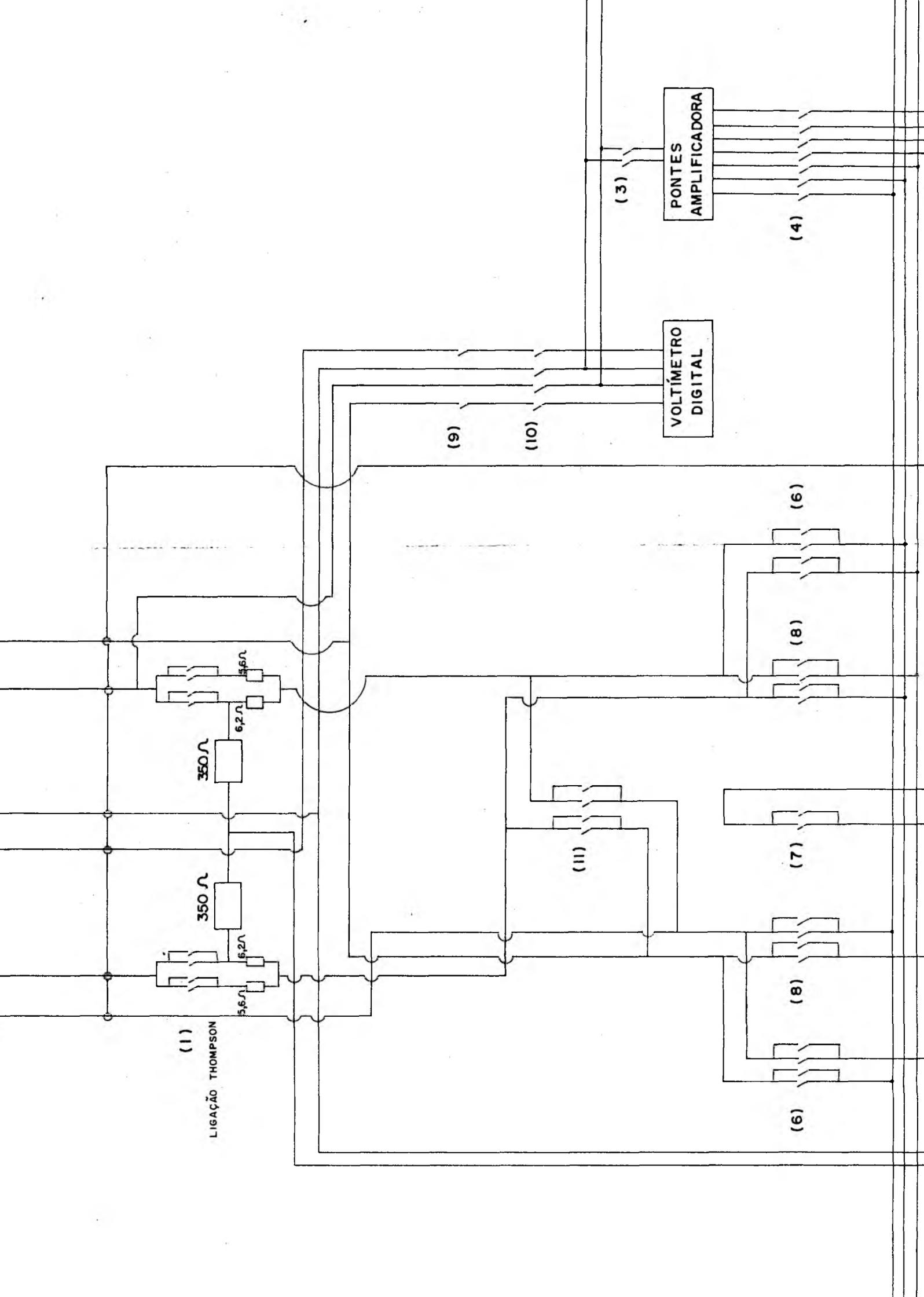
GRUPO 3

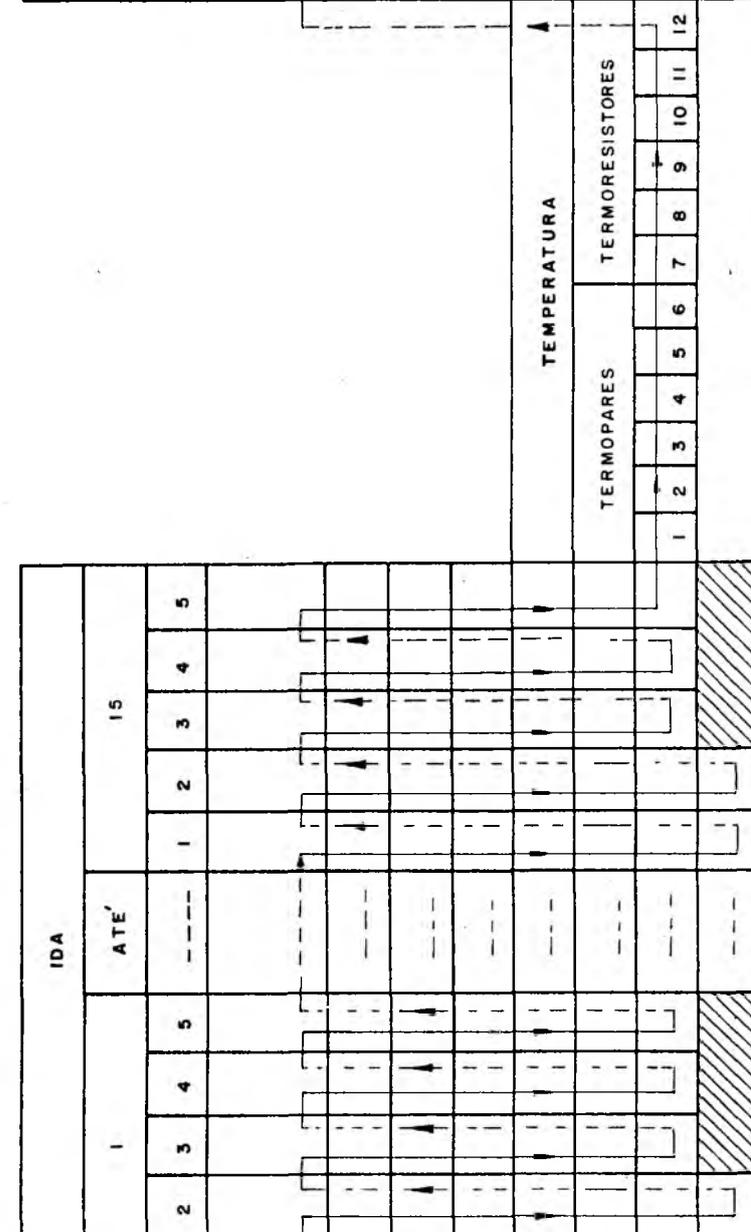
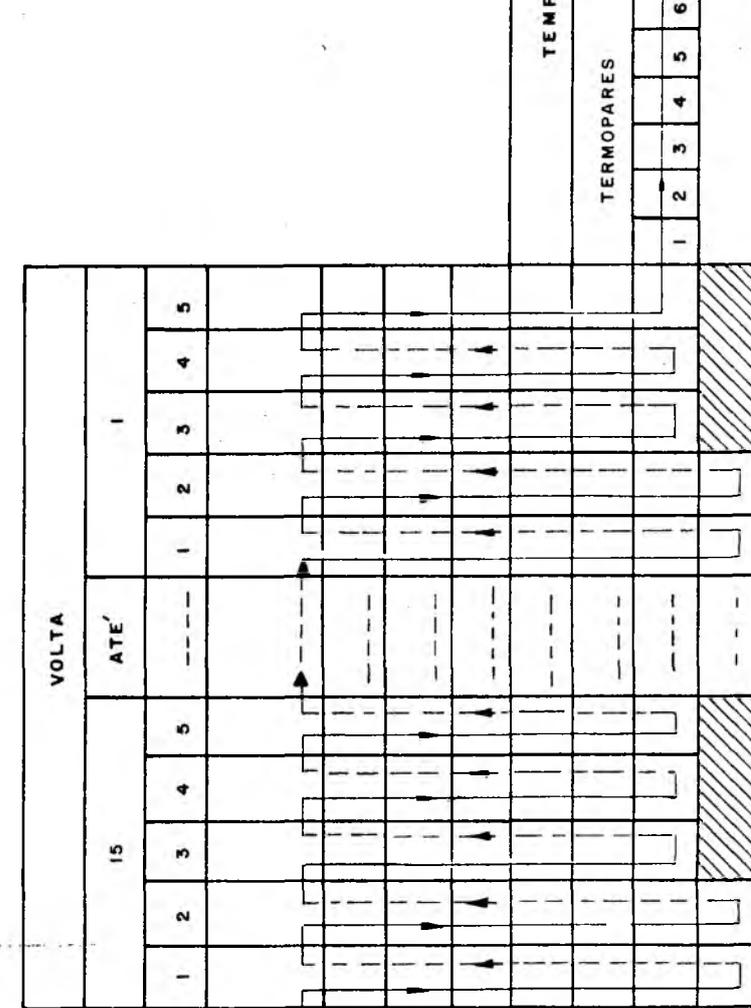
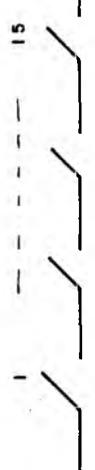
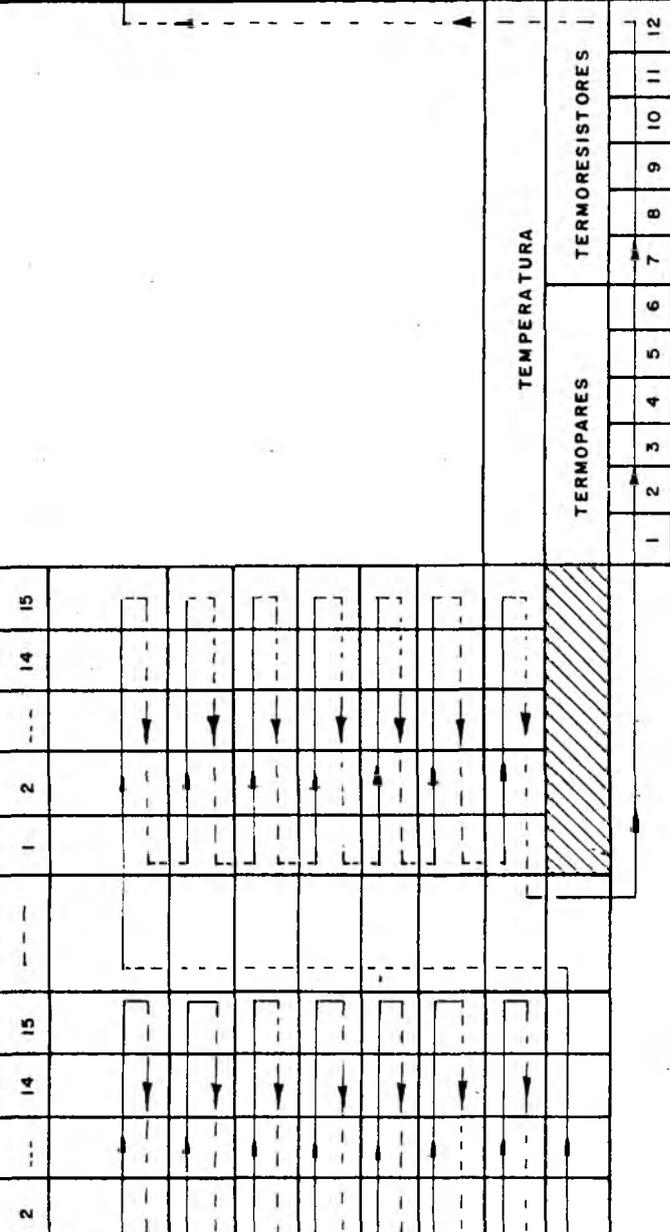
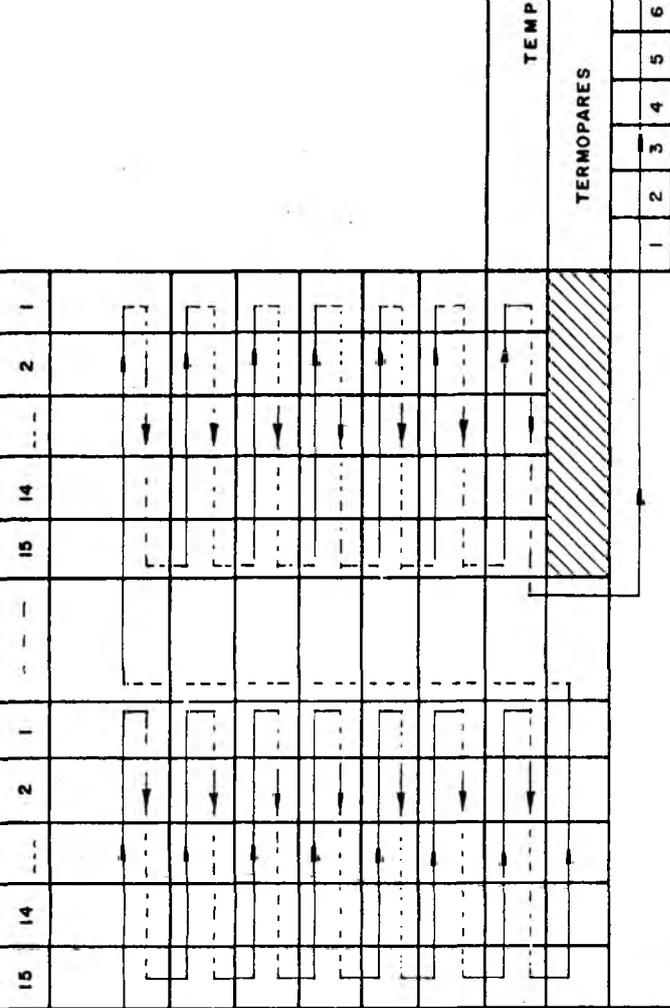
ESTUFA ③
PONTES
AMPLIFICADORAS



GRUPO 4







1º ENSAIO

2º ENSAIO

3º ENSAIO

4º ENSAIO

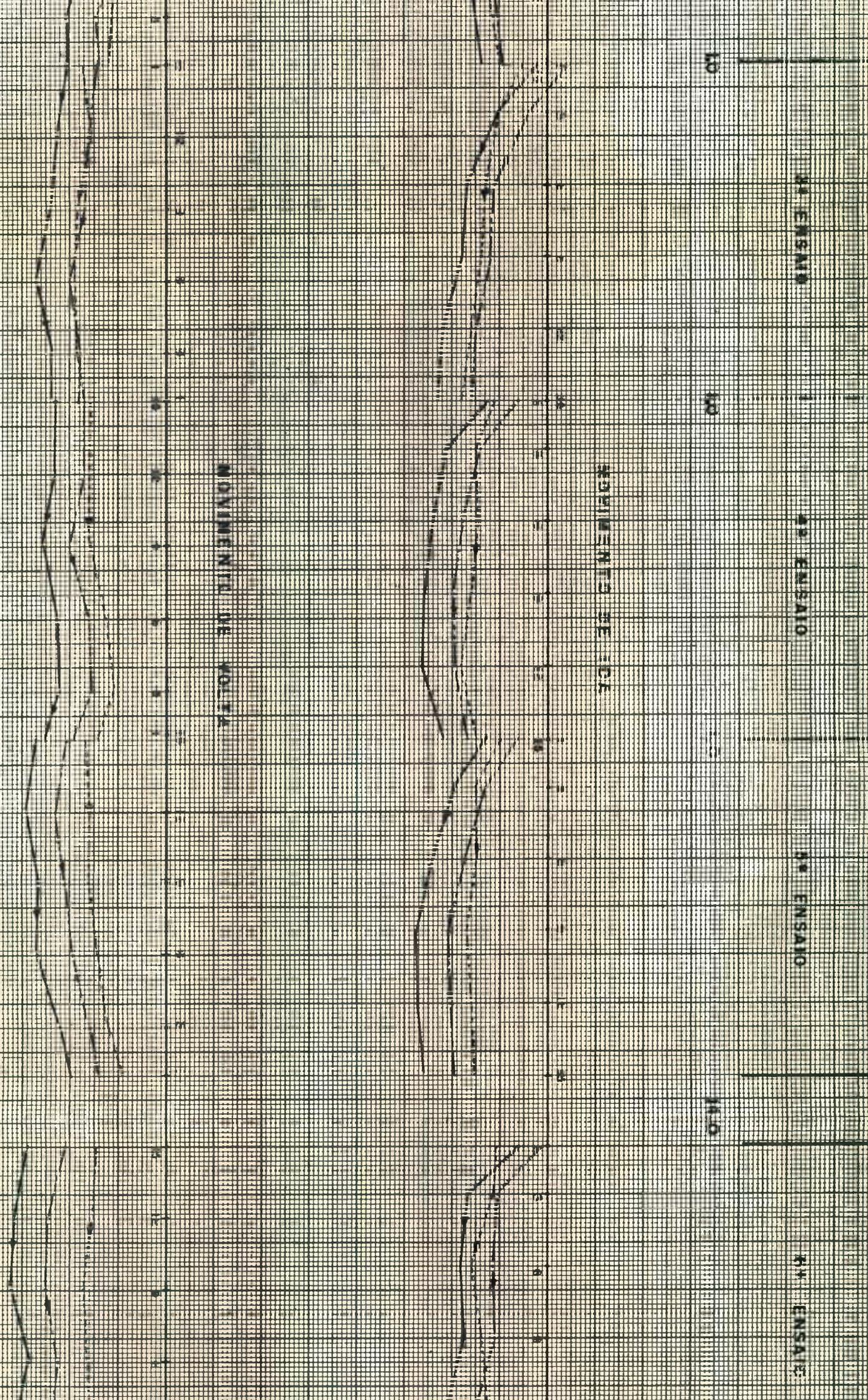
100

100

100

ADIVIMENTOS DE ECL

MOVIMENTOS DE VOLTA



3 40,8 34,8 20,3 27

9 22,9 26 24

36 1,38 2,25 2,0 4,0

MOVIMENTO DE IDA

MOVIMENTO DE VOLTA



30'

30'

30'

30'

MOVIMENTO DE IDA

0'

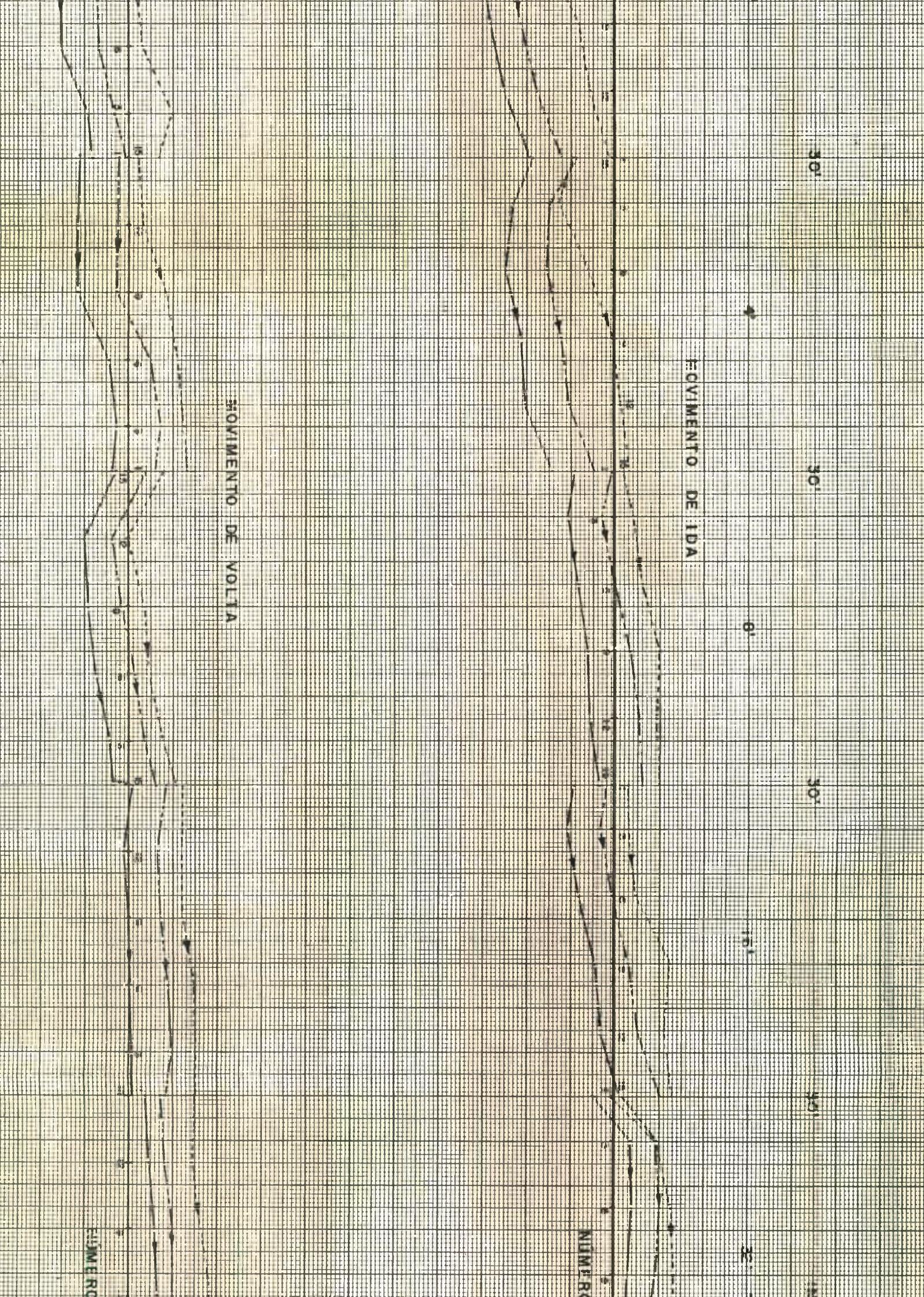
10'

20'

NUMERO

MOVIMENTO DE VOLTIA

NUMERO



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] POTMA, T., Strain Gauges theory and applications, Netherlands, N.V. Philips, 1967.
- [2] PERRY, C. C. & LISSNER, H. R., The strain gage primer, New York, McGraw-Hill Book Company, 1962.
- [3] DOEBELIN, E. O., Measurement systems: Application and Design, McGraw-Hill Kogakuska, Ltd., 1975.
- [4] DALLY, J. W. & RILEY, W. F., Experimental stress analysis, New York, McGraw-Hill, 1978.
- [5] BORCHARDT, I. G. & ZARO, M. A., Extensômetro de Resistência Elétrica, UFRGS, 1981.
- [6] ROHRBACH, C., Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen, VDI-VERLAG DÜSSELDORF, 1967.
- [7] LÜCKE, H. A. H. & SCHNEIDER, C. A., Curso de metrologia-IBQN, UFSC, 1981.
- [8] NEUBERT, H. K. P., Strain gauges kinds and uses, Macmillan, 1967.
- [9] BECKWITH, T. E. & BUCK, N. C., Mechanical measurements, London, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1965.
- [10] Digital Voltmeter - Model 3455A, Hewlett Packard Company, 1976 (Catálogo).
- [11] VAUGHAN, J., Applications of B&K Equipment to Strain Measurements, Brüel & Kjaer, Denmark, 1975.
- [12] LÜCKE, H. A. H. & SCHNEIDER, C. A., Análise experimental de Tensões no vaso de contenção do reator nuclear Angra I, SI-BRAT, Salvador, 1980.
- [13] MICRO-MEASUREMENTS, Tech note (TN-128-2), Strain Gage Temperature Effects, Michigan, 1976.

- [14] LÜCKE, H. A. H., Características e aspectos construtivos de relês para chaves seletoras de medição, 4º Seminário de instrumentação - IBP, Rio de Janeiro, 1981.
- [15] FLESCH, C. A., Influência do chaveamento em ligações com extensômetros de resistência elétrica, Publicação interna LABMETRO - UFSC, 1982.
- [17] LÜCKE, H. A. H., Programação para SAS, Publicação interna LABMETRO - UFSC, 1981.
- [18] NEVILLE, A. M. et KENNEDY, J. B., Basic statistical methods for engineers and scientists, International textbook company, USA, 1964.