

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

**ESTABILIDADE DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA
DE SISTEMA DE MEDIÇÃO**

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

NELSON SCHOELER

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 1986.

**ESTABILIDADE DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA
DE SISTEMA DE MEDIÇÃO**

NELSON SCHOELER

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
METROLOGIA E AUTOMAÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing. - ORIENTADOR

Prof. CLOVIS RAIMUNDO MALISKA, Ph.D. - COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA

Prof. ARNO BLASS, Ph.D. - PRESIDENTE

Prof. CARLOS ALBERTO FLESCHE, M.Eng.

Prof. HERMANN ADOLF HARRY LUCKE, Dr. Ing.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, pelo apoio na realização desse trabalho e compreensão pelas muitas horas de ausência no convívio familiar, durante a realização do mesmo.

Aos meus pais e familiares que sempre me incentivaram a continuar na busca incessante de conhecimento e formação.

Ao Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing., pela valiosa orientação e apoio na concretização desse trabalho.

Aos colegas da CERTI/Labmetro e amigos que colaboraram de uma forma ou outra na execução e realização das atividades de pesquisa, desenvolvimento e arte final da dissertação.

Aos Professores da UFSC que repassaram seus valiosos conhecimentos.

E, sobretudo a Deus, que me deu forças e saúde para transformar um sonho em realidade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 A MEDIÇÃO NO CONTROLE DE QUALIDADE E NO CONTROLE DE PROCESSOS.....	1
1.2 IMPORTÂNCIA DO CONHECIMENTO DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA.....	1
1.3 PLANO DE TRABALHO	4
2. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO METROLÓGICO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	5
2.1 ERROS DE MEDIÇÃO	5
2.2 FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA E A CURVA DE ERROS	8
2.3 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	9
2.3.1 Faixa de indicação (FI)	9
2.3.2 Faixa de operação (FO).....	10
2.3.3 Divisão de escala (DE) e incremento digital (ID)	11
2.3.4 Resolução (R).....	11
2.4 CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS ESTÁTICAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	12
2.4.1 DM para P = 95,4%	12
2.4.2 Sensibilidade (Sb).....	12
2.4.3 Erro de linearidade (EL).....	15
2.4.4 Histerese (H).....	16
2.4.5 Erro inicial (Ei)	16
2.5 CARACTERIZAÇÃO DA INSTABILIDADE DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA	18
2.5.1 Flutuação do zero (FZ)	19
2.5.2 Flutuação de sensibilidade (FS)	19
2.5.3 Flutuação do comportamento (FC)	20
2.5.4 Alteração do zero (AZ).....	20
2.5.5 Alteração da sensibilidade (AS).....	21
2.5.6 Alteração no comportamento (AC)	22
2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO	22
2.6.1 Classificação do sistema de medição	23
2.6.2 Caracterização do comportamento dinâmico.....	26
2.7 SISTEMA DE MEDIÇÃO GENERALIZADO	29
2.7.1 Módulos	30
2.7.2 Comportamento metrológico.....	31
3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA	35
3.1 IMPORTÂNCIA DE UMA METODOLOGIA	35
3.2 AÇÕES DE QUALIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	35
3.2.1 Calibração.....	35
3.2.2 Ajustagem.....	36
3.2.3 Aferição.....	36
3.2.4 Importância da calibração.....	37
3.3 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO	37
3.3.1 Conhecimento da grandeza aplicada.....	37
3.3.2 Comportamento da grandeza a medir no tempo	38
3.3.3 Objeto a calibrar	39

3.4 CRITÉRIOS DE ESCOLHA DO PADRÃO	39
3.4.1 Confiabilidade e rastreabilidade.....	39
3.4.2 Incerteza de medição do padrão	40
3.5 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO	42
3.5.1 Planejamento do ensaio	42
3.5.2 Preparação do Experimento	47
3.5.3 Execução dos Ensaios.....	47
3.5.4 Processamento dos Dados.....	49
3.5.5 Documentação da Calibração.....	50
3.6 CALIBRAÇÃO SOB CONDIÇÕES EXTERNAS VARIÁVEIS.....	51
3.7 FREQUÊNCIA DE CALIBRAÇÃO.....	51
4. INSTABILIDADE DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO..	53
4.1 ESTUDO DAS CAUSAS DA INSTABILIDADE.....	53
4.1.1 Variação da temperatura	54
4.1.2 Tempo.....	59
4.1.3 Tensão de alimentação e ruído elétrico	62
4.1.4 Vibrações e choques mecânicos	64
4.1.5 Umidade relativa do ar.....	65
4.1.6 Outras fontes de E	66
4.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA ESTUDO DA INSTABILIDADE	66
4.2.1 Procedimento geral para determinação da influência da temperatura.....	67
4.2.2 Influência da tensão de alimentação sobre o sinal de saída de SM	68
4.3 MODOS DE MINIMIZAÇÃO OU COMPENSAÇÃO AUTOMÁTICA DAS INSTABILIDADES.....	70
4.3.1 Controle das GI.....	70
4.3.2 Compensação automática dos efeitos das grandezas de influência	71
5. CORREÇÃO DOS ERROS SISTEMÁTICOS.....	76
5.1 OTIMIZAÇÃO DO RESULTADO DA MEDIÇÃO USANDO FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA REAL.....	76
5.1.1 Correção de E sob condições estáveis de GI	76
5.1.2 Otimização quando o SM é usado sob condições adversas de GI.....	83
5.2 FORMAS DE CORREÇÃO	83
5.2.1 Correção manual	83
5.2.2 Correção automática.....	84
6. CONCLUSÃO.....	87
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

SIGLAS

BP	- Bloco padrão
CE	- Curva de erros
CNC	- Comando numérico computadorizado
CQ	- Controle de qualidade
DM	- Dispersão das medidas
E	- Erro de medição
ET	- Erro total
Ea	- Erro aleatório
Eg	- Erro grosseiro
EL	- Erro de linearidade
Es	- Erro sistemático
f	- Função
FI	- Faixa de indicação
FO	- Faixa de operação
FT	- Função transferência
GI	- Grandeza de Influência
GM	- Grandeza a medir
H	- Histerese
I	- Indicador
ID	- Incremento digital
Im	- Incerteza de medição
k	- Grau do polinômio
L	- Leitura
LED	- Diodo emissor de luz
LIM	- Laser interferométrico modular
M	- Medida
Me	- Mensurando
Mi	- Iésima medida
MM	- Média aritmética das medidas
MEM	- Máquina de ensaio de materiais
mmq	- método dos mínimos quadrados

n	- Número de amostras
P	- Probabilidade de enquadramento
Patm	- Pressão atmosférica
RNC	- Rede nacional de calibração
s	- Desvio padrão experimental
SAS	- Sistema de aquisição de sinais
SI	- Sistema internacional de unidades
SM	- Sistema de medição
t	- Coeficiente de student
T	- Transdutor
TE	- Tempo de estabilização
TS	- Tratamento de sinal
UTS	- Unidade de tratamento de sinal
VVC	- Valor verdadeiro convencional
Xe	- Sinal de entrada
Xs	- Sinal de saída
σ	- Desvio padrão da população

RESUMO

A crescente demanda de bens e produtos com qualidade cada vez mais elevada, exige a cada dia medições em maior número com menores erros.

Isto implica no uso de uma instrumentação adequada aos objetivos, associado a qualificações periódicas dos sistemas de medição envolvidos.

Objetivando a minimização dos erros atuantes sobre os resultados, em função da natureza dos sistemas de medição e das causas perturbadoras atuantes sobre os mesmos, recomendam-se metodologias racionais de qualificação, bem como formas de controlar ou corrigir os seus efeitos.

Opções de correções dos erros sistemáticos por métodos manuais ou automatizados, através de sistemas computacionais, são sugeridos, bem como demonstradas as vantagens, permitindo a obtenção de resultados com erros minimizados.

ABSTRACT

The higher quality of goods and products today requires a large amount of accurate measurements.

This requires not only the use of an instrumentation adequate to the objectives of the measurements but also asks for periodical checks of the measuring systems involved.

In order to minimize the errors acting on the results, which are a function of the measuring system nature, as well as the disturbance causes which are acting on them, rational qualifying methodologies and ways to control or compensate their effects are recommended.

Correction options of the systematic errors via manual or automatic methods, using computer assisted systems, are suggested. The advantages of the system become very evident when a minimum error result is shown.

1. INTRODUÇÃO

1.1 A MEDIÇÃO NO CONTROLE DE QUALIDADE E NO CONTROLE DE PROCESSOS

A elevação da qualidade dos produtos é uma meta em toda empresa que se preocupa com a competitividade. Um dos meios de atender a essa premissa é o aperfeiçoamento do controle de qualidade (CQ), seja adotando métodos qualitativos (por atributo) ou, como preferível atualmente, por métodos quantitativos (por variáveis). Este último implica em medir, e por consequência esta operação ocorre a cada dia de forma mais intensiva.

Com o desenvolvimento da informática, isto é, pelo uso de sistemas computacionais, em muito tem sido facilitado e tornado mais eficiente o CQ, permitindo o aprimoramento das operações associadas sem elevação significativa do custo, considerando as metodologias tradicionais de CQ.

Outro campo onde a medição é cada vez mais requisitada por ser imprescindível é na monitoração e no controle de grandezas físicas e mecânicas, em processos contínuos e descontínuos na indústria, em usinas de geração de energia elétrica, siderúrgicas, etc.. Também em processos não industriais, como naves aeroespaciais, navios e muitos outros.

O desenvolvimento tecnológico revela claras tendências de que cada vez mais é necessário medir, e isto com maior velocidade e confiabilidade, implicando o uso de sistemas de medição adequados a sua finalidade e com um comportamento metrológico cada vez melhor.

1.2 IMPORTÂNCIA DO CONHECIMENTO DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA

Todo sistema de medição (SM) apresenta uma correlação ideal entre o sinal de entrada (grandeza a medir (GM)) e o sinal de saída (leitura), caracterizada pela sua função transferência (FT) nominal. Esta, de modo geral, é linear.

Na prática todo o SM apresenta erros (E), e seu comportamento efetivo é caracterizado pela FT real (fig. 1.1).

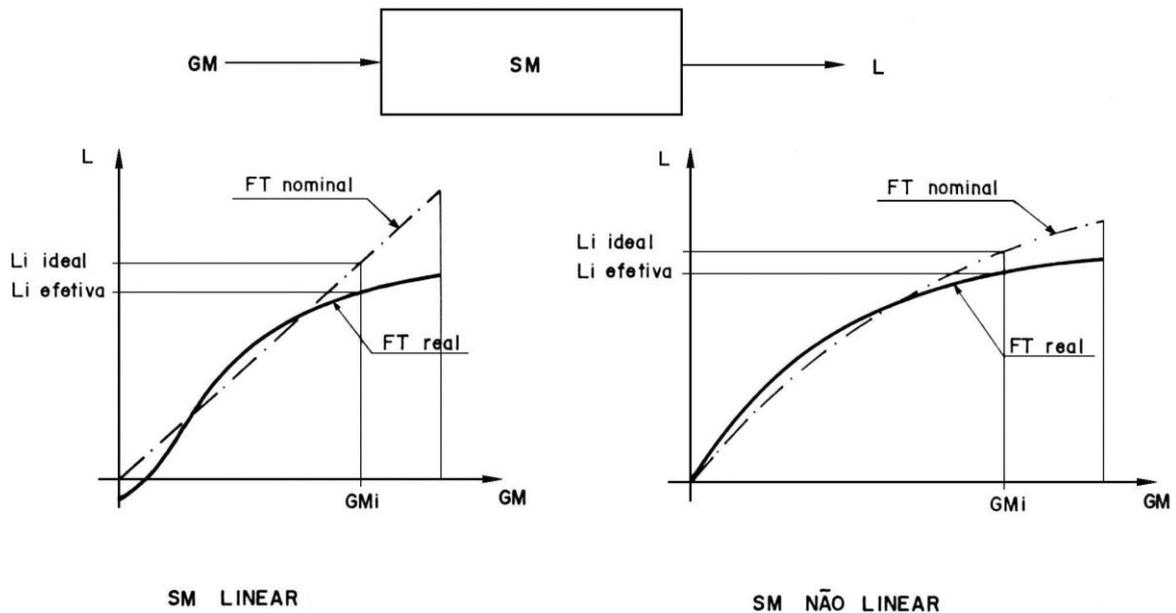


Fig. 1.1 - FT Nominal, Real, Linear e não Linear

Estes E são devidos às grandezas de influência (GI) que atuam sobre o SM, alterando a FT de tal forma que o SM indica um valor afetado de E.

Exemplos de GI:

- Temperatura. Sistemas mecânicos, eletrônicos e outros, sofrem alterações dimensionais nos seus mecanismos, ou ainda alterações nas características elétricas de seus amplificadores, resistores, etc., de forma a modificar as características metrológicas do SM;
- Atrito e conseqüente desgaste. Ocorrem nos elementos mecânicos, tais como, mancais de apoio de ponteiros indicadores, alavancas e hastes articuladas por pinos e trens de engrenagens, resultando em folgas e comportamento diferenciado para valores crescentes e decrescentes da GM.

Em função do exposto, a FT não se apresenta tão bem caracterizada como mostra a figura 1.1 e sim, por vezes, com significativos problemas de repetibilidade e de condição de E, como mostrado na figura 1.2.

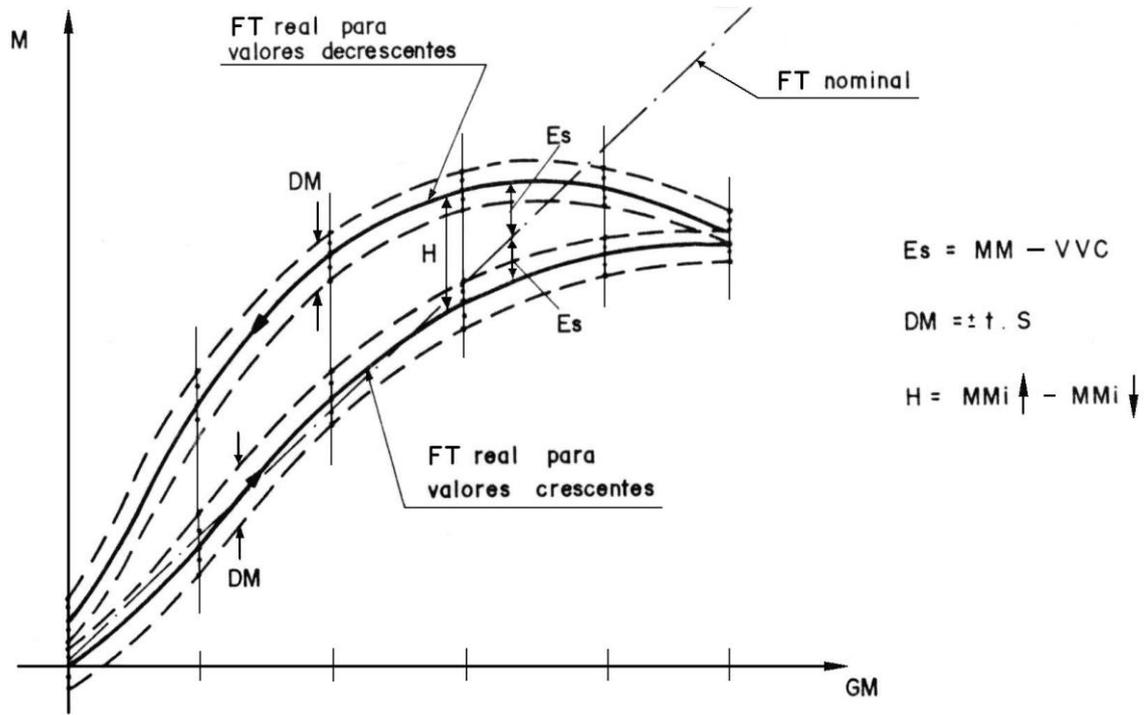


Fig. 1.2 - FT real: erro sistemático (Es) e erro aleatório (Ea)

Quando o Es é superior à dispersão das medidas (DM), a compensação dos Es no resultado da medição pode melhorar muito a qualidade do resultado.

Existem basicamente duas formas de compensar os Es :

- Compensação manual, através do uso de tabelas de correção ou de equações matemáticas da FT real, sendo soluções práticas já adotadas há bastante tempo em laboratórios. A eficiência é comprovada /1, 2, 3/, porém trata-se de um procedimento moroso, só adotado em medidas altamente criteriosas.
- Compensação automática, pelo uso de microcomputador, pode-se acelerar e automatizar este processo de correção; trata-se de uma técnica ainda sofisticada para muitos casos, mas com a tendência de um rápido desenvolvimento em função da diminuição do custo dos sistemas computacionais dedicados.

Todavia, a adequabilidade da compensação de Es depende do comportamento efetivo da FT, motivo pelo qual é importante conhecê-la com o máximo de detalhes.

1.3 PLANO DE TRABALHO

Com o intuito de melhor conhecer o comportamento dos SM propôs-se desenvolver estudos detalhados das causas dos E que influenciam a estabilidade e a forma da FT.

Por outro lado, procurou-se estabelecer aspectos relevantes no procedimento de determinação experimental da FT, tais como: cuidados especiais no planejamento do ensaio, formas de aquisição dos dados, técnicas de processamento e documentação da informação, valendo-se de meios tradicionais e do uso de sistemas computadorizados.

Através da análise de dados experimentais, objetivou-se reunir subsídios para demonstrar a instabilidade da FT sob condições controladas e não controladas das GI. Utilizando resultados obtidos em calibrações (FT real), procurou-se demonstrar quando é vantajoso um ajuste do SM ou quando se torna interessante compensar os Es.

2. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO METROLÓGICO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO

Torna-se imprescindível definir e analisar com dados experimentais, uma série de parâmetros que caracterizam os E de um SM, parâmetros estes que permitirão descrever a FT e sua estabilidade.

2.1 ERROS DE MEDIÇÃO

Erro de medição (E) é a diferença entre o valor da GM correspondente à leitura, ou medida (M), e o valor verdadeiro convencional (VVC) /4/.

$$E = M - VVC \quad (2.1)$$

O E pode ser dividido em parcelas como segue:

$$E = E_s + E_a + E_g \quad (2.2)$$

- E_s : média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetibilidade, menos o valor verdadeiro do mensurando.

$$E_s = MM - VVC \quad (2.3)$$

sendo MM a média aritmética das medições.

- E_a : resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições da mesma GM efetuadas sob condições de repetibilidade.

$$E_a = M - MM \quad (2.4)$$

- E grosseiro (E_g): é a parcela de E que se apresenta esporadicamente, em função de operação não adequada, leitura errônea, e demais fatores decorrentes de mau uso do SM por parte do operador. Na figura 2.1 apresentam-se as causas mais frequentes

para os diferentes tipos de E.

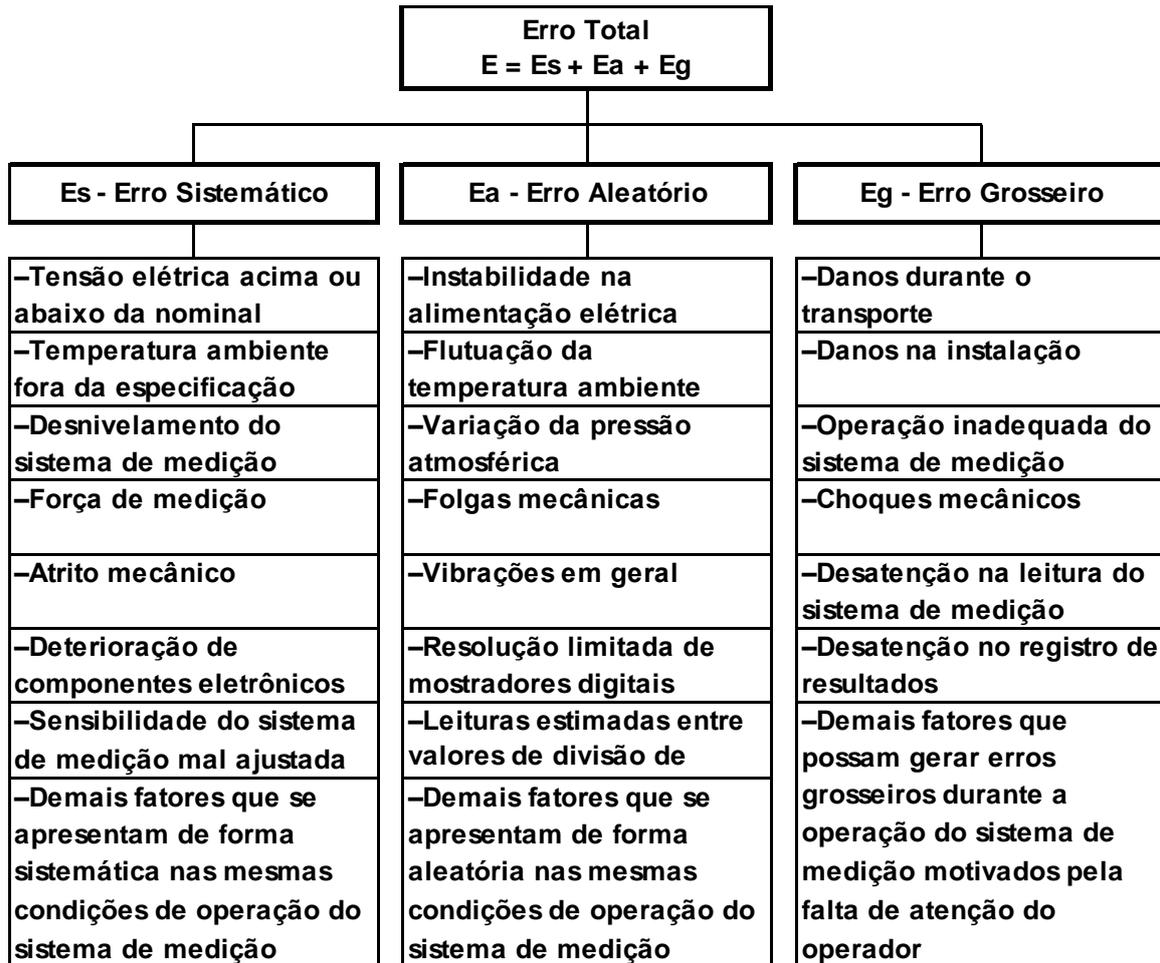


Fig. 2.1 - Componentes do E de medição. Causas

Na operação de determinação da FT é importante que o operador seja qualificado, permitindo supor que E_g não acontecem, resultando assim a equação para o E conforme segue:

$$E = E_s + E_a \quad (2.5)$$

A não repetibilidade das medidas é melhor caracterizada pelo parâmetro denominado DM.

Na generalização da descrição do E de uma medição não é possível definir um valor único e sim, uma faixa denominada incerteza de medição (I_m) dentro da qual pode ocorrer o E total efetivo, que é dado como /4/:

$$I_m = E_s + DM \quad (2.6)$$

Dada a impossibilidade de quantificar exatamente o Ea, é recomendado estatisticamente associar à MM, um intervalo denominado DM, dentro do qual os Ea têm uma probabilidade de enquadramento (P) de se encontrar (fig. 2.2). A P adotada é função do campo de aplicação do resultado, a ser definida pelo usuário /5/.

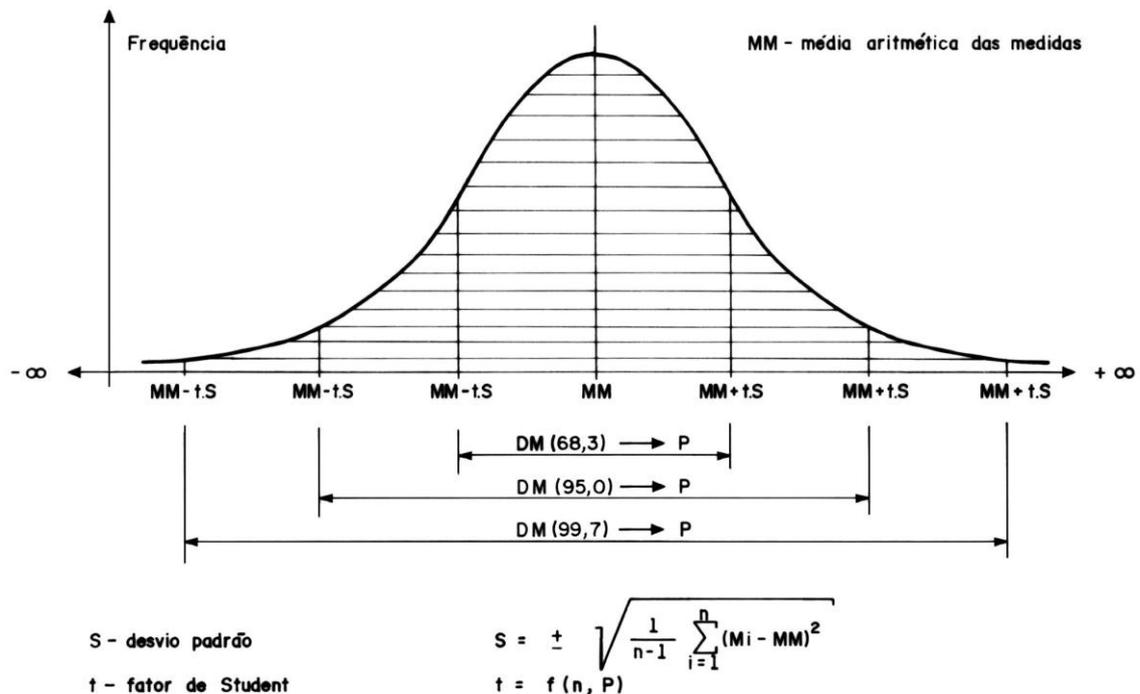


Fig. 2.2 - Curva de distribuição normal (Curva de Gauss)

Na prática, as P normalmente utilizadas são /5, 6/:

- 68,3 % aplicada na física e na agrimensura, onde o número de amostras geralmente é pequeno.
- 95,0 % é a P mais usual segundo normas técnicas como ASTM para produtos derivados de petróleo ou DIN para indústrias de óleo mineral e têxtil. Em particular na Inglaterra, as indústrias em geral conjuntamente com os Institutos de Tecnologia adotaram este valor.
- 99,7 % na biologia há muito tempo vem sendo exigida esta elevada P. Na física, tratando-se da determinação de constantes internacionais também se emprega esta P.

Considerando que os fabricantes de SM em geral adotam P de 95,0% para informar as DM, também na qualificação de SM é recomendável o seu uso. A DM com P de 95,0% é calculada conforme segue:

$$DM(95) = \pm 1,96 \cdot \sigma, \text{ onde } \sigma \text{ é o desvio padrão da população} \quad (2.7)$$

ou

$$DM = \pm t \cdot s, \text{ onde "s" é o desvio padrão experimental} \quad (2.8)$$

sendo "s" usado sempre que temos um limitado número de amostras, juntamente com o fator de segurança estatístico "t" de Student, onde:

$$t = \text{função}(n, P = 95\%), \text{ sendo "n" o número de amostras} \quad (2.9)$$

2.2 FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA E A CURVA DE ERROS

A FT real representa efetivamente o comportamento metrológico de um SM ao longo da sua FO. Ela corresponde à relação existente entre a GM e o valor da M, sendo a resposta do SM representada por uma MM associada a uma parcela de $DM(P)$, atribuindo, assim, à MM uma faixa de valores dentro da qual se encontra o valor da GM com uma P (em geral 95,0%).

Para grandezas corporificadas (blocos padrão de comprimento, massas padrão, fluidos com viscosidade de padrão, placas de dureza padrão, etc.), a FT é o valor efetivo ao qual está associada uma parcela de indeterminação que especifica uma faixa de valores dentro da qual se encontra o valor verdadeiro da GM.

A FT pode ser descrita em forma de:

- Relação numérica entre o sinal de entrada ($X_e = GM$) e o sinal de saída ($X_s = M$) em forma de tabela, onde a diferença de $X_s - X_e$ corresponde ao E_s do SM. Esta é, sem dúvida, a forma mais simples de representar a FT após o levantamento dos dados na calibração, com envolvimento de simples cálculos aritméticos.
- Equação matemática ajustada aos valores GM x M levantada na calibração com polinômios de grau k ($k = 1$ a 5). Sua aplicação é vantajosa pela obtenção de qualquer valor ao longo da faixa de operação (FO) do SM. Pode ser alcançado um comportamento mais próximo possível do real quando o polinômio ajustado é de grau mais elevado, 2 a 5, desde que comprovado com dados experimentais.
- Gráfico de GM x M, da FT nominal e real. Este gráfico torna difícil interpretar os

resultados, dada a proximidade das FT em função da pequena ordem de grandeza dos E em relação à FO considerada no SM (fig. 2.3.a).

Todas as formas acima descritas não permitem a visualização (interpretação) imediata dos E de indicação do SM, recomendando-se usar uma forma particular de representar graficamente a FT real, que é através da curva de erros (CE) (fig. 2.3.b). Ela amplia a relação entre X_e e X_s através do traçado de X_s versus E, sendo a escala de E selecionada convenientemente para representar na FO, parâmetros como: E_s , DM, histerese (H) e linearidade.

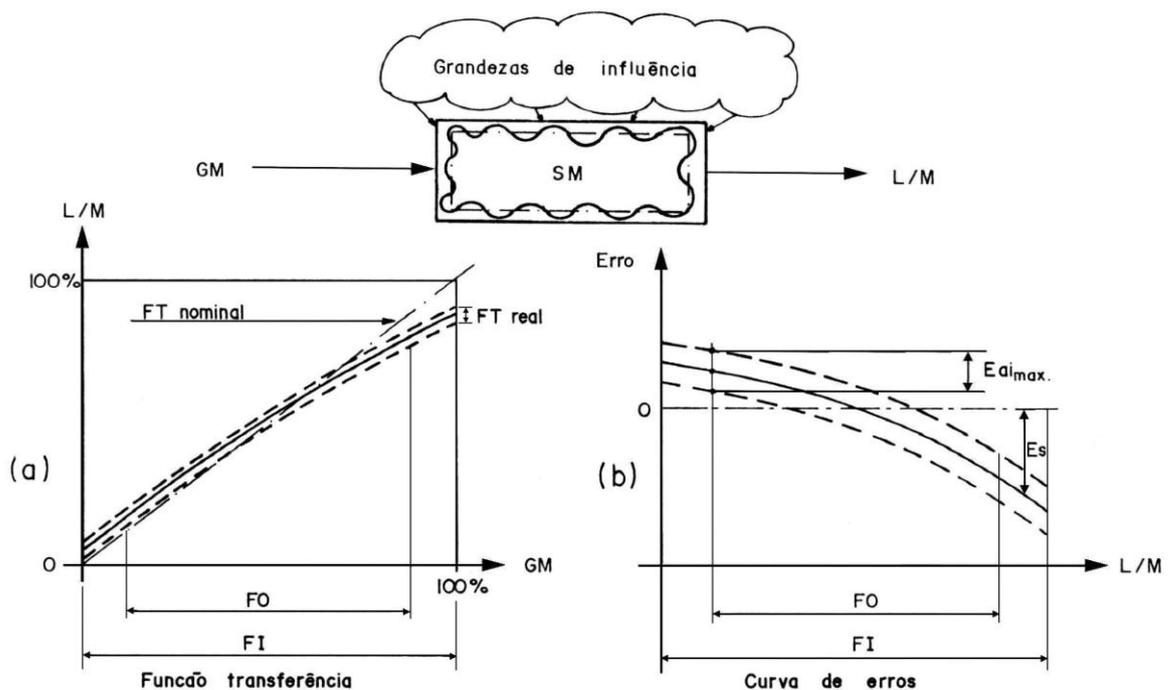


Fig. 2.3 - Formas gráficas de representar a FT, E_s e E_a

2.3 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Com intuito de estabelecer clareza às análises contidas neste trabalho, são definidos e comentados os principais parâmetros operacionais de um SM /4/.

2.3.1 Faixa de indicação (FI)

É o intervalo entre o menor e o maior valor que pode ser indicado pelo SM.

Por exemplo, para o SM analógico da figura 2.4.a, a FI corresponde a faixa de 0 a 100%.

Em um SM digital a FI corresponde ao número de dígitos com o respectivo valor máximo que cada um pode assumir (fig. 2.4.b). Um voltímetro digital de 3 1/2 dígitos tem, por exemplo, uma FI máxima de (-1999 a +1999) V. Se o voltímetro for de 4 dígitos, a FI máxima será de (- 9999 a + 9999) V.

2.3.2 Faixa de operação (FO)

É o intervalo entre o menor e maior valor da GM, na qual o SM opera segundo especificações metrológicas estabelecidas.

Na figura 2.4.a, o SM com indicador analógico apresenta as regiões inicial e final da FI achuradas, subentendendo-se que a FO é de (10 a 90)% da FI.

Num termômetro com indicação digital e termopar do tipo "T", tem-se como FI mais ou menos 3 dígitos, correspondendo a uma FI de (-999 a +999) °C, porém a FO é limitada pelo desempenho metrológico do termopar para o intervalo de (- 184 a 370) °C /6/.

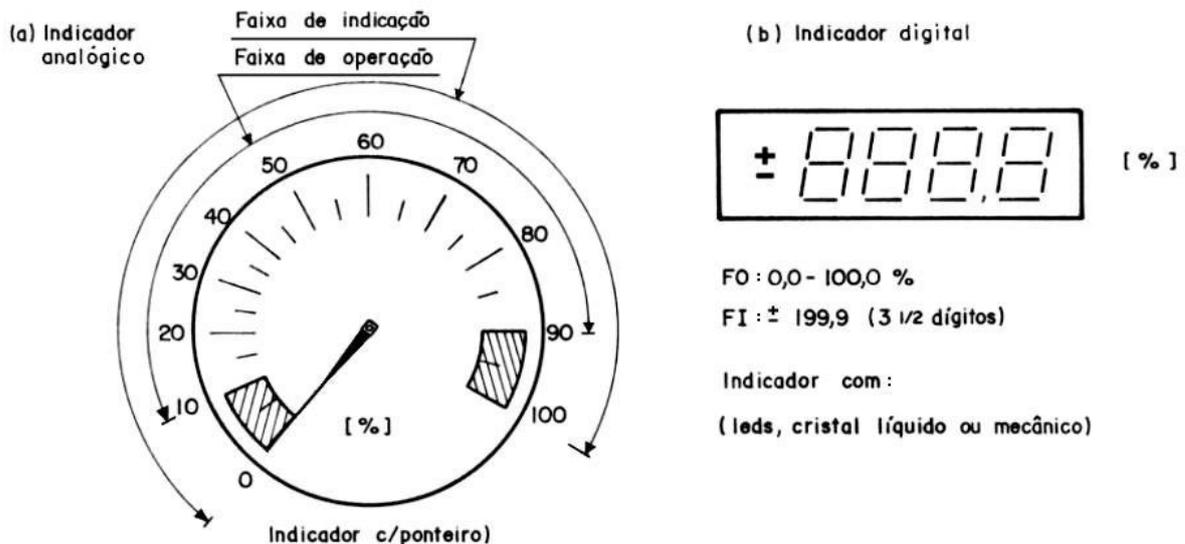


Fig. 2.4 - Caracterização da FI e FO de um SM

Muitos instrumentos não trazem qualquer especificação quanto à FO efetiva, valendo em princípio as especificações dadas por normas técnicas ou considerando-se a FO igual a FI.

2.3.3 Divisão de escala (DE) e incremento digital (ID)

Em instrumentos de indicação analógica as leituras em geral são obtidas a partir da posição de um elemento de referência (ponteiro) em relação a uma escala. O parâmetro "divisão de escala" corresponde ao valor nominal da variação da leitura entre dois traços adjacentes da escala.

Nos instrumentos de indicação digital, inexistente o parâmetro divisão de escala, adotando-se o ID correspondendo à variação do dígito menos significativo. Deve-se atentar para o fato de que nos indicadores digitais a variação do último dígito não é sempre unitária. Com freqüência a variação é de 5 unidades e algumas vezes de 2 unidades de indicação.

2.3.4 Resolução (R)

É o menor valor de variação da GM que o usuário do SM consegue identificar.

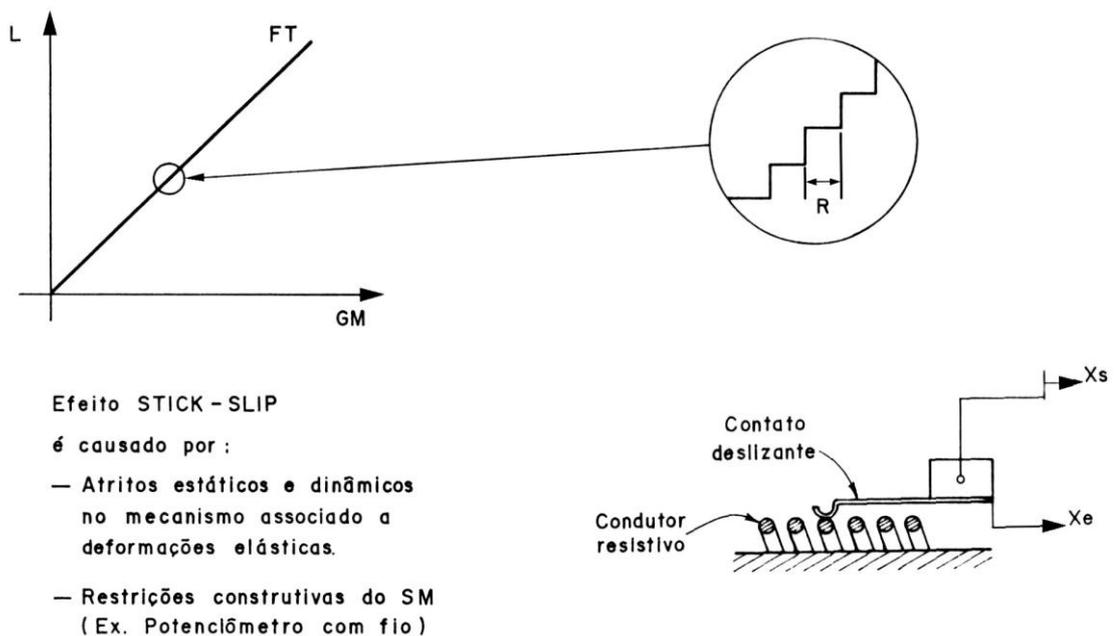


Fig. 2.5 - Resolução do SM

Recomenda-se adotar valores fracionários da DE na proporção de 1/2, 1/5 e até 1/10, ou então, quando se tratar de sistemas mecânicos, limitar-se ao passo provocado pelo efeito Stick-Slip (fig. 2.5).

Em SM com indicação digital a R corresponde ao incremento do dígito menos significativo.

2.4 CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS ESTÁTICAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Apresenta-se a seguir uma série de definições concernentes ao comportamento metrológico estático do SM, as quais facilitarão a interpretação da FT.

2.4.1 DM para P = 95,4%

O valor da DM não é constante em toda a FO do SM, já que as causas dos E_a têm diferente grau de atuação ao longo da mesma.

No exemplo da figura 2.6 podem ser observadas as leituras obtidas em vários ciclos de uma calibração e a DM correspondente para cada ponto de medição. Os vários ciclos de medição na ordem em que foram levantados (fig. 2.6.a), caracterizam a existência de E_s progressivos (deslocamento de zero), em função, por exemplo, da influência da variação da temperatura durante o levantamento de dados da calibração. Na posterior utilização do SM sob as mesmas condições de ensaio o resultado de uma medição seria afetado pela $DM(P\%)$ conforme consta na figura 2.6.b.

2.4.2 Sensibilidade (S_b)

É a relação entre a variação do sinal de saída (L) correspondente à variação unitária do sinal na entrada (GM). Para SM lineares do tipo $y = ax + b$, a S_b é constante (fig. 2.7.a). Para os SM não lineares, a S_b é variável, e corresponde ao coeficiente angular da tangente em cada ponto da FT (fig. 2.7.b).

Nos casos em que um SM indica leituras (L) na mesma unidade de M da GM, leva a concluir que a S_b é unitária, deixando este parâmetro de ser elemento base de caracterização do SM.

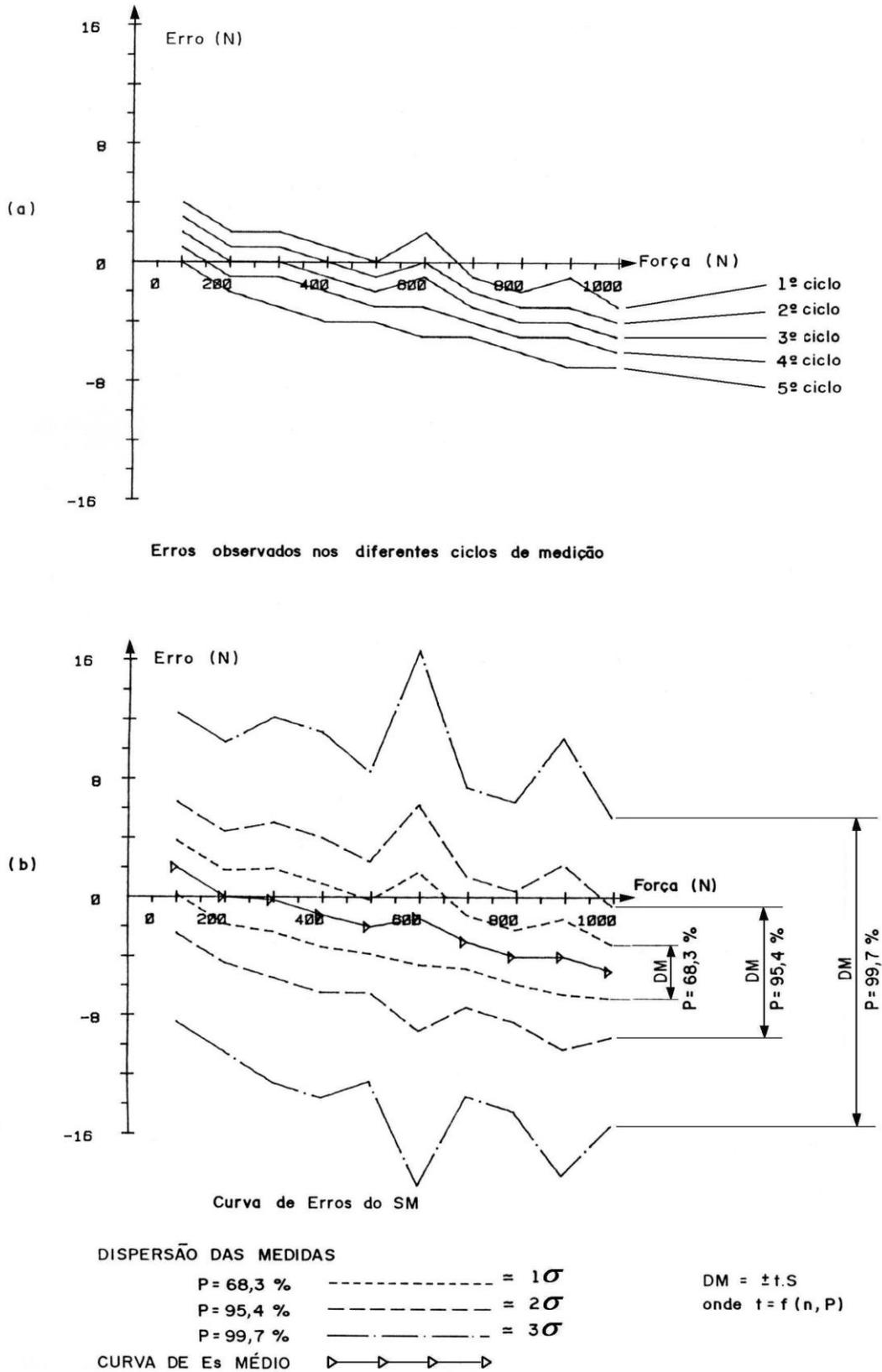


Fig. 2.6 - Caracterização dos erros aleatórios. Dispersão das medidas para P = 68,3%, P = 95,4% e P = 99,7%

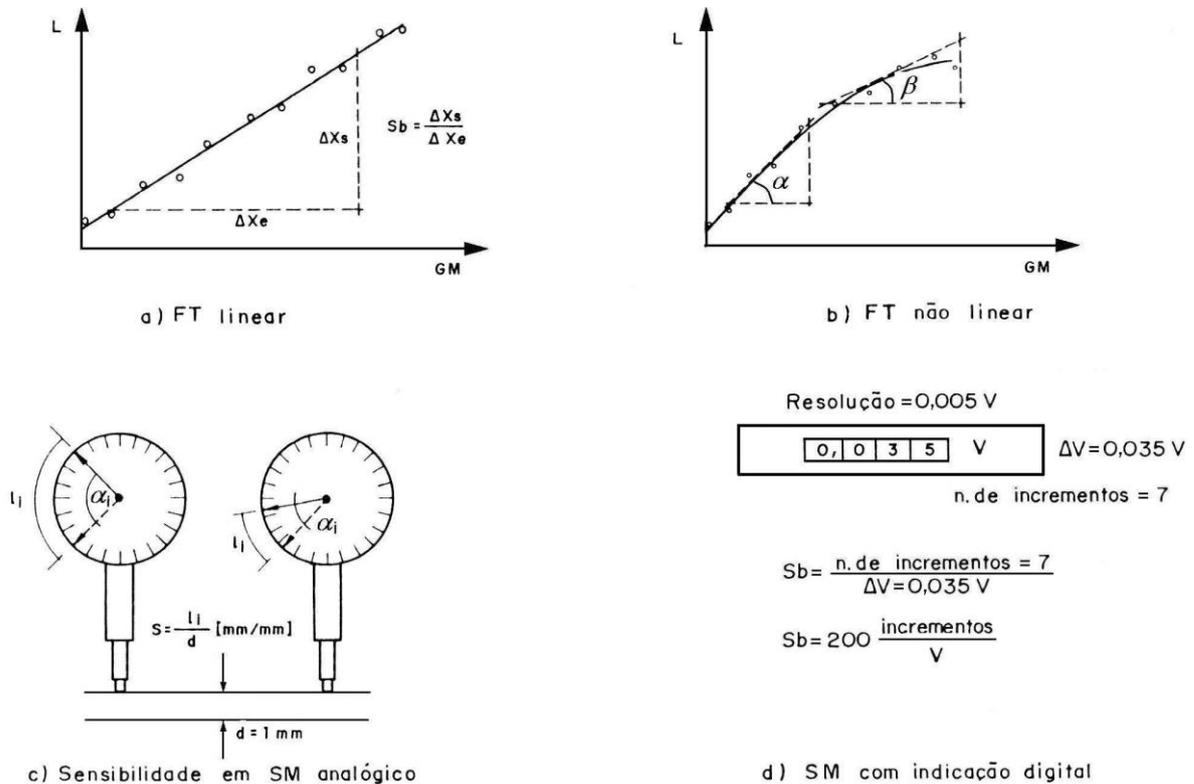


Fig. 2.7 - Definição de S_b de um SM

Isto pode ser contornado se for considerado, por exemplo:

a) o deslocamento efetivo do ponteiro indicador, em "mm", junto à escala graduada de um SM deslocamento do tipo "relógio comparador", quando submetido a um deslocamento, em "mm", no conjunto sensor/cursor (fig. 2.7.c). Logo a S_b será:

$$S_b = (\Delta L \text{ ponteiro} / \Delta L \text{ cursor}) = 1000/1 \text{ [mm/mm]} = 1000 \text{ [mm/mm]}$$

b) Num voltímetro digital a S_b corresponde ao número de ID ocorridos no mostrador quando ocorrer a variação unitária da tensão elétrica (ΔV) submetida ao SM (fig. 2.7.d). Logo a S_b será:

$$S_b = (\text{Número Incrementos} / \Delta V) = (7 / 0,035) \text{ [ID / V]} = 200 \text{ [ID / V]}, \text{ onde V é a tensão elétrica.}$$

A S_b é um parâmetro normalmente empregado para caracterizar transdutores (T). Alguns fabricantes de SM fornecem seus T com valores de S_b fixa, o que permite a intercambialidade dos mesmos, bem como na possibilidade de uma unidade de tratamento de sinal operar de forma automatizada (com chaveamento) com vários T. Como exemplos podem ser citados, SM de deslocamento "tipo indutivo" e ou SM de temperatura com T dos tipos termopar ou termorresistor.

2.4.3 Erro de linearidade (EL)

Expressa a não linearidade do SM, indicando o E_s máximo em relação a um comportamento linear idealizado.

Quando se trata de SM utilizados em medições atingidas por valores crescentes e decrescentes da GM, deverá ser considerada a curva média entre os valores ascendentes e descendentes /2/.

Existem basicamente três formas diferentes de determinar o EL, isto em função das diferentes formas de estabelecer a posição relativa da reta de referência (fig. 2.8) /2, 7/:

a) Linearidade terminal: corresponde ao máximo afastamento da FT à reta de referência, que é estabelecida pelos pontos inicial e final da FT, nos limites correspondentes à FO (fig. 2.8.c).

b) Linearidade pelo método dos mínimos quadrados (mmq): corresponde ao maior afastamento da FT à reta de referência estabelecida através de uma regressão linear pelos pontos da FT (fig. 2.8.d).

c) Linearidade independente: corresponde à metade do menor afastamento possível entre duas retas paralelas ajustadas à FT real, de forma que a faixa definida por elas contenha todos os pontos da FT (fig. 2.8.e).

O método dos mínimos quadrados é o que melhor distribui os pontos da CE à reta de referência, sendo este o mais recomendável para expressar a EL do SM. Todavia envolve cálculos repetitivos, que em processamento manuais tornam-se morosos.

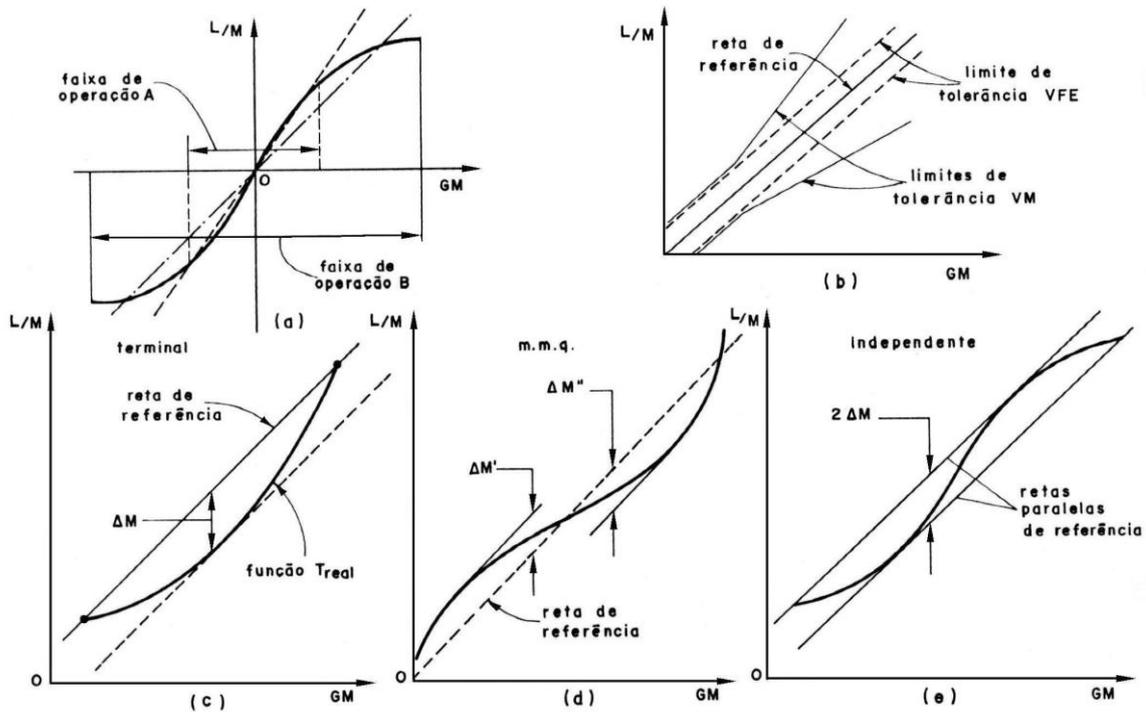


Fig. 2.8 - EL. Influência da FO sobre a linearidade

Os demais métodos são facilmente aplicáveis quando há disponibilidade da CE do SM, permitindo, após a traçagem da reta de referência, detectar de imediato EL, embora com menor representatividade em relação ao mmq.

2.4.4 Histerese (H)

É a diferença entre as leituras de um SM para um mesmo valor da GM, quando este é atingido por valores ascendentes e por valores descendentes.

A H poderá ter valores distintos se o levantamento de dados é parcial ou total com relação a FO.

Em SM mecânicos a H é causada por GI como atritos, folgas e deformações (fig. 2.9. a, b, c, d).

2.4.5 Erro inicial (Ei)

Corresponde ao atraso de indicação da leitura no início da FI do SM, quando a GM vai lentamente sendo incrementada (fig. 2.10).

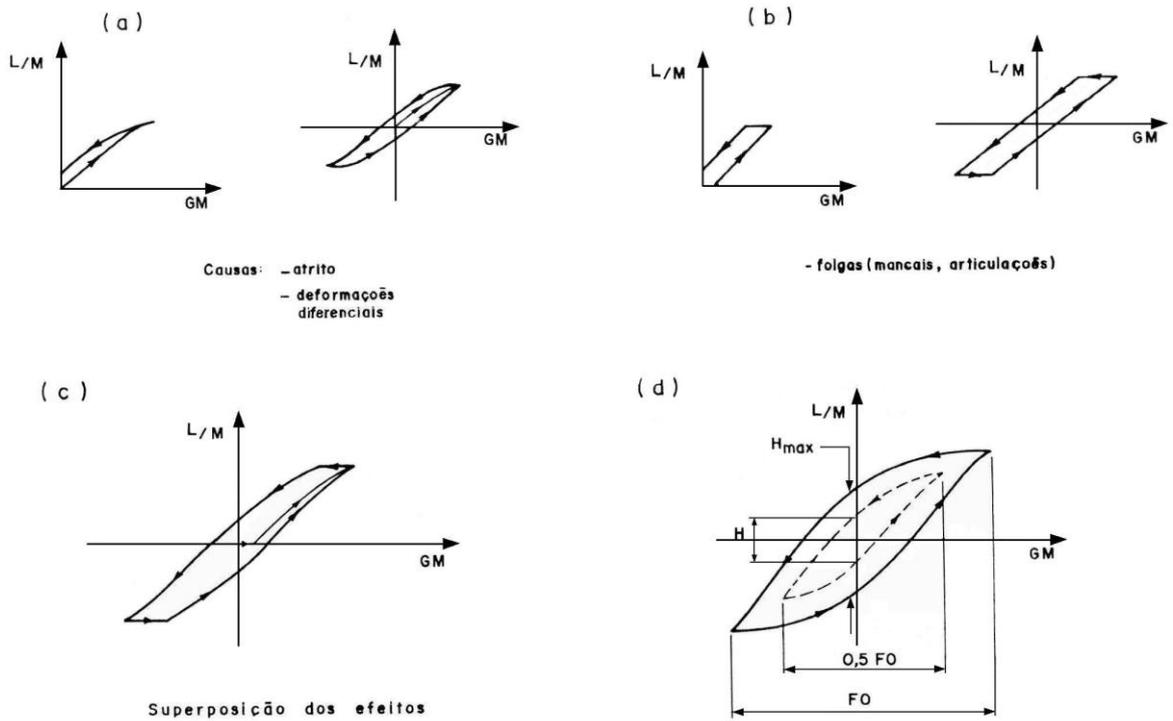


Fig. 2.9 - Histerese. Causas e efeitos

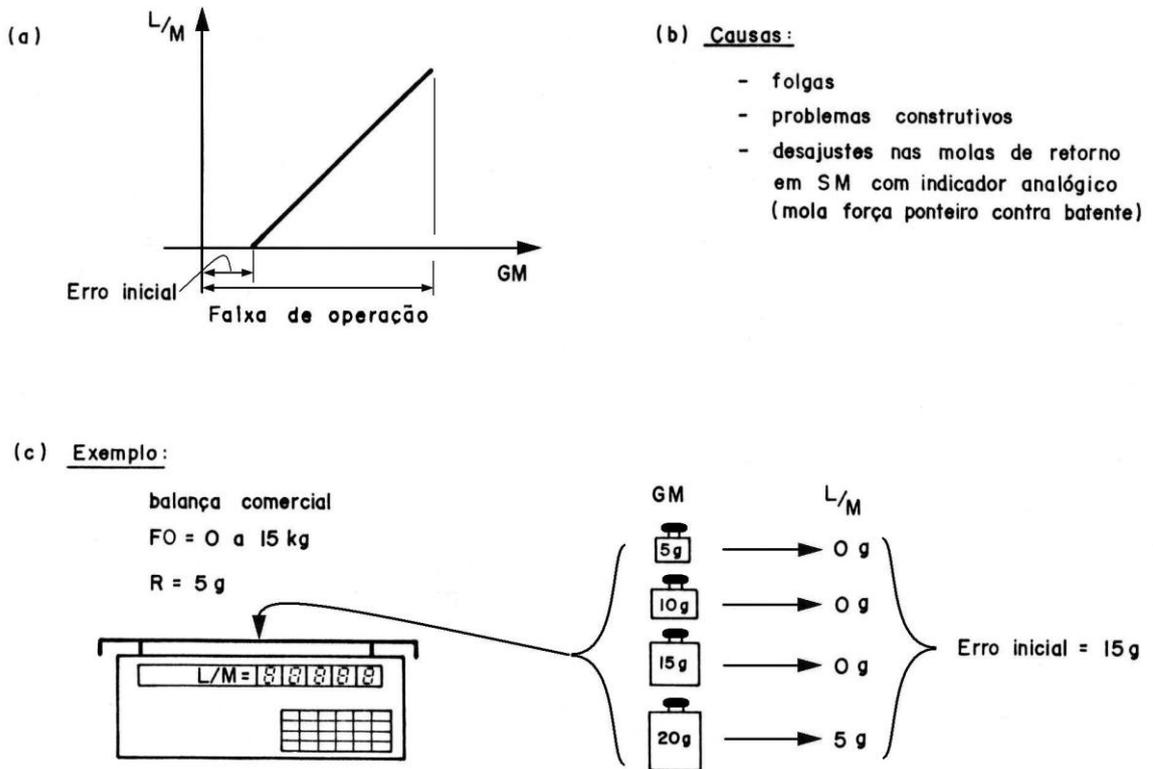


Fig. 2.10 - Ei de indicação da balança

2.5 CARACTERIZAÇÃO DA INSTABILIDADE DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA

A obtenção de resultados confiáveis na determinação do valor de uma GM depende não só dos desvios da FT real em relação à FT nominal, mas também da estabilidade da primeira no decorrer do tempo.

As características metrológicas dos SM, em geral, sofrem alterações, seja em função do tempo ou mesmo de outras grandezas de influência, devendo-se caracterizar estas variações para:

a) Sistemas de medição, onde ocorrem:

- Flutuações, decorrentes das interferências introduzidas pelas GI sobre a FT, que apresenta um comportamento sistemático em relação à GI; no entanto esta é tipicamente aleatória em função de oscilações em geral, de curta e média duração;

- Alterações da FT de carácter permanente, representando uma deterioração do comportamento ao longo tempo; geralmente depende das condições de uso intensivo do SM.

b) Grandezas corporificadas

Padrões corporificados, como Blocos Padrão (BP) de comprimento, desempenos e outros, sofrem alterações dimensionais com o tempo, em função do envelhecimento do material (acomodação da rede cristalina formada pelas moléculas do material ferroso) ou mesmo devidos à infiltração de pequenas moléculas (umidade do ar) nos vazios intersticiais de desempenos de granito alterando a planicidade do mesmo /8/.

Quando utilizados intensivamente, os padrões corporificados sofrem alterações dimensionais devidas ao desgaste sofrido pelo atrito mecânicos com outros elementos. Ambos os fatores correspondem a alterações permanentes.

Flutuação das características de grandezas corporificadas podem ocorrer principalmente, em função da variação de temperatura com o tempo, de forma homogênea ou não homogênea.

Para caracterização das flutuações e alterações propõem-se os parâmetros apresentados na seqüência.

2.5.1 Flutuação do zero (FZ)

É a característica do SM que representa a componente das flutuações da FT na forma de deslocamentos paralelos (fig. 2.11.a). Seu efeito é observado mais nitidamente junto ao zero, sob a forma de Ea.

Causas e exemplos de FZ:

- variações de temperatura;
- oscilação de tensão;
- variação da pressão atmosférica.

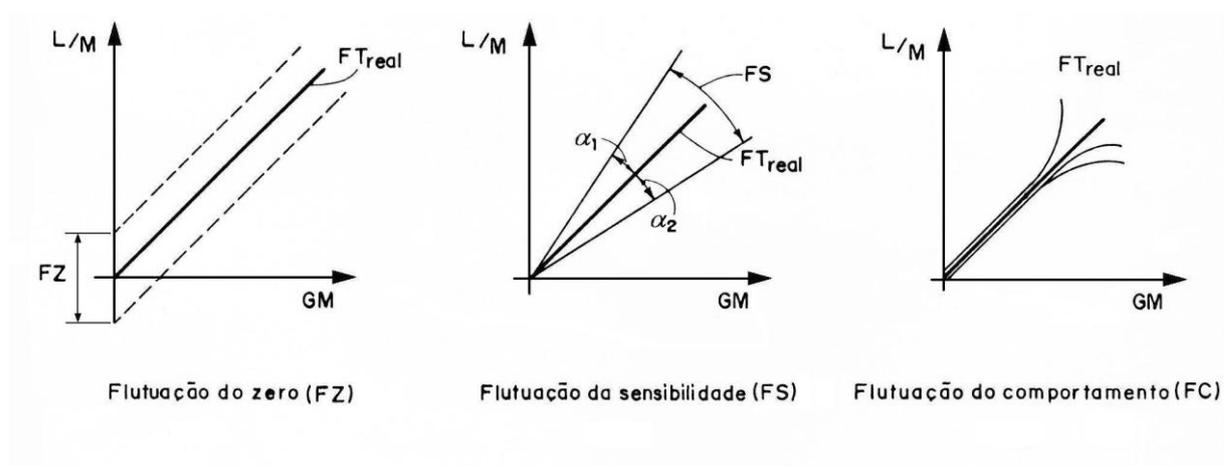


Fig. 2.11 – Flutuação do zero, sensibilidade e do comportamento

2.5.2 Flutuação de sensibilidade (FS)

É a característica do SM que representa a componente das flutuações da FT na forma de deslocamentos angulares, isto é, na variação da sua Sb (fig. 2.11.b). Tem como consequência a introdução de Ea mais acentuados junto ao valor final de escala do SM.

Causas da FS:

- variações de temperatura alteram os valores de resistores de realimentação de amplificadores;
- variações de temperatura alteram o módulo de elasticidade de elementos elásticos de transdutores de força e anéis dinamométricos.

Causas da AZ:

- deformações permanentes causadas por sobrecarga do SM;
- atritos elevados por falta de lubrificação;
- deslizamentos do ponteiro sobre o eixo;
- impactos ou choques mecânicos, provocando desajustes no mecanismo indicador;
- deterioração do desempenho de componentes eletrônicos do SM, como a alteração dos valores efetivos de resistências em função de superaquecimentos, curto-circuitos em capacitores em função de utilizações esporádicas, etc..

A maioria dos SM eletro-eletrônicos, alguns mecânicos e outros, permitem um fácil ajuste do zero quando ocorrer AZ, possibilitando eliminar seu efeito.

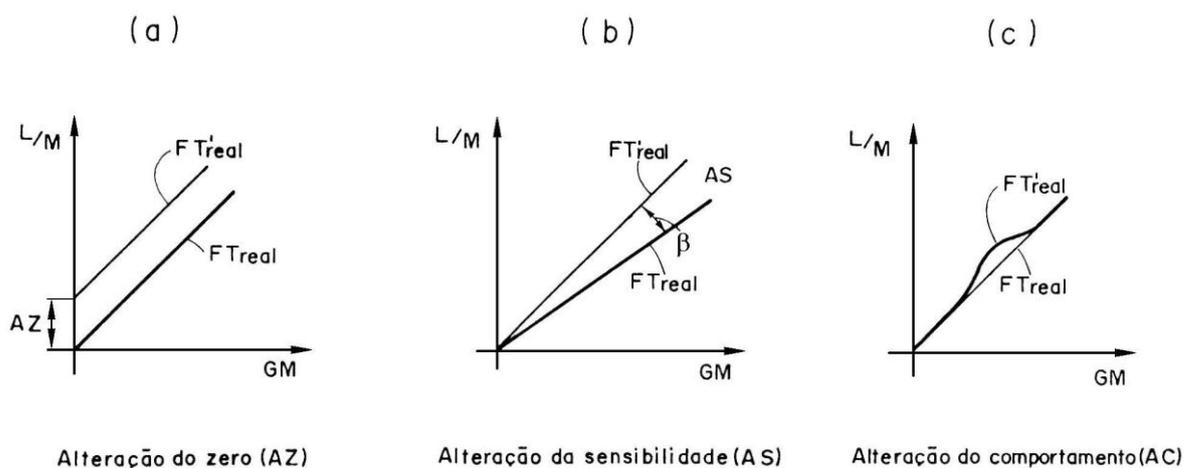


Fig. 2.13 – Alteração do zero, sensibilidade e comportamento dos SM

2.5.5 Alteração da sensibilidade (AS)

Consiste na modificação permanente do comportamento da FT na forma de um deslocamento angular, ou seja, da S_b (fig. 2.13.b).

Causas da AS:

- desajustes no mecanismo de amplificação de SM mecânicos;
- alteração no comportamento de componentes eletrônicos (amplificadores, por exemplo), em função da deterioração por umidade, conexão eletrônica, etc..

2.5.6 Alteração no comportamento (AC)

Consiste na mudança permanente da FT do SM, que altera sua forma, caracterizada especialmente através do EL (fig. 2.13.c).

Causas da AC:

- desgaste localizado em função do uso intensivo do SM em torno de uma região particular da FO;
- atritos acentuados em regiões preferenciais da FO, por exemplo, quando o ponteiro de um voltímetro enrosca em torno de um valor da FO.

2.6 COMPORTAMENTO DINÂMICO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Quando a GM é variável no tempo (GM(t) ou GM dinâmica), caso freqüente na monitoração e controle de processos, é importante que o SM informe o valor da GM com mínimas distorções. Para tanto, aspectos quanto ao comportamento dinâmico do SM devem ser considerados.

Os erros dinâmicos (fig. 2.14) acontecem devido às inevitáveis absorções e liberações de energia do tipo elétrica, térmica ou mecânica, a acelerações e desacelerações das massas dos elementos móveis, a atritos, amortecimentos e outras causas decorrentes de limitações construtivas dos SM /1,9/.

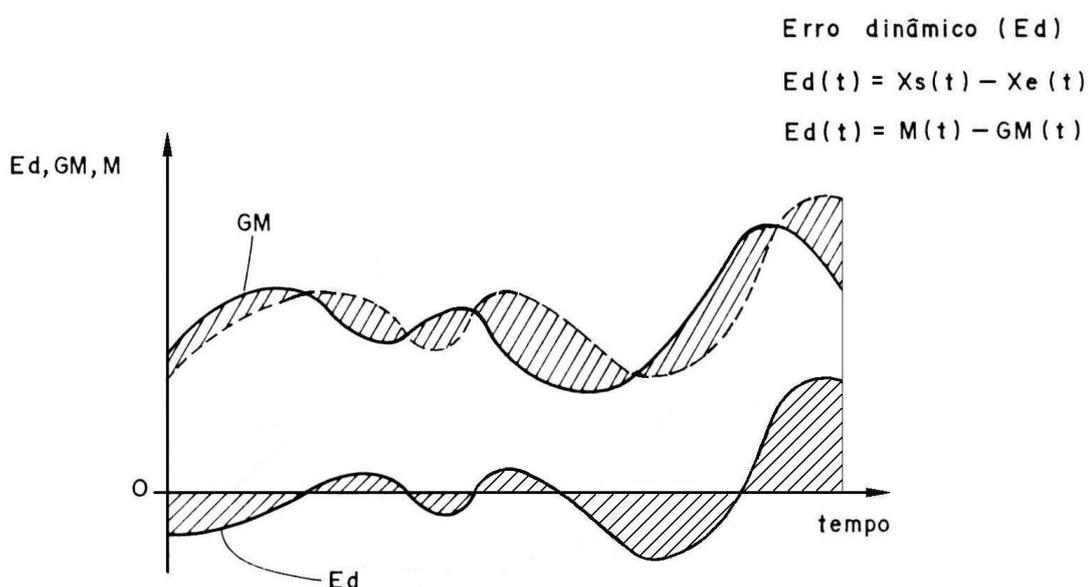


Fig. 2.14 - Definição de erro dinâmico

Na análise de um SM quando a GM é variável no tempo, deve-se considerar no equacionamento do problema as grandezas envolvidas, bem como suas relações com o tempo. Assim sendo, o comportamento dinâmico é, em geral, descrito segundo uma equação diferencial, enquadrando os SM como sendo de ordem 0 (zero), 1 (um) e 2 (dois) /3, 9/.

Para uma comparação mais efetiva entre diversos SM, é usual resolver as equações diferenciais para funções de entrada bem definidas. Estas são normalmente do tipo degrau ou senoidal /3, 10/.

A solução do comportamento dinâmico pode então ser obtida a partir de modelos matemáticos onde as equações diferenciais podem ser resolvidas com auxílio de Funções de Transferência de Laplace, ou através de simulação digital computadorizada, ou ainda segundo procedimentos experimentais.

2.6.1 Classificação do sistema de medição

O comportamento dinâmico característico do SM pode ser descrito através de equações diferenciais de:

a) Ordem 0 (zero): quando o X_s a cada instante é proporcional ao X_e . A equação geral simplificada é dada por:

$$a_0 \cdot X_s = b_0 \cdot X_e \quad (2.10)$$

onde $S_b = \frac{b_0}{a_0} = S_b \text{ estática}$ (2.11)

Por exemplo, um medidor de deslocamento potenciométrico (fig. 2.15) energizado com um valor de tensão U constante fornece uma tensão diretamente proporcional ao deslocamento X do cursor, de valor:

$$u = (X / l) \cdot U \quad \text{ou} \quad u = S_b \cdot X \quad (2.12)$$

Onde a S_b estática do SM é:

$$S_b = U / l \text{ V/mm} \quad (2.13)$$

Este potenciômetro foi idealizado como sendo puramente resistivo, quando efetivamente ocorrem pequenas indutâncias e capacitâncias que afetam a resposta do SM.

Quando aplicados para deslocamentos lentos, as indutâncias e capacitâncias parasitas são desprezíveis e não afetam significativamente o X_s .

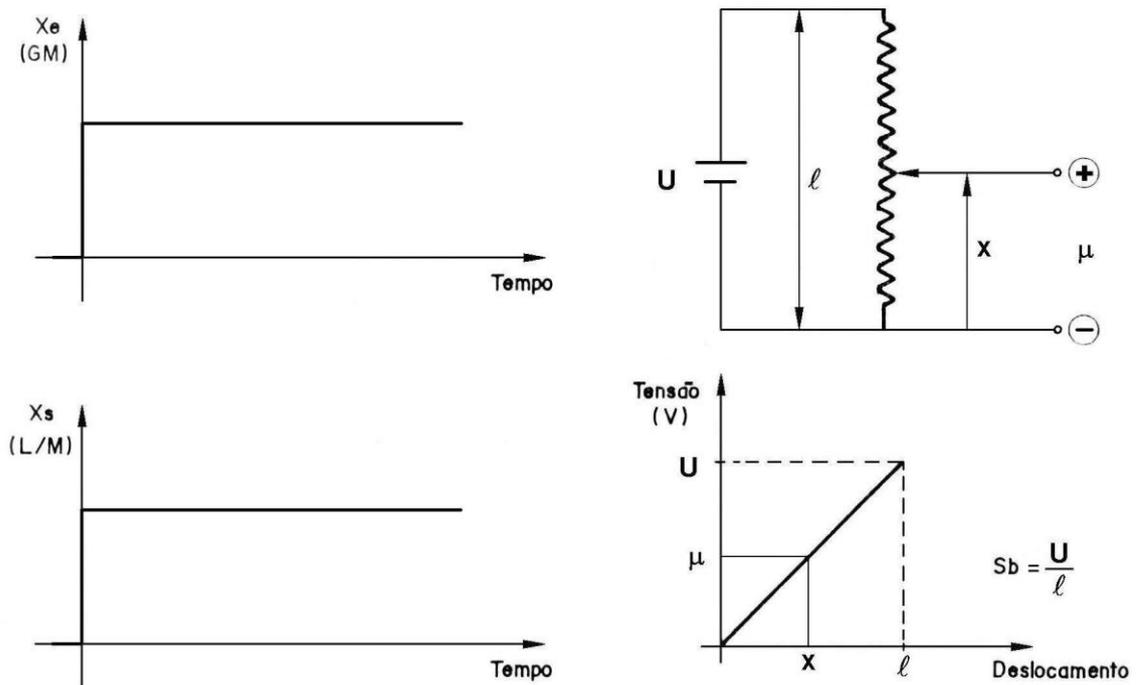


Fig. 2.15 - SM de ordem 0 (zero). Medidor de deslocamento potenciométrico

b) Ordem 1 (um): são aqueles em que o sinal de saída (L/M) é indicado com um certo retardo em relação a GM variável no tempo. A equação geral é dada por:

$$a_1 \cdot \frac{dX_s}{dt} + a_0 \cdot X_s = b_0 \cdot X_e \quad (2.14)$$

Desenvolvendo a equação e redefinindo as constantes como:

$$S_b = \frac{b_0}{a_0} = S_b \text{ estática} \quad (2.15)$$

$$T = \frac{a_1}{a_0} = \text{constante de tempo} \quad (2.16)$$

Para um sinal de entrada em forma de degrau, tem-se um sinal de saída afetado por um retardo segundo uma função que é descrita pela constante de tempo:

$$X_s = S_b \cdot X_e (1 - e^{-t/T}) \quad (2.17)$$

Como exemplo prático, pode-se analisar um medidor de temperatura com termopar. Se o termoelemento é blindado, há necessidade de transferir uma maior quantidade de energia térmica ao mesmo, para que atinja uma certa temperatura. Para um termoelemento do mesmo tipo de material, porém com diâmetro menor (menor massa), a mesma temperatura é atingida com a transferência de uma menor quantidade de energia térmica. Logo para este caso a constante T_e é menor que no caso anterior, resultando numa resposta mais rápida do SM (fig. 2.16).

c) Ordem 2 (dois): são sistemas nos quais, por exemplo, as forças devidas às massas inerciais dos elementos móveis não são desprezíveis, podendo ser descritas pela equação diferencial / 1 , 3/:

$$a_2 \cdot \frac{d^2 X_s}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dX_s}{dt} + a_0 \cdot X_s = b_0 \cdot X_e \quad (2.18)$$

Trabalhando esta equação chega-se a três parâmetros essenciais:

$$S_b = \frac{b_0}{a_0} = S_b \text{ estática} \quad (2.19)$$

$$W_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_n}} = \text{freqüência natural do sistema} \quad (2.20)$$

$$A = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 \cdot a_2}} = \text{fator de amortecimento} \quad (2.21)$$

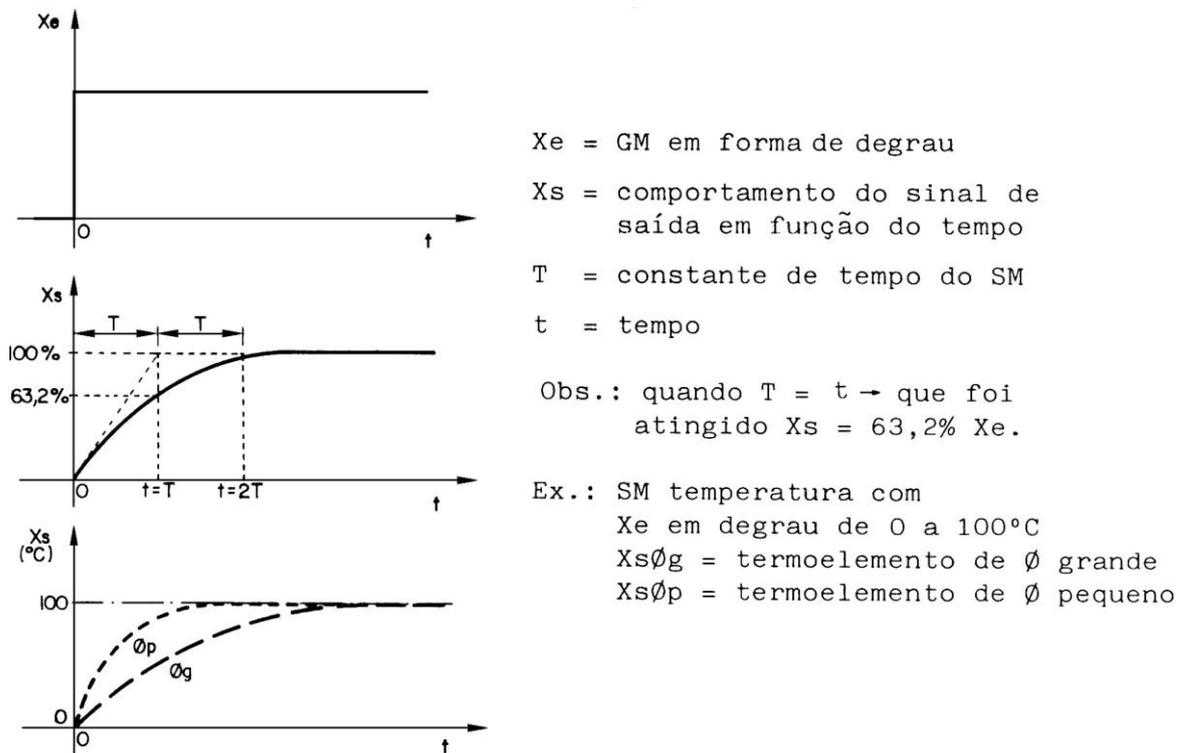


Fig. 2.16 - SM de ordem 1 (um). Medidor de temperatura com termopar

Como exemplo, analisa-se o comportamento de um SM de massa (balança) composta por uma mola, massas (elementos móveis) e amortecedor (fig. 2.17). Para um X_e em forma de degrau, dependendo do grau de amortecimento ajustado na balança, poderão ocorrer três diferentes comportamentos: subamortecido, criticamente amortecido e superamortecido.

2.6.2 Caracterização do comportamento dinâmico

Em função das aplicações mais usuais, submete-se o SM a uma GM(t) em forma de degrau, de impulso, de rampa ou de senoide, a fim de detectar seus erros dinâmicos. Destacam-se como fundamentais a forma em degrau e a senoidal por caracterizarem os tipos de sinais transientes mais comuns.

a) Resposta em degrau unitário.

Usada com maior frequência em função da facilidade de geração do sinal de entrada e da análise do sinal de saída do SM. Largamente aplicada para comparar o desempenho dinâmico entre sistemas de medição. Nas figuras 2.15, 2.16 e 2.17 são mostradas suas aplicações em SM com diferentes ordens.

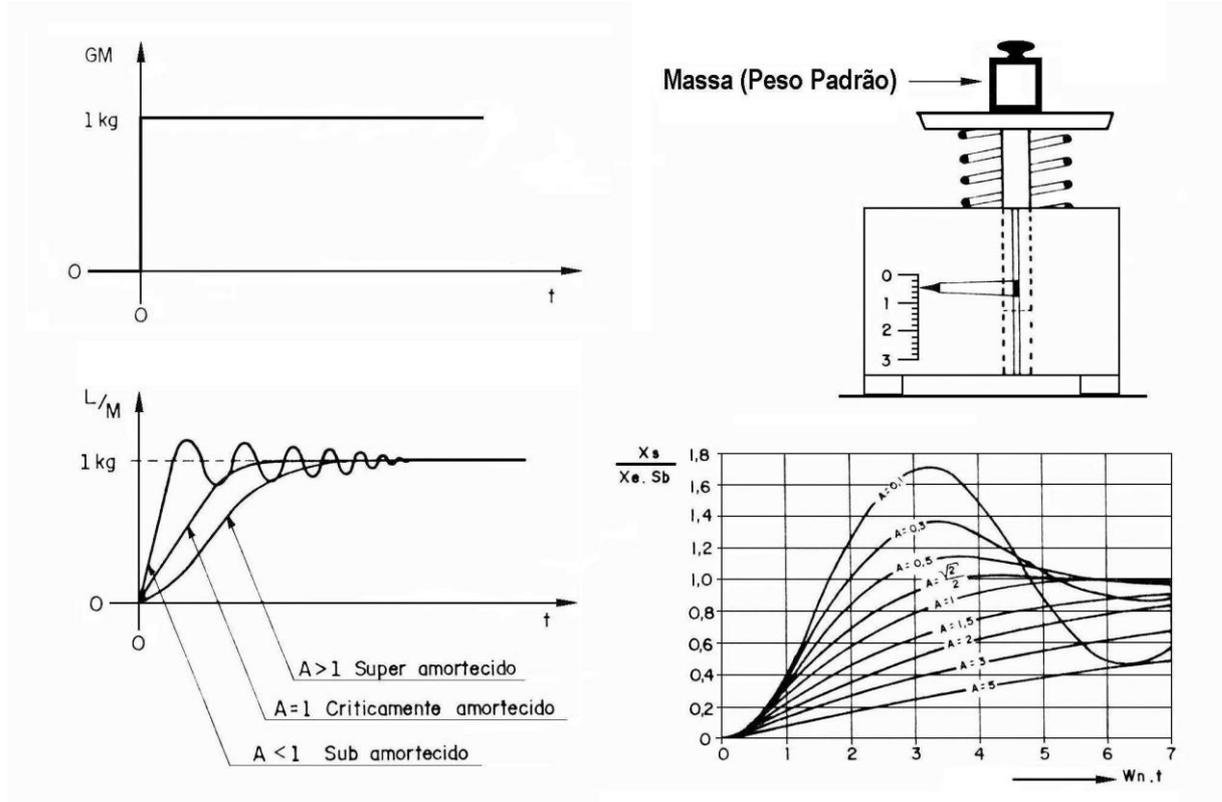


Fig. 2.17 - SM de ordem 2. Medidor de massa (balança) com indicação direta

b) Resposta ao sinal senoidal.

Usada para verificar e caracterizar o atraso de resposta de SM sujeitos a sinais periódicos, submetendo-se o SM a uma onda senoidal do tipo $(A_i \cdot \text{sen} \cdot \omega t)$.

Na figura 2.18.a é mostrado que o X_s está alterado na amplitude e na fase, em relação à onda submetida ao SM. A caracterização do comportamento pode ser feita através de números complexos, onde a cada instante pode-se explicitar as alterações de amplitude e desvios de fase pela representação polar (fig. 2.18.b).

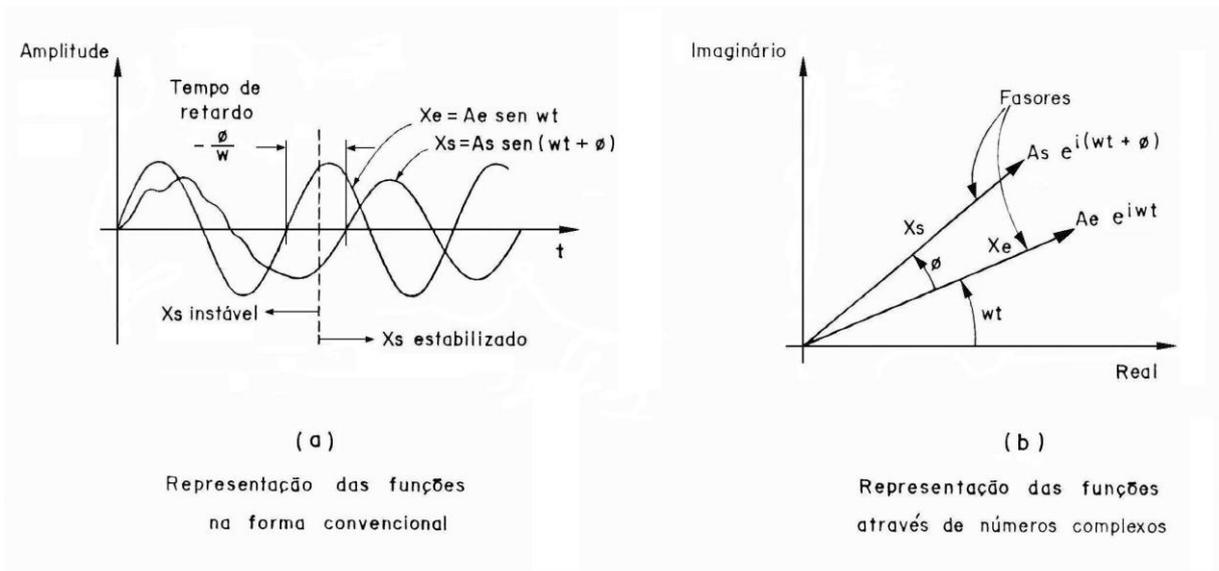


Fig. 2.18 - Resposta ao sinal senoidal

c) Resposta a outros tipos de sinais.

Também são usadas na determinação das características dinâmicas do SM a resposta ao sinal em forma de rampa (fig. 2.19.a) e em forma de impulso (fig. 2.19.b).

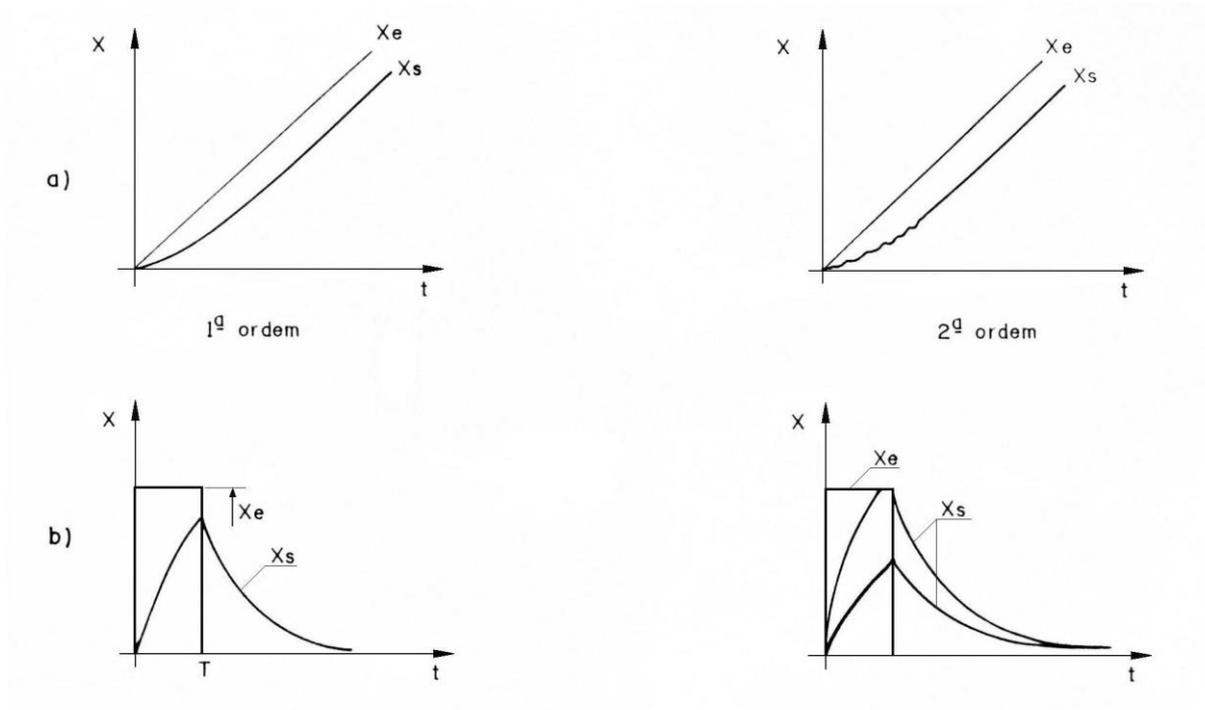


Fig. 2.19 - Resposta ao sinal em rampa e impulso

Para a medição de uma grandeza dinâmica é importante selecionar um SM com comportamento cujos erros não invalidem os resultados. Um dos parâmetros básicos é o tempo de estabilização (TE), que corresponde ao tempo necessário para atingir o valor da GM, com uma faixa de tolerância definida (fig. 2.20). Para sinais em degrau, em geral, a faixa de tolerância é igual a $\pm 5\%$ do valor da GM(t) /1/.

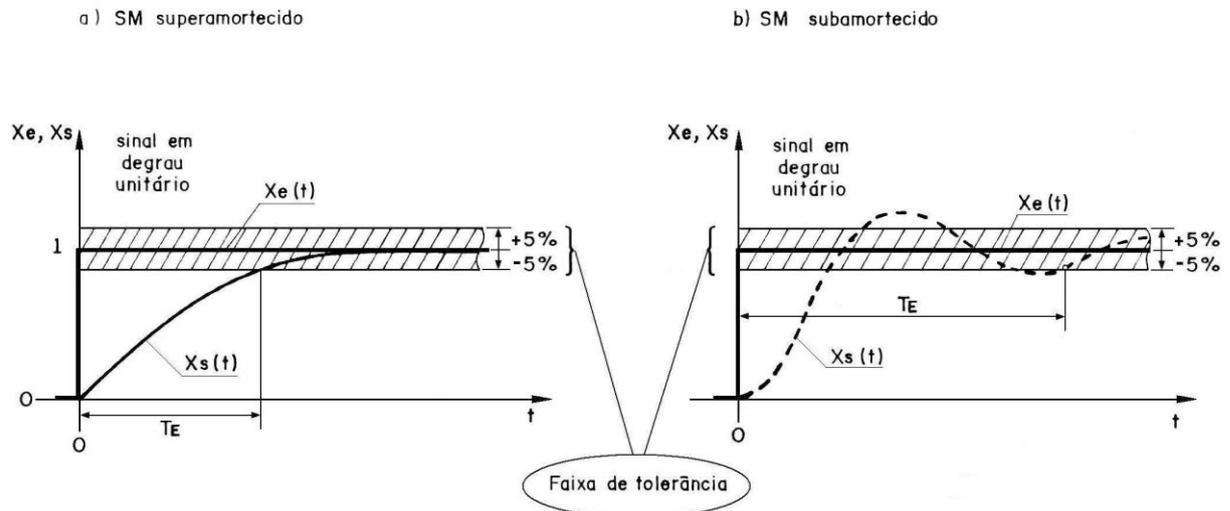


Fig. 2.20 – Tempo de estabilização (TE)

A seguir são relacionados valores típicos de TE para alguns SM usados freqüentemente /1/:

- | | |
|---|------------------|
| - SM elétrico com indicador analógico | 1 a 10 s |
| - Registrador a tinta | 0,1 a 1 s |
| - Registrador com papel termo sensível ou outro | 10 a 100 ms |
| - Registrador ultravioleta | 0,1 a 1 ms |
| - Osciloscópio de raios catódicos | 01, a 10 μ s |

2.7 SISTEMA DE MEDIÇÃO GENERALIZADO

Um SM transforma uma grandeza física, em uma L ou M segundo o comportamento pré-estabelecido pela sua FT.

2.7.1 Módulos

Em geral um SM é composto por três módulos básicos:

a) Transdutor (T): capta a GM, transformando-a num sinal proporcional dos tipos mecânico, hidráulico, pneumático, elétrico ou outro, e o transmite segundo o comportamento descrito pela sua FT.

Exemplo: um transdutor de força extensométrico de um dinamômetro capta o fenômeno físico força em N, através da deformação elástica de um elemento mecânico. Esta deformação é medida com extensômetros de resistência elétrica, obtendo-se com auxílio de uma ponte de Wheatstone, um sinal de tensão elétrica proporcional à força aplicada em N.

Os diversos estágios de geração do sinal são denominados de conversores.

b) Tratamento de sinal (TS): recebe o sinal proporcional gerado pelo T, em geral de pequena intensidade, e o amplifica de forma a ser mais facilmente indicado ou registrado no módulo seguinte. Assume também funções como suprimento de energia auxiliar aos vários módulos, filtragem, integração, processamento de sinais, etc..

Exemplo: uma ponte amplificadora do dinamômetro já citado, transforma o sinal de tensão elétrica (mV) proveniente do T em tensão elétrica de intensidade maior (+ 10 V), alimenta a ponte de Wheatstone do T com uma tensão constante, complementa circuito de 1/2 ponte e realiza filtragem do sinal de medição.

c) Indicador (I): recebe o sinal tratado e o transforma em um sinal inteligível ao usuário, que o assimila na forma de leitura (L). Isto se dá através de indicadores analógicos (com ponteiros indicadores, colunas de líquido, colunas de Led, registradores de sinais eletromagnéticos, etc.), ou indicadores digitais (mostradores digitais de segmentos luminosos ou de cristal líquido, impressoras, contadores mecânicos, etc.).

Exemplo: o indicador para o dinamômetro citado pode ser um voltímetro (digital ou analógico) que tenha uma FO de 0 a ± 10 V, ou ainda um registrador XY, ou mesmo um conversor analógico/digital que permita transferir, através de uma interface, estes dados a um computador.

2.7.2 Comportamento metrológico

Sobre cada um dos módulos de um SM (T, TS, I) atuam as indesejáveis GI, alterando o comportamento metrológico dos mesmos de forma independente, introduzindo parcelas de E que se acumulam e/ou se compensam quando passam de um módulo a outro.

Na figura 2.21 são mostrados os elementos básicos de um moderno SM de deslocamento do tipo eletro-óptico digital.

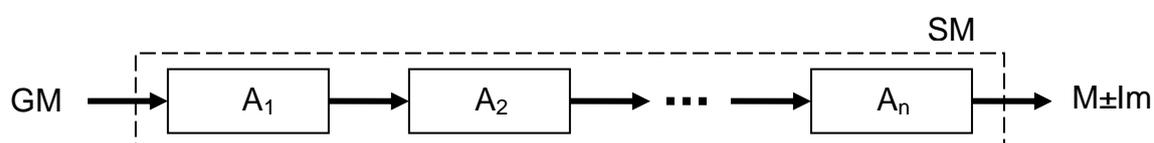
As GI associadas aos problemas de fabricação que podem atuar sobre cada um dos módulos do SM citado são:

a) Transdutor:

- Deformações mecânicas da peça, do sensor, da haste, etc., devidas à força de medição necessária para garantir o contato do sensor com a superfície da peça a medir;
- Atritos nas guias do cursor/transmissor de deslocamento;
- Deformações térmicas devidas a variações de temperatura (escala e haste transmissora de deslocamento);
- Qualidade dos traços da escala eletro-óptica digital (gravação, nitidez, espessura, constância de afastamento dos traços);
- Choques mecânicos, vibrações, umidade, etc., atuando sobre o conjunto fotoeletrônico (fotodetetores, escala, lâmpada, etc.).

b) Tratamento de sinal e indicador. Em função de serem compostos basicamente por componentes e circuitos eletro-eletrônicos, têm como GI:

- Temperatura do ambiente associada a choques térmicos que alteram o comportamento dos componentes eletrônicos, como resistores, capacitores, amplificadores operacionais, conversores, interpoladores, etc.;
- Uso intensivo, ou o não uso por longos períodos de tempo, pode alterar as características de funcionamento dos componentes eletrônicos;
- Umidade relativa do ar e atmosfera salina modificam as impedâncias nos circuitos impressos e nos componentes eletrônicos em geral.



onde: GM = grandeza a medir

A_i = módulos do SM (com $i=1, 2, \dots n$)

M = medida

I_m = Incerteza da Medida

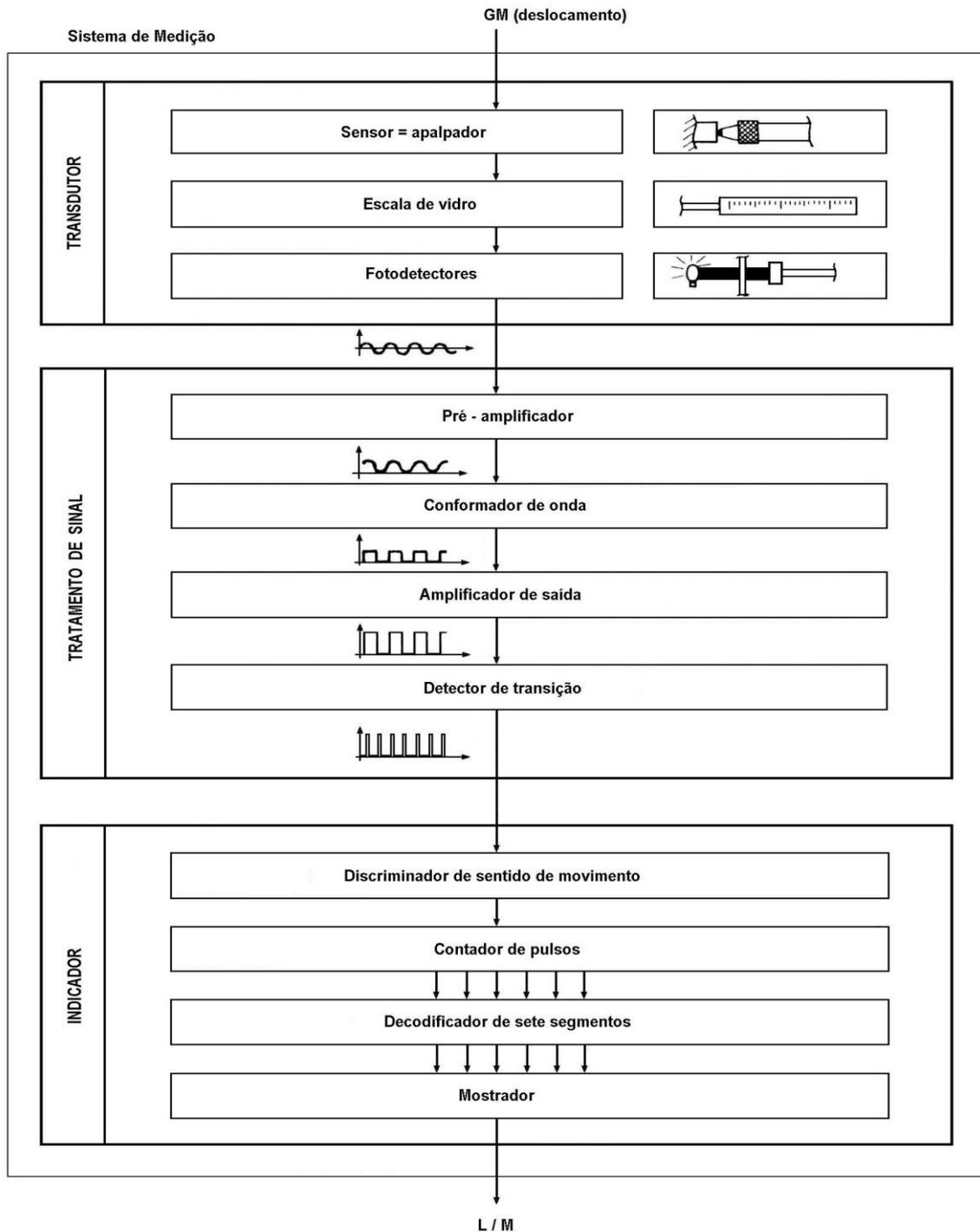


Fig. 2.21 – Elementos de um SM de deslocamento do tipo eletro-óptico digital

Deseja-se saber a Im para dado valor de GM . O comportamento de cada módulo é:



onde: X = sinal de entrada

Y = sinal de saída

ΔY = erros provenientes do módulo A_i .

Os E dos módulos para uma dada condição de medição pode ser caracterizada por seu E_s e pela $DM(95)$. Analisando-se de forma relativa o sinal de medição, tem-se:

$$\epsilon = \frac{\Delta Y}{Y} = \frac{E_s + DM(95)}{Y} = \frac{E_s}{Y} + \frac{DM(95)}{Y} = \epsilon_s + \epsilon_A \quad (2.22)$$

onde: ϵ_s = erro sistemático relativo

ϵ_A = DM relativa (máximo E_a)

ϵ_s e $DM(95)$ são obtidos através da calibração do módulo A_i

Equacionando o problema para um SM linear, partindo dos módulos A_i , tem-se:

$$Y = K_i \cdot X \pm \Delta Y \quad \text{ou} \quad (2.23)$$

$$Y = K_i \cdot X \left(1 + \frac{\Delta Y}{K_i \cdot X}\right) \quad \text{isto é} \quad (2.24)$$

$$Y = K_i \cdot X (1 + \epsilon) \quad (2.25)$$

Para o comportamento nominal em cadeia vale:

$$M = GM (K_1 \cdot K_2 \dots K_n) \quad (2.26)$$

O comportamento real será dado por:

$$M \pm Im = GM [K_1 (1 + \epsilon_1) \cdot K_2 (1 + \epsilon_2) \dots K_n (1 + \epsilon_n)] \quad (2.27)$$

Desenvolvendo a função do erro relativo em série de Taylor obtém-se:

$$\frac{Im}{M} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n + \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 + \epsilon_1 \cdot \epsilon_3 + \dots + \epsilon_1 \cdot \epsilon_n + \dots + \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_3 + \dots \quad (2.28)$$

Considerando que ϵ_i tem valor pequeno, podemos representar:

$$\frac{Im}{M} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n \quad (2.29)$$

Sendo o Es relativo (ϵ_{si}) do SM igual a:

$$\frac{Es}{M} = \epsilon_{s1} + \epsilon_{s2} + \dots + \epsilon_{sn} \quad (2.30)$$

E o Ea máximo relativo (ϵ_{ai}) do SM igual a:

$$\left(\frac{DM}{M}\right)_{Max} = |\epsilon_{a1}| + |\epsilon_{a2}| + \dots + |\epsilon_{an}| \quad (2.31)$$

Como os Ea de todos os módulos considerados no SM dificilmente se manifestam simultaneamente no seu valor máximo e ainda de mesmo sinal, o valor máximo provável da parcela aleatória determinada estatisticamente será:

$$\left(\frac{DM}{M}\right)_{Max.Prov.} = \sqrt{\epsilon_{a1}^2 + \epsilon_{a2}^2 + \dots + \epsilon_{an}^2} \quad (2.32)$$

Logo:

$$\frac{Im}{M} = \left(\frac{Es}{M}\right) + \left(\frac{DM}{M}\right)_{Max.Prov.} \quad (2.33)$$

Comentário: Sendo Es uma parcela de valor conhecido, é importante que o mesmo seja compensado no resultado básico, corrigindo seu valor quando da determinação do resultado da medição.

3. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA

3.1 IMPORTÂNCIA DE UMA METODOLOGIA

A calibração é um procedimento experimental através da qual é determinada a FT real de um SM.

É fundamental que esta seja precedida de um consciencioso planejamento, que induza a um trabalho experimental com a obtenção do máximo de informações sobre a FT e com o mínimo de investimento em termos de tempo de bloqueio do Sistema de Medição a Calibrar (SMC) e do Sistema de Medição Padrão (SMP), e de pessoal altamente especializado.

Com a definição de uma metodologia busca-se a racionalização do planejamento do ensaio, da seleção do SMP, da preparação do experimento, do levantamento e processamento dos dados e da análise dos resultados. Objetiva-se ainda conseguir informações amplas e confiáveis sobre as características metrológicas, destinadas a descrever o comportamento funcional do SM e, de acordo com as necessidades, a otimizar o seu desempenho metrológico através da minimização de erros por meio de ajustes e/ou compensação dos mesmos.

3.2 AÇÕES DE QUALIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

As ações de qualificação de um SM envolvem uma ou mais das operações denominadas: Calibração, Ajustagem Aferição. Cada uma representa um procedimento particular na determinação e/ou otimização das características metrológicas de um SM ou de uma grandeza padrão corporificada.

A seguir serão apresentados os conceitos de Calibração, Ajustagem e Aferição /8/.

3.2.1 Calibração

É a determinação da correlação efetiva entre a M indicada por um SM e o valor

convencionalmente correto da GM.

Para um SM, ou um módulo do mesmo, é o levantamento do comportamento metrológico para um determinado valor da GM ou para uma faixa de valores, usualmente a FO. Para grandezas corporificadas (BP, massa padrão, etc.) ou geradas (pontos de fusão, tensão elétrica padrão, etc.), a calibração corresponde à determinação efetiva da GM.

Exemplos:

- Relação entre a temperatura e a tensão termoelétrica de um termopar;
- Dimensões efetivas de um calibrador de rosca;
- Rugosidade efetiva de um padrão de rugosidade;
- Os erros de um dinamômetro.

3.2.2 Ajustagem

É a operação que visa a minimizar os erros do SM mediante uma operação objetiva de regulação, alterando o comportamento do mecanismo ou dispositivo conversor da GM em L/M, ou seja, modificando a FT do SM.

Para grandezas corporificadas, a ajustagem corresponde a alteração das suas características físicas ou geométricas.

Exemplos:

- Ajustar o fator de amplificação do SM;
- Ajustar o zero do SM;
- Correção do valor da massa padrão pelo adição de uma tara.

3.2.3 Aferição

Corresponde às ações de comprovação de que um SM está operando, ou de que a grandeza corporificada apresenta características segundo especificações estabelecidas por normas e/ou outras determinações legais.

Exemplos:

- Aferição de BP de comprimento;
- Aferição de Máquinas de Ensaio de Materiais (MEM);

- Aferição de balanças comerciais;
- Aferição de SM usados como padrões de calibração nas áreas (força, pressão, temperatura, umidade, tensão elétrica, etc.).

A sua execução é realizada somente por órgãos credenciados (pelo INMETRO no Brasil), mediante a emissão de um certificado de aferição ou a aposição de um selo ou plaqueta de "Aferido".

3.2.4 Importância da calibração

A ajustagem e a aferição, em geral, são precedidas por uma calibração, pois sua realização baseia-se nos E efetivos do SM. Através de uma análise dos resultados da calibração, é possível verificar a adequabilidade de uma ajustagem, bem como fixar os parâmetros ótimos para procedê-la. Há situações em que a qualificação é atendida apenas com a calibração. Quando os E do SM a calibrar satisfazem as tolerâncias especificadas (por normas técnicas, pelo fabricante e outros), o mesmo não necessitará de ajustes.

3.3 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO

O procedimento de determinação dos E (calibração) não é único. Pode-se classificar os métodos em função de algumas características, como é descrito a seguir.

3.3.1 Conhecimento da grandeza aplicada

Para se determinar os E de um SM, é necessário aplicar uma GM conhecida ao mesmo. Isto distingue os métodos de calibração em:

a) Diretos: Quando a grandeza de entrada é realizada por uma grandeza padrão de valor conhecido.

A grandeza padrão deverá ter um valor efetivo conhecido com uma indeterminação que não ultrapasse limites apropriados.

Na calibração de SM pelo método direto pode-se utilizar como padrão:

- massas padrão (peso padrão);
- blocos padrão de comprimento;

- pontos fixos de temperatura (fusão, tríplice, etc.);
- pilhas padrão para geração de tensão elétrica;
- padrões de rugosidade (Ra, RT, e outros);
- placas de dureza;
- máquinas de peso morto (massas padrão e aceleração da gravidade);
- resistores padrão.

b) Indiretos: Quando a GM é gerada através de dispositivos apropriados, sendo seu valor convencional verdadeiro determinado por um SMP.

Quando se utiliza este método, é fundamental que o SMP satisfaça os requisitos do E máximo admissível em relação ao SMC.

3.3.2 Comportamento da grandeza a medir no tempo

O objetivo de uma calibração pode ser o levantamento de E estáticos e/ou dinâmicos.

a) Estáticos - quando o SM mede uma grandeza estável ao longo do tempo.

A calibração estática é a normalmente executada, dado o nível de confiabilidade atingido nos padrões de transferência das grandezas estáticas a medir, e, sobretudo, devido ao controle mais efetivo na transferência da GM. Determinam-se as características metrológicas citadas no item 2.4, as quais permitem avaliar o comportamento da FT real do SM.

Seus resultados valem (com restrições, dependendo do princípio de funcionamento dos módulos dos SM) também para comportamentos quase estáticos e dinâmicos.

d) Dinâmicos - quando os SM são usados para medir grandezas variáveis no tempo (dinâmicas). A calibração dinâmica é relativamente mais complexa. Em função do nível de complexidade de geração da grandeza dinâmica padrão, a calibração dinâmica restringe-se ao trabalho experimental de determinar a resposta a funções dos tipos degrau e senoidal. Ela é imprescindível a SM para força de corte em usinagem, força de impacto em pêndulos automatizados e outros.

Exemplo: SM de pressão piezoelétricos aplicados à motores de combustão interna. O fabricante muitas vezes fornece geradores de sinal que simulam o sinal do T de forma a poder calibrar os módulos restantes do SM pelo método direto.

Em registradores de sinal do tipo x-y, x-t ou y-t, a existência de elementos mecânicos móveis limita sua aplicação a sinais de baixa frequência (3 a 30 Hz). Na calibração dinâmica destes SM são usados geradores de sinais para detectar o tempo de estabilização e outras características dinâmicas.

3.3.3 Objeto a calibrar

O método de calibração tem particularidades em função do objeto a ser calibrado:

a) Grandezas corporificadas ou geradas. A calibração consiste na determinação de seu valor efetivo com a respectiva indeterminação. Como exemplos de grandeza corporificada citam-se: blocos padrão de comprimento, massas padrão, placas de dureza, padrões de rugosidade, resistores padrão, etc., de grandeza gerada citam-se: tensão elétrica de pilha padrão, pontos de fusão e outros.

b) SM. A calibração consiste na determinação do comportamento metrológico (FT), em geral na FO, de instrumentos de medição, máquinas de medir, ou qualquer outro sistema empregado para medição em determinada faixa.

3.4 CRITÉRIOS DE ESCOLHA DO PADRÃO

Para que uma grandeza ou um sistema possa ser considerado como um padrão, este deve preencher os requisitos analisados neste item.

3.4.1 Confiabilidade e rastreabilidade

Os padrões usados na calibração deverão ser rastreáveis aos padrões primários das grandezas de base.

Na figura 3.1 é apresentado um diagrama de rastreabilidade dos padrões de comprimento.

A confiabilidade é assegurada, mediante a calibração/aferição periódica de cada padrão em relação ao padrão hierarquicamente superior, garantindo-se automaticamente a transferência da unidade de medida representada pelo padrão primário até as medições realizadas na indústria e comércio.

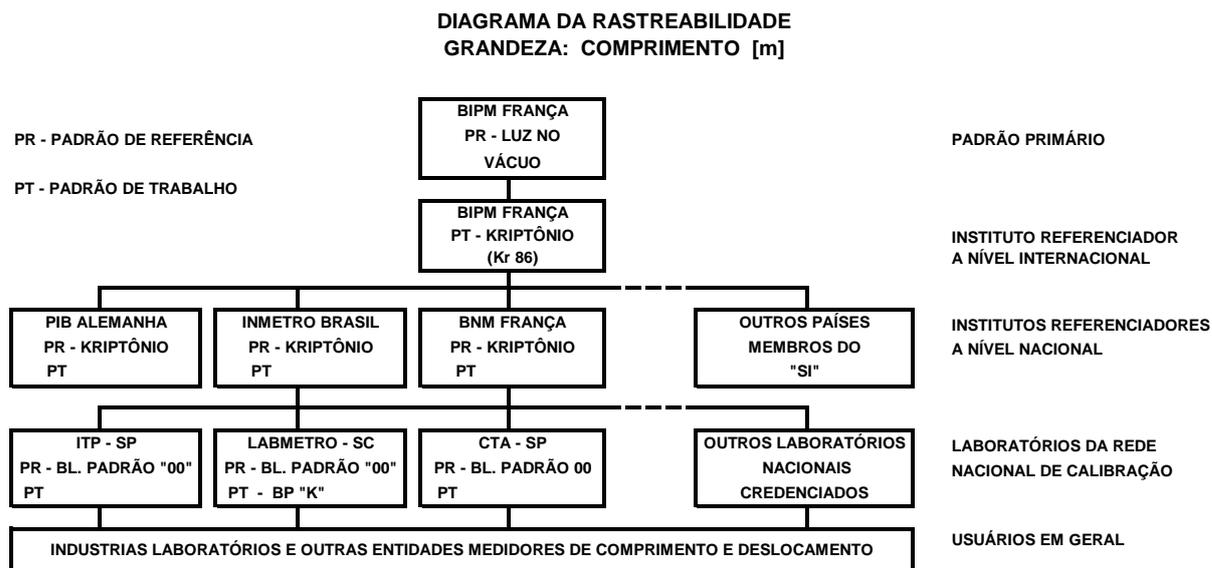


Fig. 3.1 - Diagrama de Rastreabilidade. Grandeza: Comprimento

As comparações interlaboratoriais de padrões são importantes para comprovar que, além de se dispor de padrões qualificados, sabe-se utilizá-los convenientemente segundo requisitos metrológicos e adequados conhecimentos técnico-científicos.

3.4.2 Incerteza de medição do padrão

Para garantir a validade da calibração é imprescindível que o E máximo do SMP seja menor que o E máximo do SMC (fig. 3.2). O E máximo de realização ou medição é representado pela l_m . A seguir são citadas algumas referências:

- A recomendação usual é a l_m do SMP ser menor ou igual a $1/10$ da l_m do SMC /7,11/;
- A Instrument Society of America (ISA) prescreve, como regra geral, a relação entre os erros do SMP dividido pelos erros do SMC de $1/10$ até $1/3$;
- A American Standards Association (ASA) prevê, para a calibração de voltímetros, SMP com E máximo pelo menos 3 vezes menor que o do SMC /12/;
- A norma ANSI B40.2, prevê para a calibração de manômetros a relação de pelo menos 4 vezes /13/;
- A VDI recomenda para calibração de dinamômetros, que o E máximo do SMP deve

ser 5 a 10 vezes menor que o E máximo do SMC /14/;

- A norma NBR 6156 para Aferição de MEM, prevê SMP com E máximo 0,01% quando tratar-se de Massas Padrão /15/;

- No caso de elementos corporificados, como Blocos Padrão, a DIN 861 prevê que seja usado na calibração/aferição por comparação um padrão de grau de precisão, imediatamente superior ao que está sendo calibrado, isto significa uma relação de 1/15, segundo /15/.

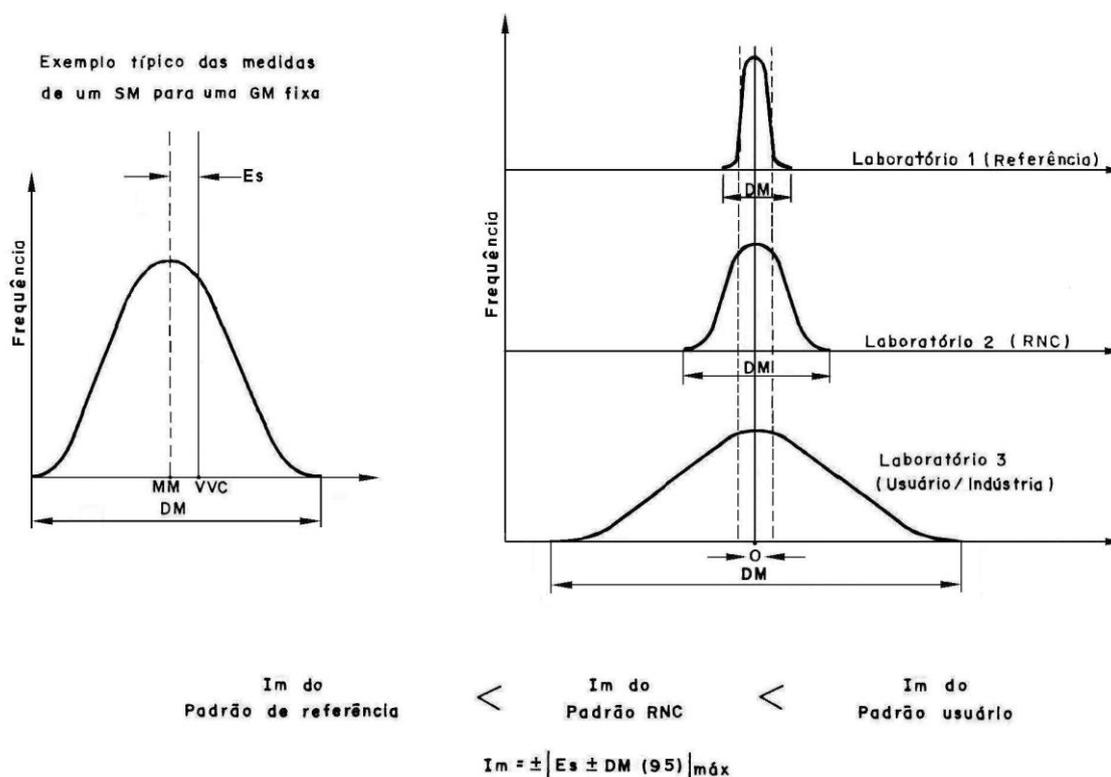


Fig. 3.2 - Hierarquia dos padrões. Laboratório de Referência, Laboratório da RNC e Laboratório do Usuário/Indústria

Como se observa, não existe uma relação fixa e única para a seleção da Im do padrão.

Trabalhos de calibração em SM de grandezas físicas e mecânicas em geral, comprovaram em trabalhos experimentais realizados ao longo de 4 anos, que a relação entre o E do SMP e SMC de 5 a 10 vezes é a mais recomendável para assegurar a devida confiabilidade metrológica na qualificação de SM. Em casos mais extremos, por falta de SMP adequado, pode ser usada uma relação até 3 vezes.

Para relação do SMP a ser usado na calibração, o E máximo do SMC são seus E admissíveis obtidos da especificação do fabricante, usuário, norma técnica, etc..

3.5 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

A execução de um trabalho de calibração exige do executor amplos conhecimentos de metrologia, instrumentação e experimentação. Um trabalho confiável e de alto nível técnico deve constar das etapas e ações descritas a seguir.

3.5.1 Planejamento do ensaio

É importante obter na calibração o máximo de informação sobre a FT real de um SM, sem no entanto investir em informações consideradas supérfluas. Por exemplo, na calibração de uma máquina de ensaio de materiais, usada para determinar a tensão de ruptura de materiais, interessa apenas registrar o valor da força máxima aplicada. Assim, normalmente não faz sentido determinar o comportamento para cargas decrescentes (H), e nem o E inicial, já que é recomendada a sua utilização no intervalo de 10% a 90% da FO /15/.

Na elaboração de um plano detalhado de calibração, fixam-se parâmetros a determinar e que melhor caracterizam o comportamento do SM. Para isto é importante conhecer uma série de informações básicas, como FO nominal e de aplicação, E máximo admissível na aplicação, tipo de aplicação, grau de utilização, condições ambientais de utilização, apresentação da GM, etc..

Quando a calibração destina-se à otimização do SM através do ajuste, prevê-se, por exemplo, poucos pontos de calibração ao longo da FO, de modo a viabilizar a determinação da ordem de grandeza dos E e os parâmetros de ajuste. Posteriormente ao ajuste, executa-se uma calibração definitiva a fim de detectar os E residuais.

Os SM de grandezas físicas e mecânicas, as grandezas padrão corporificadas e geradas, as máquinas de ensaio de materiais, bem como instrumentos de processo, muitas vezes devem seguir um procedimento de calibração particularizado. Uma série de normas técnicas da ABNT, DIN, ASTM, ISO, BS, JIS, ANSI, VDI/VDE, ISA e outras, especificam procedimentos de calibração, e muitas vezes, as respectivas incertezas de medição admissíveis. No entanto não existe uma atualização freqüente das normas

citadas, o que muitas vezes as torna obsoletas e incompletas, em função da constante atualização tecnológica dos SM.

No planejamento devem ser fixados alguns aspectos operacionais do experimento, como segue:

a) Número de pontos de calibração

O número de pontos a serem verificados na faixa de operação do SM é variável e depende de uma série de fatores, como:

- flutuações e alterações a que está sujeita a FT;
- nível de detalhamento necessário ou desejável;
- tempo necessário para o levantamento dos dados;
- determinação de características especiais (H e outras);
- complexidade da geração e estabilização da GM.

A distribuição dos pontos de calibração é função do tipo de SM em questão e, principalmente, do princípio de funcionamento do mesmo.

Nos casos gerais, os pontos são igualmente espaçados ao longo da FO do SM.

Em SM como micrômetros ou medidores de deslocamento do tipo “resolver” em máquinas ferramentas, onde o sinal da GM é transmitido por elementos intermediários como fusos, é necessário verificar a existência de E periódicos provenientes dos E de passo do fuso. Isto é possível mediante uma distribuição dos pontos de calibração de forma a abranger diferentes posições angulares do fuso ao longo da FO.

Algumas normas técnicas trazem recomendações para a escolha do número de pontos de calibração. Por exemplo a NBR 6156 -1983 especifica para máquinas de ensaio de materiais de tração/compressão, pelo menos 5 pontos uniformemente distribuídos no intervalo de (10 a 90)% da FO. A norma ANSI B40.1 especifica para manômetros, 3 a 10 pontos de calibração selecionados em função da l_m do SMC.

Na figura 3.3 é mostrada graficamente a influência do número de pontos de calibração sobre a determinação da FT.

Em função de experiências auferidas nos trabalhos de calibração realizados pelo autor, em SM convencionais de deslocamento, temperatura, força, pressão, e outros, constatou-se que o número de pontos que melhor caracteriza o comportamento da FT é de 7 a 12, sem determinação da H, e de 14 a 30, com determinação da H.

Tratando-se de SM cujos Es assumem normalmente forma de onda cíclica, recomenda-se fixar o número de pontos como sugerido em /16/.

b) número de ciclos de medição

Um ciclo de medição corresponde ao levantamento de dados relativos a todos os pontos de calibração programados, segundo uma sequência de ordem previamente definida. A realização de vários ciclos de medição destina-se à determinação dos parâmetros ligados à repetibilidade.

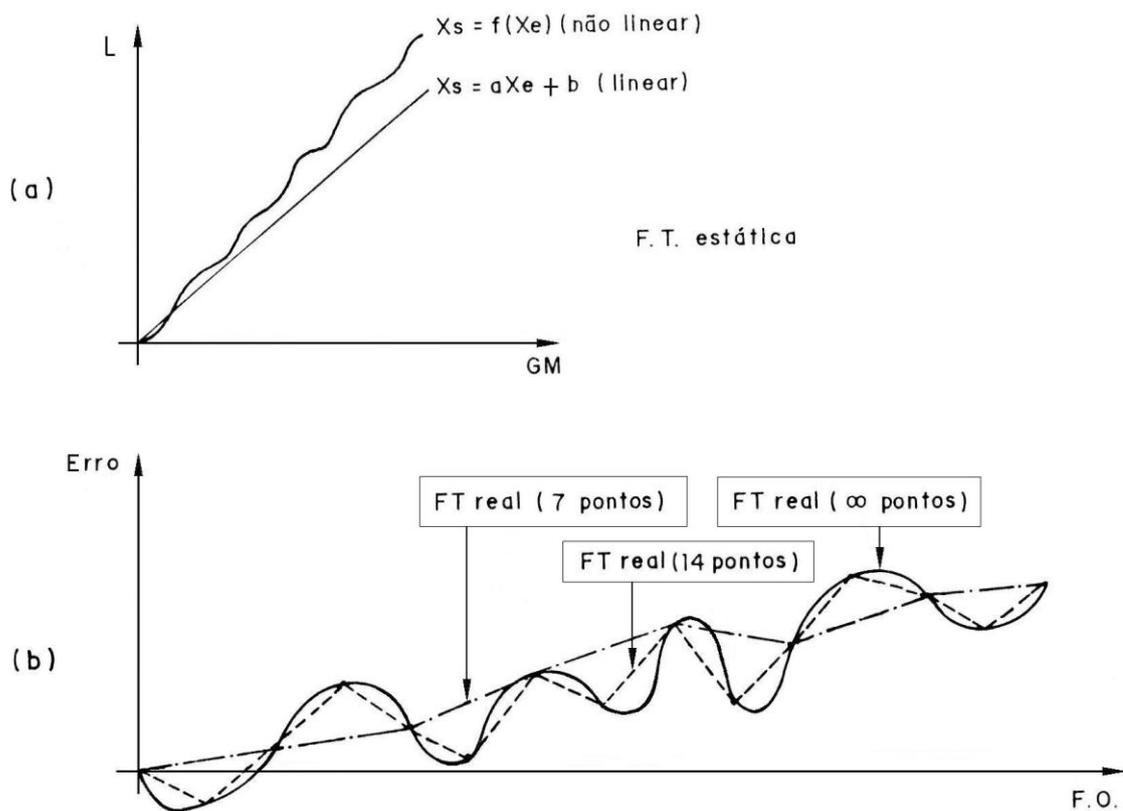


Fig. 3.3 - Comportamento da FT. Influência do número de pontos na FT real

O número de ciclos de medição a ser realizado na calibração depende da:

- repetibilidade das leituras em cada ponto;
- tempo necessário para realizar cada ciclo;
- complexidade de geração e estabilização da GM;
- aplicação dos resultados da calibração.

Trabalhos práticos têm mostrado que a repetibilidade das leituras é o fator

principal a ser considerado na fixação do número de ciclos de medição, e isto ocorre durante o próprio experimento. Para SM de boa qualidade, onde as leituras apresentam repetibilidade da ordem da resolução, é satisfatória a realização de 3 ciclos de medição. Quando as leituras apresentam elevada dispersão, recomenda-se a efetivação de 5 ciclos de medição, em casos extremos, até 10 ciclos, como na calibração para caracterização dos erros com finalidade de compensação.

A não repetibilidade das leituras nos ciclos de medição em um dinamômetro e a DM para 68,3%, 95,4% e 99,7% pode ser claramente observado na figura 2.6.

Algumas normas técnicas estabelecem o número de ciclos de medição na calibração. Assim, para máquinas de ensaio de materiais (tração-compressão), a NBR 6156-1983 estabelece 6 ciclos para cada FO da máquina. Já para a calibração de dinamômetros em geral, a NBR 8197 especifica 3 ciclos de medição. Para medidores de deslocamento, a NBR 6388 especifica 5 ciclos de medição.

c) Seqüência de medição

Existem basicamente 3 formas de executar a aplicação da GM e a realização da leitura em um ciclo de medição:

- Progressiva: Fazem-se as operações seqüencialmente a partir do ponto inicial X1 até o ponto final Xn programado para o ciclo.

Exemplo: Leituras em 10; 20; 30; ... ; 90 e 100% da FO.

- Peregrino parcial (fig. 3.4.a):

Exemplo: Leituras em 0; 10; 20; 10; 30; 20; 40; 30; 50; 40; 60; 50; 70; 60; 80; 70; 90; 80; 100% da FO, com retorno ao zero posteriormente.

- Peregrino total: Variação da GM até o valor de cada ponto de medição programado com retorno ao "zero" (fig. 3.4.b).

Exemplo: Leituras em 0; 10; 0; 20; 0; 30; 0; ... ; 90; 0; 100 e 0% da FO.

A forma progressiva é a mais simples e usual. As formas peregrino parcial e total são casos particulares, recomendados por exemplo para calibração/aferição de anéis dinamométricos segundo as normas DIN 51301/76 e NBR 6674/81.

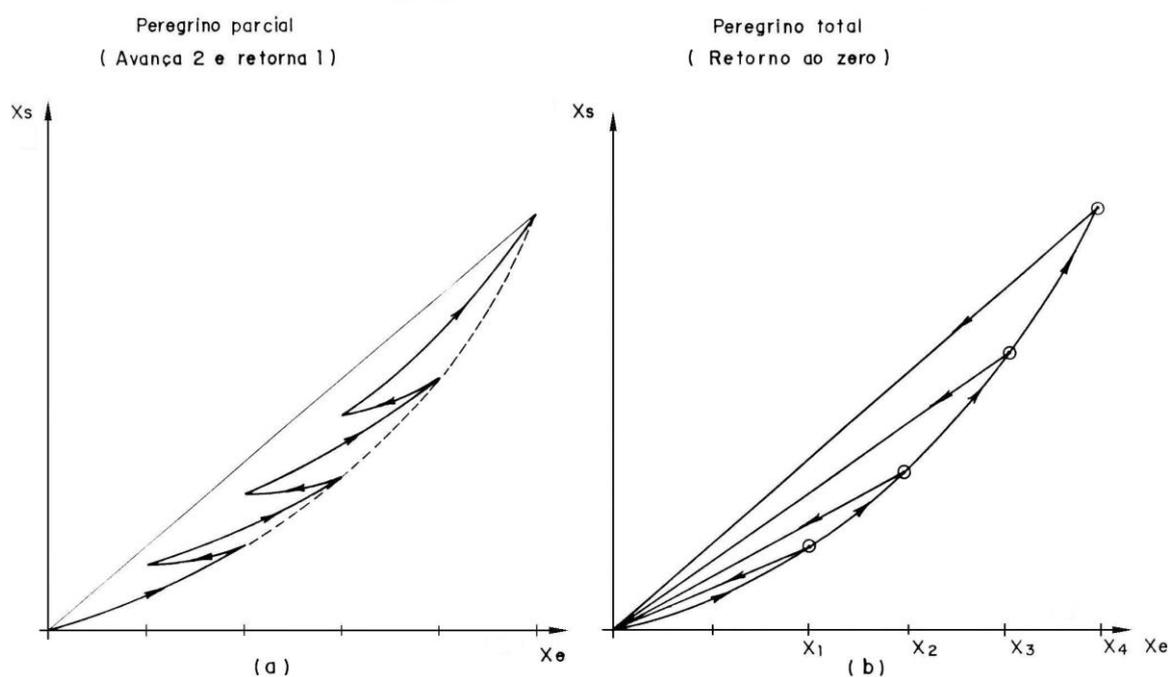


Fig. 3.4 - Seqüência de medição na calibração

d) Realização das leituras

Pelo método indireto de calibração, o levantamento de dados consiste em submeter a mesma GM ao SMP e ao SMC que devem ser, dentro do possível, lidos simultaneamente.

O valor da GM a ser aplicado aos sistemas de medição em cada ponto de medição, pode ser:

- ajustado pelo SMP e lido no SMC;
- ajustado pelo SMC e lido no SMP;
- ajustado em valor qualquer e lido em ambos.

O primeiro caso é recomendável quando as resoluções do SMP e o SMC são da mesma ordem de grandeza, mesmo satisfeitas às condições de validade de padrão.

O segundo caso é recomendável quando a resolução do SMP é melhor do que a do SMC. A vantagem é que não há necessidade de avaliar as subdivisões da escala do SMC e sim pode ser lido no SMP mais facilmente, eliminando assim a contribuição do operador à DM.

O terceiro caso é vantajoso considerando-se que o tempo de realização da calibração será reduzido pela não fixação dos pontos de calibração. Sua desvantagem está ligada à dificuldade de acompanhamento do comportamento do sistema por parte

do operador, já que os pontos de calibração são diferentes. Isto não permite avaliar a ordem de grandeza da repetibilidade durante o levantamento de dados e assim a necessidade de realização, por exemplo, de mais ou menos ciclos de medição. O processamento é mais trabalhoso e exige necessariamente que seja feito com auxílio do computador.

3.5.2 Preparação do Experimento

Antes da execução do levantamento dos dados é fundamental deixar preparada uma estrutura que satisfaça os requisitos metrológicos necessários a uma calibração como:

- uso de montagens e dispositivos adequados para gerar a GM;
- uso de padrões compatíveis ao SMC em questão;
- instrumentos auxiliares para registro das condições de ensaio como temperatura do ambiente, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, vibrações, tensão de alimentação, etc.;
- preparação de planilhas para o registro das leituras, ou módulos para aquisição automática computadorizada, etc..

Desta forma evita-se a introdução de erros nas medições, em função das eventuais interrupções durante o levantamento de dados e o processamento devido a informações incompletas.

3.5.3 Execução dos Ensaio

Consiste no levantamento dos dados brutos da calibração, sob condições de ensaio controladas, por um operador qualificado.

Durante a execução dos ensaios torna-se necessário o registro, em forma de memorial, de todos os acontecimentos relativos ao experimento, principalmente a ocorrência de eventuais anomalias.

Quanto à forma de aquisição dos dados de uma calibração estática, podem ser caracterizadas três maneiras diferentes:

a) Aquisição manual

É aquela em que não se utiliza qualquer dispositivo de automação que auxilie

nos registros das leituras do SMP e SMC. A GM é ajustada manualmente pelo operador, estabilizada nos pontos de medição e realizadas as leituras nos SMP e SMC.

É a forma convencional por não necessitar de instrumentos auxiliares sofisticados. A dificuldade em geral está em conseguir estabilizar a GM no valor desejado, o que exige uma leitura simultânea do SMP e SMC.

b) Aquisição semi-automática

O operador utiliza um dispositivo auxiliar que registra a leitura no SMP ou no SMC. Assim é possível variar a GM lentamente até atingir o valor pré-fixado, acionando instantaneamente o registro automático da leitura no outro sistema.

A vantagem deste tipo de aquisição é não precisar estabilizar plenamente a GM, o que é um fator importante na minimização do tempo dispendido nos ensaios.

c) Aquisição automática

O registro das leituras do SMP e SMC é realizado através de um sistema computacional, composto por periféricos e um programa de aquisição adequado à finalidade.

Com os dados armazenados no computador, fazendo uso de um programa universal de calibração /17/, rapidamente consegue-se realizar o processamento e documentação dos resultados. Isto traz vantagens decisivas como:

- minimização do tempo de aquisição dos dados;
- minimização dos tempos de processamento pela rapidez na execução do grande número de cálculos em função dos dados já estarem armazenados em fita ou disco;
- levantamento de dados simultâneo de vários SMC, sobre os quais atua a mesma GM (como na montagem de T de força de tração em série);
- número de pontos de medição mais elevado por ciclo, definindo melhor o comportamento da FT.

Como exemplo cita-se a calibração de um dinamômetro. Os T de força do SMP e SMC são instalados em série entre as garras de fixação de uma máquina de ensaio de materiais (gerador de força). O computador através de um sistema de aquisição de sinais, compara continuamente os valores de força aplicada com os valores dos pontos de calibração pré-estabelecidos. Quando a condição é satisfeita, os valores das forças

indicadas no SMP e SMC são armazenadas no computador (fig. 3.5).



Fig. 3.5 - Calibração estática com aquisição automática

3.5.4 Processamento dos Dados

O processamento dos dados referentes à calibração de um SM pode ser feito de duas formas distintas:

- manual;
- automatizado por computador.

O processamento dos dados envolve uma série de cálculos, que embora de natureza simples, são trabalhosos, demorados e sujeitos à falha humana.

A melhor opção é utilizar um sistema computacional que permite realizar todos os cálculos de maneira rápida e confiável /17/.

Como resultados obtém-se: E_s , DM com P de enquadramento a fixar, H para cada ponto de medição, parâmetros reduzidos como S_b , linearidade, e Im .

3.5.5 Documentação da Calibração

São elaborados dois documentos básicos: memorial de calibração e o relatório de calibração.

a) Memorial de calibração: Consta de todas as informações relativas ao planejamento, à preparação, à execução do trabalho experimental, bem como aquelas ligadas ao processamento e análise dos resultados. Destacam-se:

- Fixação dos objetivos da calibração;
- Todas as informações relativas ao SMC coletadas do interessado e manuais;
- Seleção do SMP adequado à finalidade da calibração, registrando as limitações existentes;

- Planejamento detalhado do trabalho, constando as diferentes opções para execução do ensaio experimental, e justificando os motivos que levaram a adotar alguma em particular;

- Descrição dos detalhes da montagem do experimento;
- Execução das medições com registro das condições ambientais de ensaio, e de todos os acontecimentos relevantes ocorridos cronologicamente durante o levantamento dos dados.

b) Relatório de calibração: Trata-se do documento final que relata aos interessados todas as informações relevantes sobre o SM calibrado, a instrumentação envolvida e as características metrológicas determinadas na calibração. Consta de:

- Finalidade da execução da calibração;
- Identificação das principais características operacionais e metrológicas dos SMC e SMP bem como dos dados de fabricação e qualificação;

- Procedimento de ensaio adotado e condições ambientais em que foi executado;

- Planilha de dados brutos;
- Tabela de dados processados;
- Gráfico da CE;
- Tabela de conversão;
- Análise dos resultados com um parecer sobre as condições metrológicas do SM.

3.6 CALIBRAÇÃO SOB CONDIÇÕES EXTERNAS VARIÁVEIS

Os resultados de uma calibração estão diretamente relacionados às condições de ensaio em que a mesma foi realizada. Se um SM é usado sob condições diferentes das fixadas pelo fabricante ou norma técnica, recomenda-se inicialmente determinar a ordem de grandeza e o tipo de erro (E_s , E_a) introduzidos no SM em função da atuação de GI, como temperatura, vibrações, umidade relativa do ar e outras, através da simulação destas condições em laboratório.

Se o comportamento da FT apresentar alterações significativas em função das GI, pode-se adotar algumas soluções como descritas a seguir:

- Controlar as GI até atingirem níveis aceitáveis de variação, o que seria a solução ideal do ponto de vista metrológico, porém muitas vezes impossível de ser realizada;

- Determinar uma família de FT válidas para as GI mais significativas quando atuam sobre o SM sob condições diferentes das nominais, porém estáveis. É uma solução válida, porém a eliminação dos erros com base nesta família de curvas envolve um sistema de controle bastante sofisticado, a rigor computadorizado. Só se justifica quando se tratar de um SM de elevado custo, geralmente integrante de máquinas sofisticadas. Tratando-se de SM incorporados a máquinas sofisticadas e de grande porte, a calibração necessariamente deve ser realizada no local de utilização. (Ex.: máquinas de ensaio de materiais, medidores de deslocamentos de máquina ferramenta e outras). Nestes casos, para execução de trabalhos criteriosos de calibração das máquinas exemplificadas, a melhor solução é realizar ciclos de medição com diferentes valores das GI em uma situação aproximadamente estabilizada.

3.7 FREQUÊNCIA DE CALIBRAÇÃO

Entende-se por frequência de calibração o período de tempo compreendido entre duas calibrações consecutivas de um determinado SM ou grandeza padrão. Seu valor depende de fatores como:

- Confiabilidade do SM - Grau de utilização;
- Importância dos resultados obtidos com o SM.

A frequência de calibração é estabelecida a partir de:

a) Recomendações e normas técnicas, citando-se como exemplos:

- MEM – tração e compressão: segundo normas DIN e ABNT é especificado um período não superior a um ano;

- Dinamômetros: Segundo ABNT, DIN e ASTM, a calibração deverá ser realizada em períodos iguais ou inferiores a dois anos;

- Manômetros usados para ensaios de pressão em Usinas Nucleares: o código ASME Seção III - instrução NB - 6413 prevê uma calibração antes da realização de cada ensaio ou no mínimo, a cada seis meses.

b) Programas internos de calibração:

Estes programas consideram os fatores citados anteriormente. Abaixo relacionam-se alguns casos comuns:

- Padrões de referência de laboratório de medição de grandezas geométricas à base de elementos corporificados, deverão ser recalibrados após um ano; se houver coerência nos resultados, as calibrações subseqüentes serão a cada dois anos, considerando que a acomodação estrutural já tenha atingido um estado satisfatório;

- Padrões de transferência: Pelo menos uma vez ao ano, ou em intervalos determinados estatisticamente em função do grau de utilização;

- Padrões de trabalho com uso intensivo: As calibrações serão realizadas em intervalos determinados com base na experiência acumulada, e inferiores a um ano.

c) Eventos Especiais:

Independentemente da frequência normal de calibração prevista para cada SM, esta deverá ser realizada também, extraordinariamente, quando:

- For realizada manutenção corretiva no SM;

- Tratar-se de máquinas de medir ou SM de grande porte que foram submetidas a uma mudança de local da instalação;

- O SM tiver sido sobrecarregado por mau uso, choques mecânicos, operação fora das condições nominais especificadas, etc.;

- Houver dúvida sobre os resultados informados pelo SM.

4. INSTABILIDADE DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Os SM podem vir a ser utilizados sob condições ambientais diferentes das especificações sendo afetados no comportamento pela atuação das indesejáveis GI sobre os mesmos. Em função disto, fez-se um estudo sobre as causas de instabilidade da FT para, com base nesta experiência, poder decidir sobre procedimentos e medidas de precaução.

4.1 ESTUDO DAS CAUSAS DA INSTABILIDADE

Trabalhos experimentais mostram que as GI alteram as características metrológicas do SM de forma variável ou de forma permanente, afetando principalmente o zero, a S_b e a linearidade.

As GI podem ser classificadas em grupos como apresentado abaixo, sendo sua influência maior ou menor dependendo dos componentes do SM.

a) Ambientais:

- temperatura (nível, gradiente);
- pressão atmosférica;
- umidade relativa do ar, névoa salina;
- radiações ionizantes;
- radiações nucleares;
- impurezas (poeira, areia, vapores oleosos, etc.).

b) Mecânicas:

- vibrações e choques mecânicos;
- acelerações constantes;
- atritos.

c) Elétricas:

- variações de tensões e/ou frequência de alimentação elétrica;

- ruídos elétricos;
- campos elétricos e magnéticos.

d) Tempo:

- uso intensivo (fadiga, desgaste);
- uso esporádico (estocagem, envelhecimento).

Na seqüência faz-se um estudo das GI mais significativas.

4.1.1 Variação da temperatura

É a principal responsável pela introdução de E nas leituras apresentadas pelo SM, devido a:

a) deformações térmicas em sistemas mecânicos:

- altera a geometria dos componentes mudando o zero e a S_b ;
- provoca esforços internos alterando as condições de atrito;
- resulta em folgas provocando modificação da H.

Na figura 4.1 são apresentadas as CE de um manômetro para as temperaturas de 20, 35 e 50 °C, respectivamente.

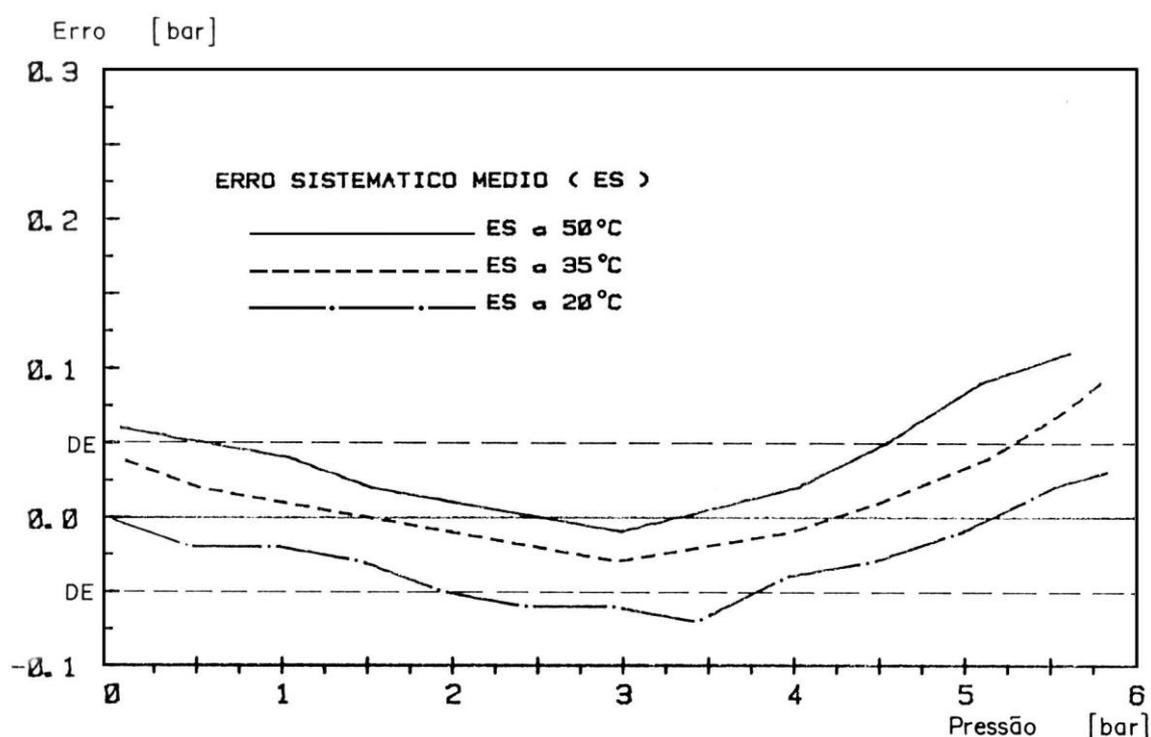


Fig. 4.1 - Variação da FT de um SM totalmente mecânico em função da temperatura

Percebe-se um nítido deslocamento da CE caracterizando basicamente uma FZ, à medida que a temperatura do manômetro vai aumentando. A FZ ocorrida em função da variação de temperatura foi:

- FZ = 0,04 bar, quando a temperatura passou de 20 para 35°C;
- FZ = 0,02 bar, quando a temperatura passou de 35 para 50°C.

A FZ é de aproximadamente 1% do valor final de escala (VFE) do manômetro, para uma variação de 30 K. Considerando que se trata de um instrumento de classe de exatidão de 0,6%, conclue-se que sob variação de temperatura da ordem de 10 K o mesmo não satisfará mais as especificações do E máximo admissível.

Considerando a constância de afastamento entre as três curvas da figura 4.1, este SM apresenta FS e do comportamento desprezível, comparado com a FZ.

b) flutuações das características elétricas de componentes e circuitos eletrônicos /18, 19/:

- os resistores variam a sua resistência elétrica e conseqüentemente provocam flutuações de amplificação;
- nos amplificadores em geral, oscilações da tensão de referência (off-set) decorrentes de variações de temperatura, apresentam FZ e Sb;
- componentes eletrônicos em geral sofrem a influência da temperatura, porém o comportamento resultante depende da forma em que fazem parte do circuito eletrônico de cada módulo pertencente à cadeia dos SM;
- os termoelementos formados em função dos diferentes materiais (cobre, ouro, estanho, etc.) existentes nos circuitos eletrônicos, geram tensões termoelétricas que se superpõem ao sinal de medição.

Na figura 4.2 é apresentado o efeito resultante da temperatura ambiente, atuando sobre o módulo de tratamento de sinal (TS) e indicador (I) digital de um SM indutivo de deslocamento.

Este é um exemplo típico de FS em função da variação de temperatura. Pelo gráfico observa-se uma FS = 2% quando a temperatura variou de 3 a 40 °C. Destaca-se ainda um efeito mais acentuado a medida que a temperatura se aproxima de 0°C.

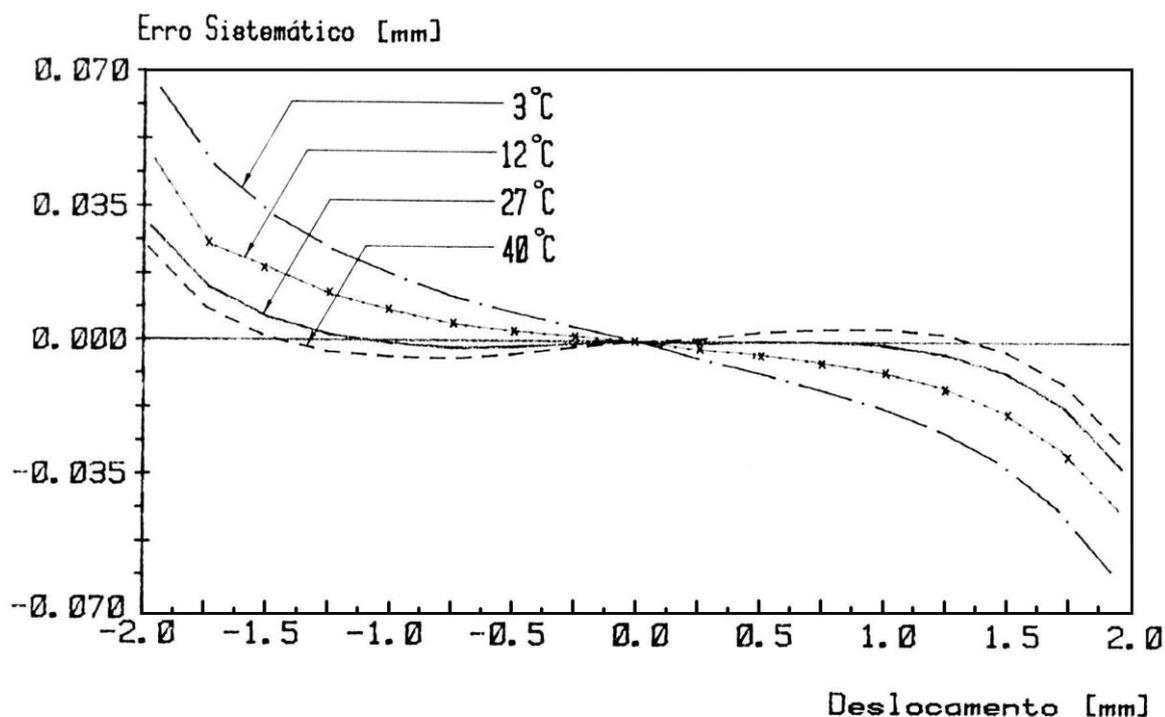


Fig. 4.2 - Influência da temperatura ambiente sobre a Sb do (TS + I) de um SM de deslocamento

O fabricante do SM especifica uma FS máxima de 2% para temperaturas entre 0 e 40 °C /20/.

Não foi caracterizado na figura 4.2 a FZ, por tratar-se de SM com fácil ajuste do zero antes da execução das medições.

Todavia o fabricante especifica uma FZ máxima de 0,5% para temperaturas entre 0 e 40 °C.

O SM apresenta uma FC desprezível em comparação à FS.

Dependendo das características construtivas e de funcionamento de cada SM, a unidade de TS pode ser do tipo corrente contínua (cc) ou de frequência portadora (por exemplo, 5 kHz).

Uma comparação entre a FZ, FS e FC de duas unidades de TS, realizada por /21/, é mostrada na figura 4.3.

Trata-se de duas pontes amplificadoras, uma de cc e outra de frequência portadora de 5 kHz, que foram submetidas a uma variação de temperatura igual a 10 K.

Ponte Amplificadora	5kHz	CC
Flutuação do Zero (FZ) para uma S_b ajustada = 2 mV/V	$<^{\pm} 0,035 \%$	$<^{\pm} 0,15 \%$
Flutuação do Zero (FZ) para uma S_b ajustada = 0,2 mV/V...	$<^{\pm} 0,17 \%$	$<^{\pm} 1,5 \%$
Flutuação da sensibilidade (FS)	$<0,2 \%$	$<0,1 \%$
Flutuação do comportamento (FC)	$<0,05\%$	$<0,01 \%$

Variação de temperatura = 10 K

Fig. 4.3 - Influência da temperatura sobre o zero, S_b e comportamento

c) choques térmicos

Podem ser causados por massas de ar em movimento, que provocam flutuações da FT.

Na figura 4.4 é mostrada a influência de um choque térmico na unidade de tratamento sobre a indicação de um SM de deslocamento. Os gráficos mostram que o tempo de preaquecimento do amplificador é de aproximadamente 80 minutos, apresentando para um sinal de saída do sistema em torno de zero, um desvio de leitura de aproximadamente - 0,007 mm/ K (fig. 4.4.a), caracterizando uma FZ.

Quando o sinal de saída passou para o VFE do SM, igual a 7,000 mm, verificou-se também um desvio de aproximadamente - 0,007 mm/K (fig. 4.4.b), concluindo-se com isto que a FS é desprezível comparada com a FZ no preaquecimento do SM.

Cento e vinte minutos após a energização do SM, foi provocado um choque térmico sobre o amplificador e observou-se que para leituras próximas ao deslocamento zero e ao VFE, a variação sofrida foi de aproximadamente 0,002 mm/K.

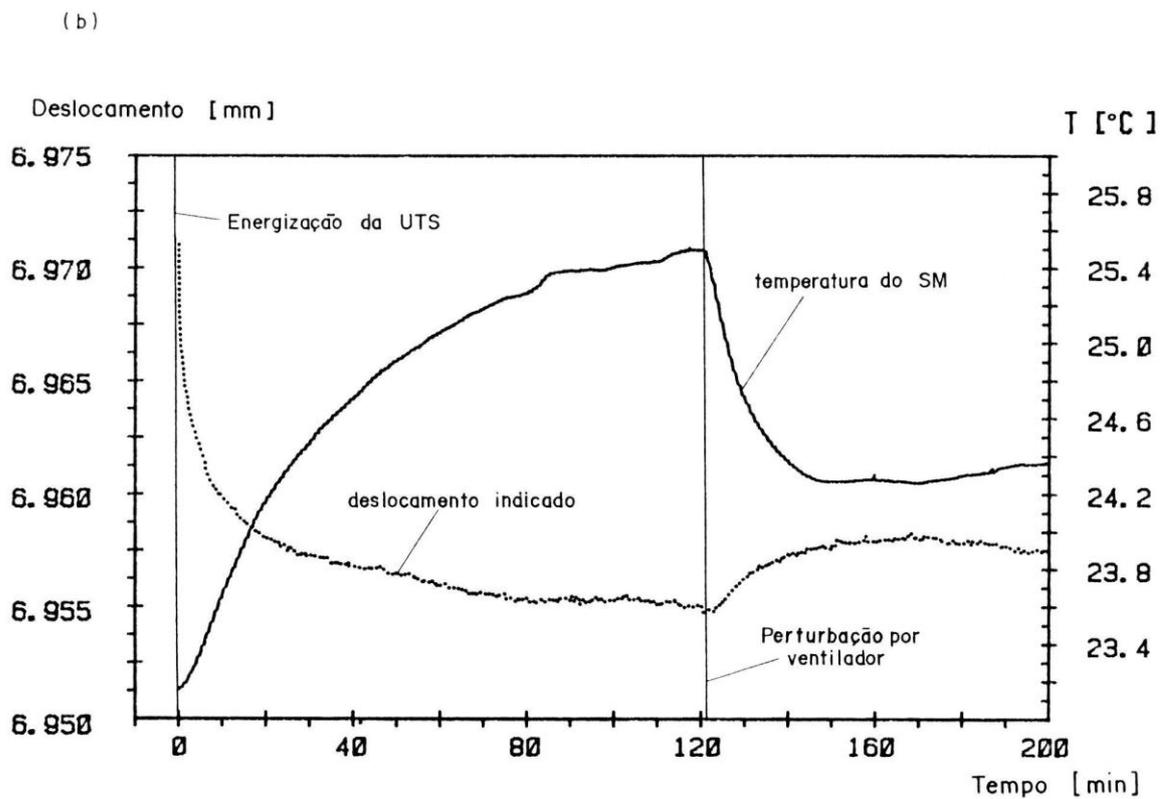
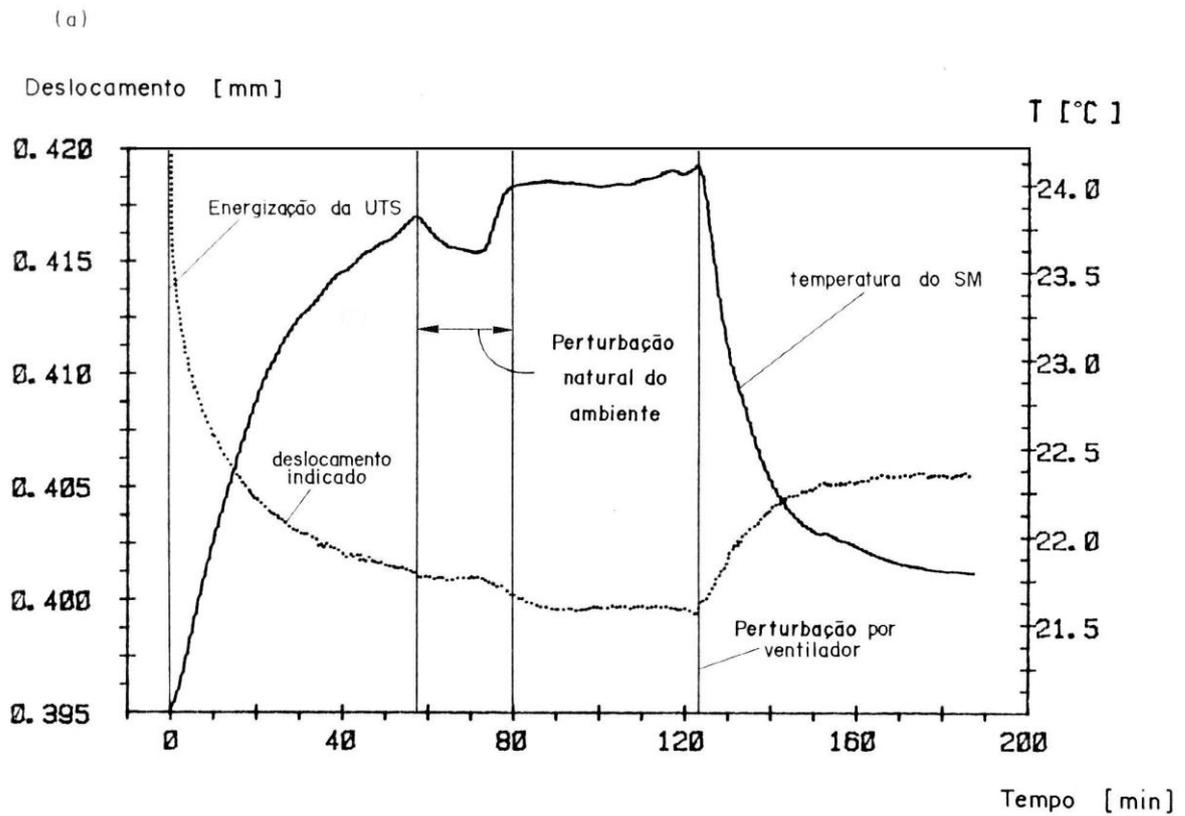


Fig. 4.4 - Influência do tempo de estabilização e choque térmico sobre um SM de deslocamento

Percebe-se que no tempo $t = 60$ min, houve uma variação de temperatura do SM de aproximadamente 0,3 K, provocada por uma perturbação do ambiente sobre o processo de convecção natural, pelo fato da porta da sala onde se realizava os experimentos ter ficado aberta por um tempo de 15 minutos.

4.1.2 Tempo

A deterioração das características em função do tempo considera a freqüência de utilização e pode-se diferenciar em:

a) uso intensivo

Em SM do tipo mecânico compostos por elementos deslizantes, mancais de rolamento, alavancas articuladas, etc., ocorre pela utilização, desgaste mecânico em função de impurezas, poeiras, lubrificação deficiente, etc..

Como exemplo típico, são mostradas na figura 4.5 as curvas de E_s obtidas nas calibrações de uma MEM, realizadas durante um período de 3 anos /22/.

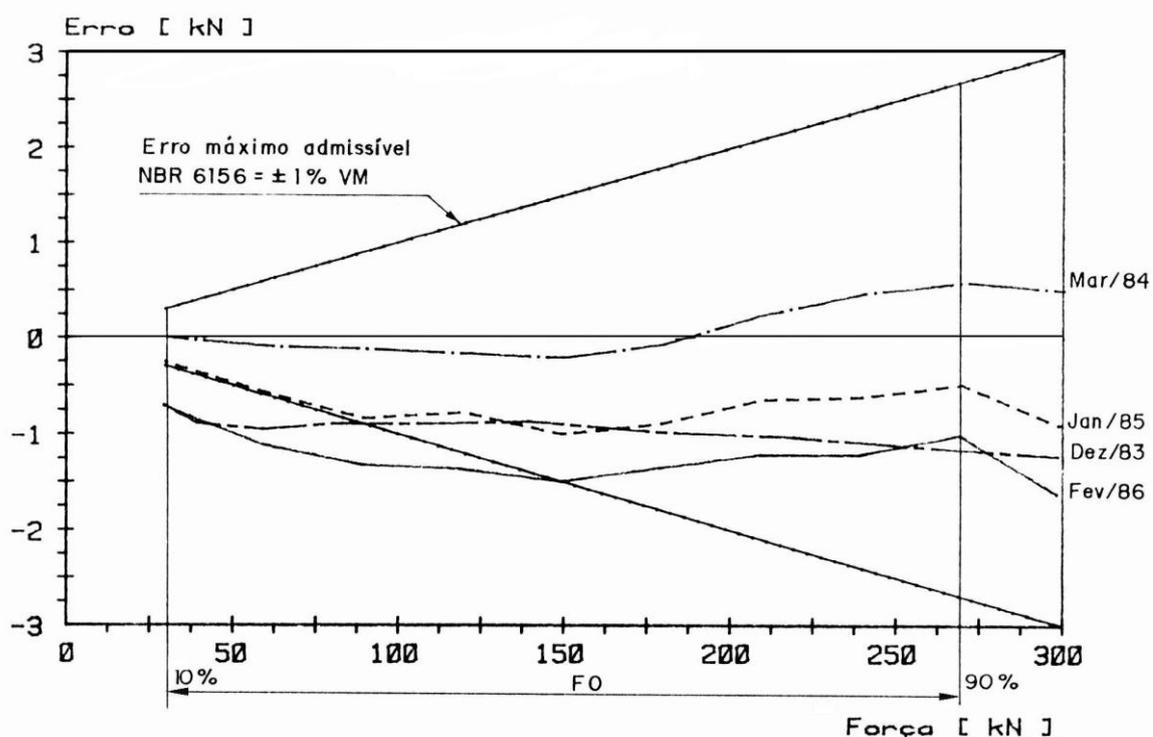


Fig. 4.5 - Influência do tempo de uso sobre a S_b de uma MEM com SM de força mecânico

Na primeira calibração, realizada em dezembro de 1983, foram detectados Es superiores aos máximos admissíveis pela norma NBR 6156 para máquinas desse tipo (classe II: $Es = \pm 1\%$ do VM).

Em função disto foi realizada uma manutenção corretiva no sistema hidráulico do conjunto atuador de força e realizada nova calibração em março de 1984, quando os Es passaram a satisfazer as exigências da norma citada.

Como a norma prevê a realização de no mínimo uma calibração anual, em janeiro de 1985 foi realizada nova calibração e verificou-se novamente uma tendência de ampliação dos Es, embora ainda satisfizesse a tolerância especificada de $\pm 1\%$ do VM.

A calibração realizada em fevereiro de 1986 mostra os Es significativos novamente no início da faixa de operação, que não satisfazendo mais os requisitos da NBR 6156.

Conclui-se que o uso intensivo, associado com o aumento progressivo do atrito no conjunto êmbolo/cilindro atuador da força, são os responsáveis pelo comportamento apresentado pela máquina.

Em SM eletro-eletrônicos, as características dos componentes básicos (sensores eletromecânicos, capacitores, resistores, etc.) sofrem deterioração, alterando a FT do SM. T de força, de torque, de pressão, etc., podem apresentar os citados problemas devido à fadiga do elemento elástico. Um exemplo que mostra o comportamento metrológico de um SM eletrônico é apresentado na figura 4.6. Trata-se do medidor de força de uma MEM, calibrada anualmente num período de 3 anos /23/. Percebe-se uma influência do tempo menor que para o caso anterior, onde os Es se mantêm dentro da tolerância especificada pela NBR 6156, durante os três anos consecutivos em que foram realizadas as calibrações. A diferença dos resultados é conseqüência em parte pela AZ da MEM ao longo do tempo, associado a uma suave alteração do comportamento, conforme pode ser observado na fig. 4.6.

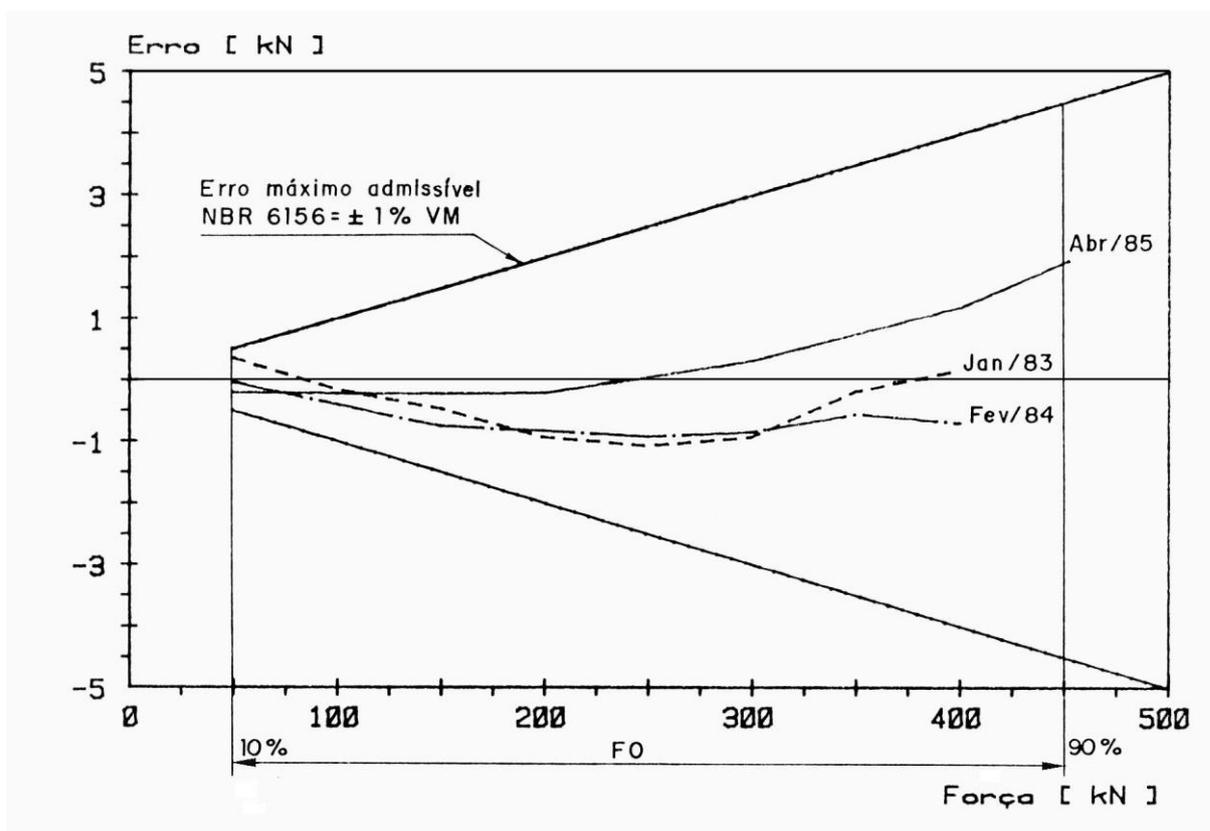


Fig. 4.6 - Influência do tempo de uso sobre a S_b de uma MEM com SM de força eletrônico

Em padrões corporificados, especialmente os de grandezas geométricas, as acomodações estruturais de ligas metálicas e não metálicas, levam a alterações dimensionais e de forma, modificando suas características metrológicas.

Exemplos:

- variação do comprimento de BP;
- variação da dureza;
- deformações geométricas em desempenos, modificando a planicidade.

Por outro lado, o atrito devido ao contato mecânico de elementos corporificados com outros instrumentos e peças resulta em remoção de material (desgaste superficial), alterando:

- as formas e valores de padrões dimensionais, como BP, calibradores, réguas padrão, desempenos, etc.;
- os valores de massas padrão (pesos padrão).

b) uso esporádico

Longos períodos sem utilização e estocagem sem manutenção preventiva periódica, levam em certos casos, a prejuízos de grande vulto.

Em sistemas mecânicos acontece, em geral, o endurecimento do lubrificante existente nos mancais e articulações, acompanhado de oxidações localizadas, devidas aos aditivos existentes no lubrificante. Assim, medidores mecânicos de deslocamento (relógios comparadores, máquinas de medir, etc.) passam a apresentar atritos elevados e não constantes no mecanismo de transmissão e amplificação. A utilização de um SM nestas condições, implicará na obtenção de medidas afetadas de Es e Ea.

Em sistemas eletro-eletrônicos, surgem maus contatos em potenciômetros e conectores (oxidação), curto-circuito em capacitores, e outras implicações que provocam alterações funcionais no sistema.

Em sistemas ópticos, a deterioração, de componentes é provocada por umidade elevada e fungos.

Sistemas de medição a Laser, com o decorrer do tempo, tem o gás emissor do raio (He-Ne) prejudicado nas suas características de ionização.

4.1.3 Tensão de alimentação e ruído elétrico

a) Tensão de alimentação

Em geral, um SM eletrônico tem seu circuito alimentado com baixa tensão (5 a 24 V). Em função disto, são usadas as denominadas fontes de tensão que transformam a tensão de rede em tensões estabilizadas para alimentar os circuitos. São construídos a partir de componentes discretos ou, mais recentemente, tem incorporados circuitos integrados, que fornecem tensão de saída com elevada constância, mesmo quando a tensão de entrada oscila +/- 10%, ou mais, do valor nominal.

Caso haja problemas na fonte estabilizada ou a tensão for abaixo da estabelecida, podem surgir E significativos no comportamento do SM. Exemplifica-se o fenômeno com um SM de deslocamento que foi submetido a valores variados de tensão de alimentação, conforme mostrado na figura 4.7.

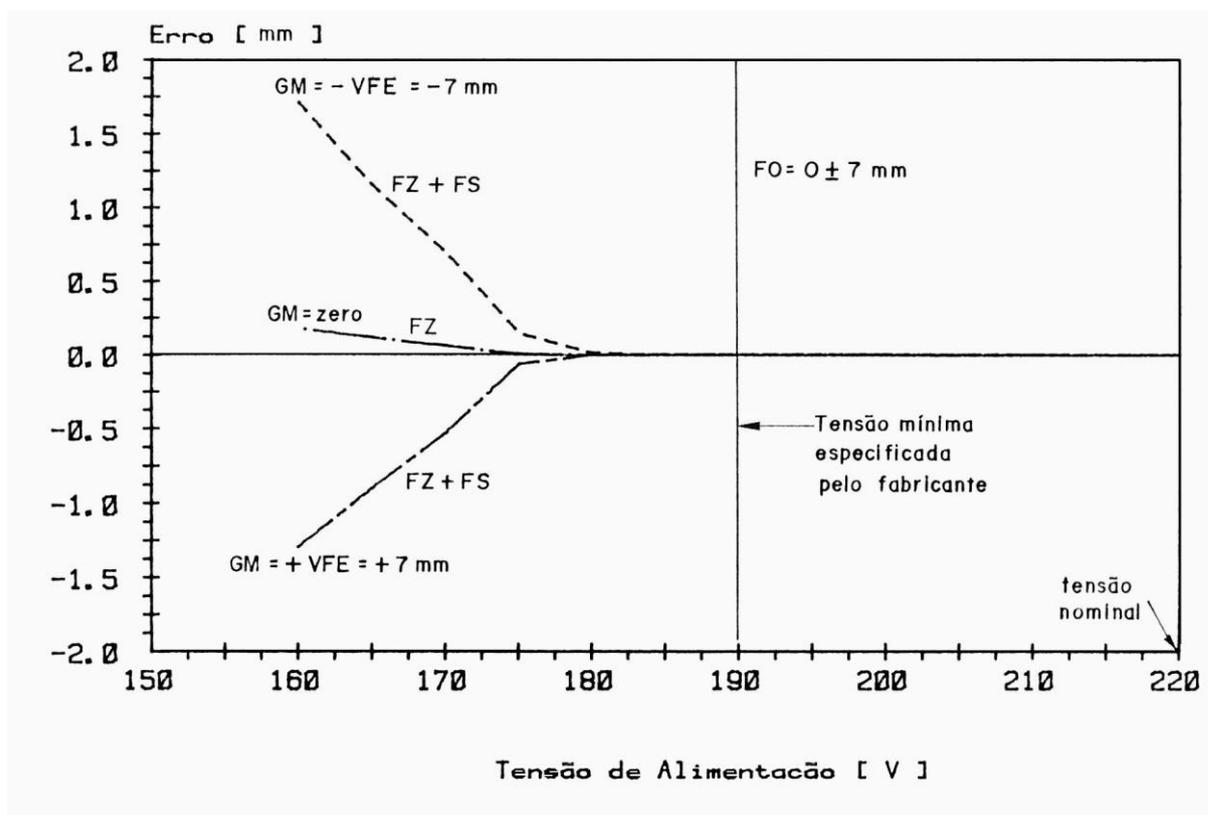


Fig. 4.7 - Influência da tensão de alimentação sobre o Xs de um SM de deslocamento

Para uma posição fixa do transdutor (GM constante) foram observados os seguintes erros (E) quando a tensão de alimentação atingiu 30% abaixo da nominal:

$E = -19\%$ do VFE quando a GM foi mantida constante em + VFE (+7 mm).

$E = +3\%$ do VFE quando a GM foi mantida constante com deslocamento igual a zero.

$E = +25\%$ VFE quando a GM foi mantida constante em - VFE (-7 mm).

Observa-se que o SM sofreu FZ e da Sb (fig. 4.7) provocadas por alterações dos componentes elétricos citados no item 4.1.1.b. É claro que as situações citadas são casos extremos e dificilmente serão atingidas, mesmo porque os fabricantes de SM eletrônicos especificam as tolerâncias para a tensão de alimentação elétrica, que em geral variam de +/- 5% a +/- 20% do valor nominal.

b) Ruído elétrico

É todo o sinal elétrico indesejável presente na tensão de alimentação e/ou sinais

do SM produzindo efeitos também indesejáveis no comportamento do SM /24/.

São gerados por dispositivos elétricos ou eletrônicos que durante sua operação provocam variações muito rápidas de tensão ou de corrente.

Citam-se como exemplos de dispositivos e respectivas interferências /25/:

- chaves eletromecânicas (sinais transitórios de tensão);
- tiristores ou semicondutores (espículas de tensão);
- máquinas de solda ou fornos de indução (curto circuito de linha);
- máquinas de elevada corrente de linha (sinais transitórios de tensão).

No SM, quando aparecem ruídos sobrepostos ao sinal de medição, os mesmos também, são geralmente amplificados, provocando um sinal de saída bastante distorcido em termos de R.

4.1.4 Vibrações e choques mecânicos

São deslocamentos variáveis no tempo, que influem sobre os SM que tem em seu mecanismo elementos móveis que, sob as acelerações periódicas ou aleatórias, ficam sujeitos a forças inerciais, alterando o comportamento metrológico do SM, adicionando ao sinal de saída erros aleatórios. As vibrações tornam-se críticas quando sua frequência atinge valores próximos a da frequência natural do sistema, fazendo com que as amplitudes de, oscilação dos componentes passem a ser máximas, chegando em casos extremos a danificar o SM. São provocadas por motores e máquinas em geral, pontes rolantes, veículos em movimento, fluxo de ar, etc.. A forma de interferir sobre o sinal de um SM é mostrada no seguinte exemplo: um nível eletrônico, usado para medir pequenas inclinações (+/- 50 segundos), apresenta oscilações na indicação dificultando a leitura quando:

- uma máquina é colocada em funcionamento (condicionador de ar) (fig. 4.8.a);
- uma pessoa caminha nas proximidades do ensaio (fig. 4.8.b);
- alguém esbarra na mesa sobre a qual está apoiado o transdutor (fig. 4.8.c).

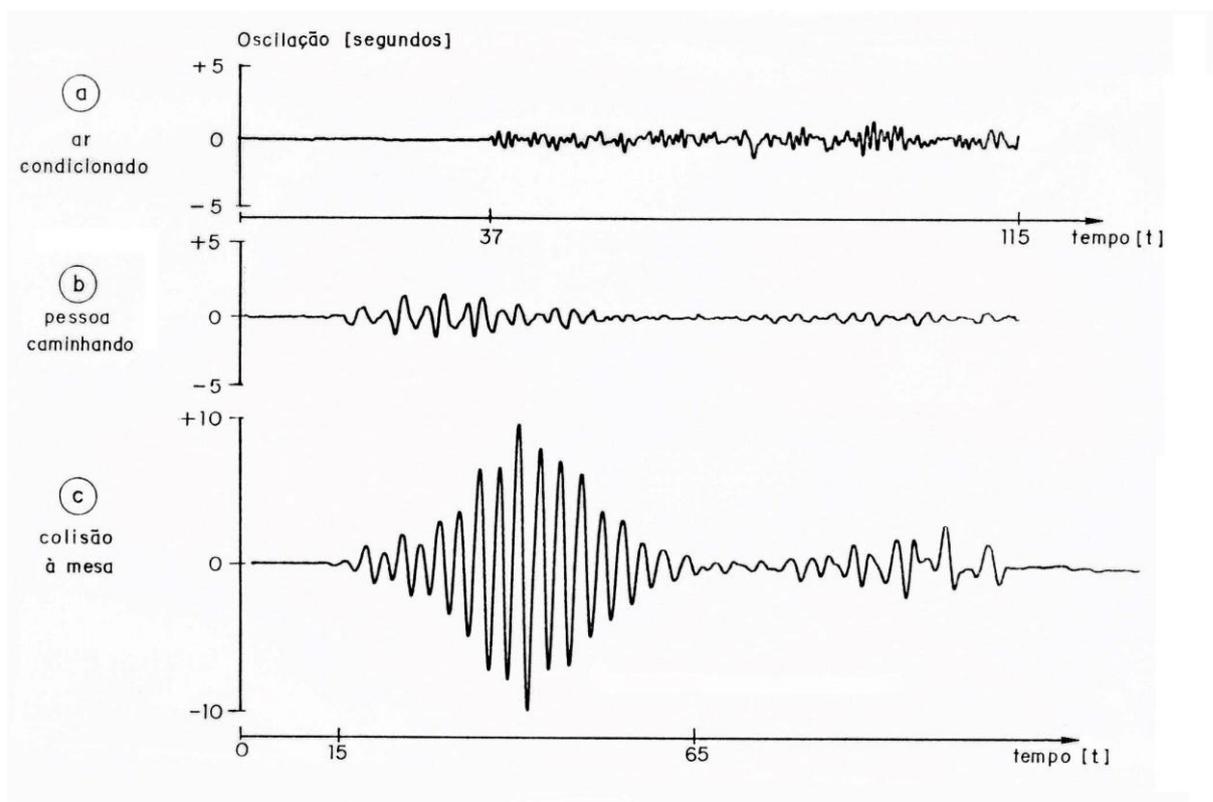


Fig. 4.8 - Influência de vibrações sobre o nível eletrônico

4.1.5 Umidade relativa do ar

A umidade do ar, associada a atmosferas salinas, poeiras, impurezas arenosas e outras, depositadas sobre os componentes eletrônicos e placas de circuito impresso, leva a modificar os valores das impedâncias dos circuitos eletro-eletrônicos, resultando numa alteração funcional com efeito sobre o sinal de saída do SM.

Também, em função da existência de diferentes materiais nos componentes de um circuito eletrônico, a umidade do ar passa a propiciar a geração de correntes galvânicas, sinais que podem se superpor ao do SM. Como exemplos característicos de perturbações devidas à umidade, pode-se citar:

- oxidação de contatos (interruptores, relés, potenciômetros e outros);
- oxidação das pistas de cobre do circuito impresso. (Este problema é minimizado pela aplicação de verniz sobre as placas de circuito impresso);
- oxidação de conectores de cobre e outros (banhos de ouro evitam a oxidação e conseqüente mau contato elétrico).

Em grandezas corporificadas, a umidade do ar, associada ao suor das mãos do operador, transmitido através do contato manual com as peças, provoca a corrosão superficial dos padrões e conseqüente alteração das características metrológicas /26/. Em outros SM, compostos por elementos mecânicos, leva à corrosão, prejudicando seu funcionamento normal.

4.1.6 Outras fontes de erro

Além daquelas analisadas, as seguintes fontes de erro podem tornar-se significativas:

a) Campos eletromagnéticos, podem provocar:

- geração de tensões induzidas que se superpõem ao sinal de medição. Exemplo: termopar;
- deflexão adicional nos SM com indicadores analógicos. Exemplo: Indicadores do tipo bobina móvel e ímã permanente;

b) Pressão atmosférica: pode ocasionar variações em função de oscilações climáticas e de massas de ar em movimento (mudanças de empuxo) influenciando sobre SM do tipo:

- manômetros de coluna de líquido;
- manômetros de êmbolo;
- balança;
- dinamômetros tipo peso morto.

c) Aceleração da gravidade: apresenta em torno do valor nominal ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$) variação com a latitude e altitude, devendo ser corrigida sua influência quando forem usados /27/:

- manômetros de coluna de líquido;
- manômetros de êmbolo;
- dinamômetros tipo peso morto, etc..

4.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA ESTUDO DA INSTABILIDADE

Conhecidas as causas da instabilidade da FT de um SM, é importante determinar experimentalmente o grau de influência de cada grandeza isoladamente, a fim de detetar aquelas que deverão efetivamente ser controladas ou compensadas

durante a utilização do SM.

Sob condições controladas de laboratório, realizam-se calibrações variando as GI uma a uma, para valores pré-estabelecidos, enquanto as demais são mantidas sob condições consideradas estáveis, e determinando, para cada condição preestabelecida, a FT do SM.

Deve-se adotar uma metodologia racional quanto ao nível detalhamento no levantamento de cada FT.

4.2.1 Procedimento geral para determinação da influência da temperatura

Citando a temperatura do ambiente como exemplo de GI, descreve-se um procedimento para determinação da influência da mesma sobre um SM, cuja faixa de temperatura de trabalho recomendada é de 0 a 40 °C.

Controlando as demais GI, realiza-se uma calibração criteriosa, conforme especificada no capítulo 3, para uma situação de referência, por exemplo 20 °C. Para os valores extremos de temperatura, 0 °C e 40 °C, realizam-se calibrações com menos pontos, o suficiente para observar variações de FZ, de Sb e comportamento. Se necessário e significativo for, realiza-se calibração para valores intermediários de temperatura, para verificar se o comportamento é linear com a GI. Como exemplos citam-se:

a) Manômetro bourdon

Na figura 4.9 é mostrado um esquema da montagem do experimento. Os ensaios foram realizados com o manômetro padrão à temperatura de $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ e o manômetro a calibrar foi ensaiado nas temperaturas de $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, $(35 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente.

Os resultados encontrados para as 3 diferentes temperaturas escolhidas podem ser observados no gráfico da figura 4.1.

Neste caso foram realizados 13 pontos de medição na faixa (pressão de 0 a 6 bar), nas temperaturas ambientes simuladas de 20, 35 e 50 °C, respectivamente.

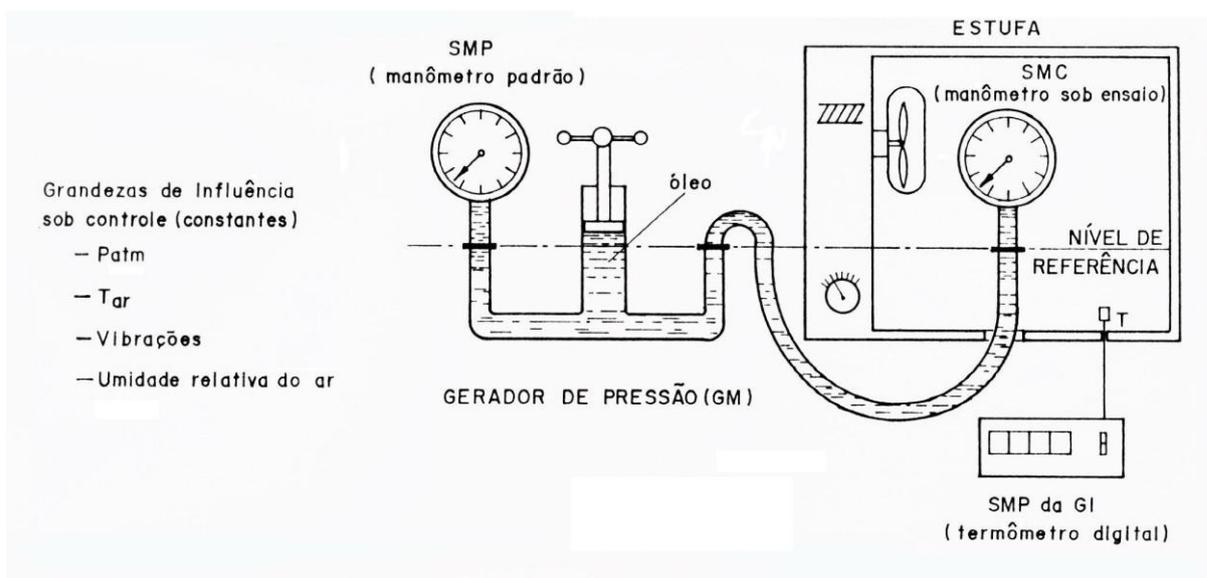


Fig. 4.9 - Influência da temperatura sobre a FT de um manômetro. Procedimento de ensaio

b) TS + I de um SM de deslocamento

Na figura 4.10 é apresentada a montagem do experimento. Observa-se que todo o SMP e o T do SM a calibrar estão à temperatura ambiente ($20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$). Os ensaios foram realizados às temperaturas de ($3 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$), ($12 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$), ($27 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$) e a ($40 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$), com a utilização de um ventilador para homogeneização da GI. Os resultados podem ser observados na figura 4.2.

O número de pontos de medição foi 17 em cada ensaio, nas temperaturas ambientes simuladas de 3, 12, 27 e $40 \text{ } ^\circ\text{C}$, respectivamente.

4.2.2 Influência da tensão de alimentação sobre o sinal de saída de SM

Usando-se um variador de tensão, submete-se o SM sob estudo a diferentes valores de tensão de alimentação, em geral na faixa de 10% acima até 30% abaixo da tensão nominal, ou no intervalo de flutuação da tensão de linha onde o SM é efetivamente utilizado. Registram-se para um valor constante da GM as variações de leitura do sinal de saída, para os diferentes valores de tensão de alimentação a que é submetido.

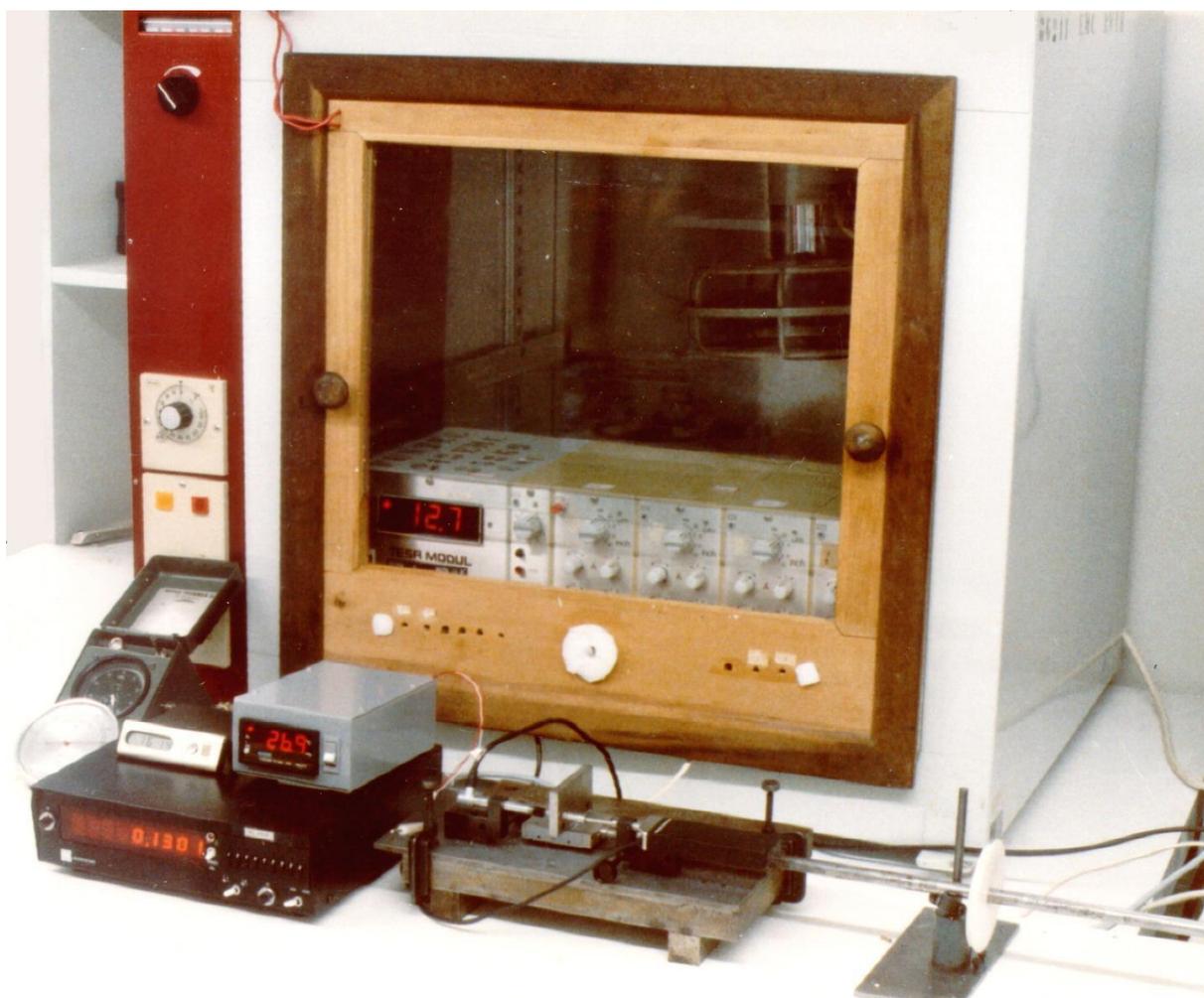


Fig. 4.10 - Influência da temperatura ambiente sobre a S_b do $T_s + I$ de um SM de deslocamento. Procedimento de ensaio

Na figura 4.11 é mostrado um esquema da montagem experimental de determinação da tensão de alimentação.

Na figura 4.7 são apresentados os resultados de um SM de deslocamento, onde foram realizados ensaios para o sinal de saída igual a - VFE (- 7 mm), zero (0 mm) e + VFE (+ 7mm), com a finalidade de detectar a FZ e da S_b do SM. Neste caso, em particular, os valores da tensão de alimentação elétrica foram variados de 220 V a 160 V. Não foi possível ensaiar o comportamento para tensões superiores a 220 V, por limitações do variador de tensão disponível.

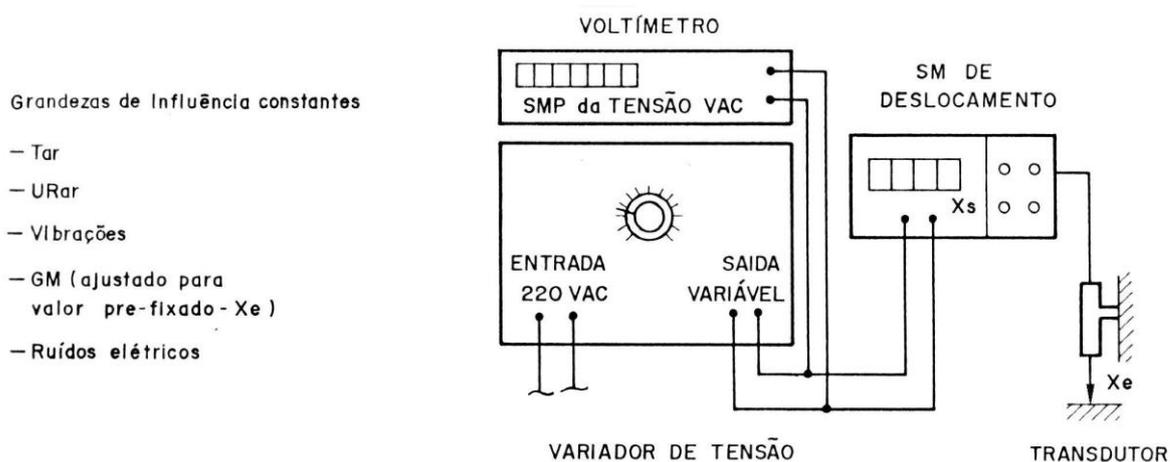


Fig. 4.11 - Influência da tensão de alimentação sobre X_s de um SM deslocamento. Procedimento de ensaio

4.3 MODOS DE MINIMIZAÇÃO OU COMPENSAÇÃO AUTOMÁTICA DAS INSTABILIDADES

Na determinação do valor de uma GM através do uso de um SM, é objetivo fazê-lo com a mínima presença de E nos resultados. Isto é realizável através do uso da FT determinada na calibração do SM, considerando os efeitos das GI. No entanto, para que a compensação de E tenha êxito, é importante que as GI sejam mantidas sob controle ou compensadas automaticamente.

4.3.1 Controle das GI

O controle das GI nem sempre é possível, e na maioria dos casos é desnecessário controlar todas as fontes causadoras de erros. É importante, todavia, controlar as mais importantes, que em geral são:

a) Temperatura e umidade relativa do ar quando os SM são usados em ambientes fechados, como laboratórios, salas, pavilhões, etc., é possível manter as condições ambientais dentro de faixas de temperatura e umidade especificadas, com auxílio de unidades de climatização (central de ar condicionado);

b) Vibrações podem em geral ser minimizadas através do uso de coxins amortecedores de borracha, isoladores pneumáticos, conjuntos de amortecimento com molas e atuadores hidráulicos, ou mesmo através da construção de salas

antivibratórias especiais, ou ainda, pela opção de afastar o SM das fontes geradoras de vibrações (máquinas, ruas movimentadas, etc.);

c) Tensão de alimentação, frequência de rede e ruídos elétricos:

- Tensão de alimentação

Com auxílio de estabilizadores de tensão consegue-se facilmente corrigir variações de tensão para próximo do seu valor nominal. Isto se faz extremamente necessário em SM mais antigos, que não dispõem de fonte de tensão estabilizada.

- Frequência de rede e ruídos elétricos

Tratando-se de SM sensíveis à variação de frequência, distorção harmônica e ou transitórios de tensão, deve ser usada uma "Central de Condicionamento e Distribuição de Energia Elétrica" recomendada também para sistemas computacionais /25/. Infelizmente é uma solução que envolve custos adicionais.

4.3.2 Compensação automática dos efeitos das grandezas de influência

Quando é inviável tecnicamente ou economicamente o controle das GI e, assim, de seus efeitos, adota-se a técnica da compensação automática dos efeitos significativos do desempenho do SM.

São usadas diferentes técnicas de compensação, podendo ser adotada solução do tipo:

- mecânica;

- eletro-eletrônica;

- eletrônica-computadorizada.

Esta compensação deve acontecer em tempo real já que o comportamento da GI é aleatório. Citam-se como exemplos:

a) Termômetro a gás

Trata-se de um SM simples (fig. 4.12), já obsoleto, mas equipado com dispositivo automático de compensação da variação da temperatura ambiente atuante sobre o tubo capilar e o compartimento que contém a unidade de tratamento de sinal mais indicação. /3/.

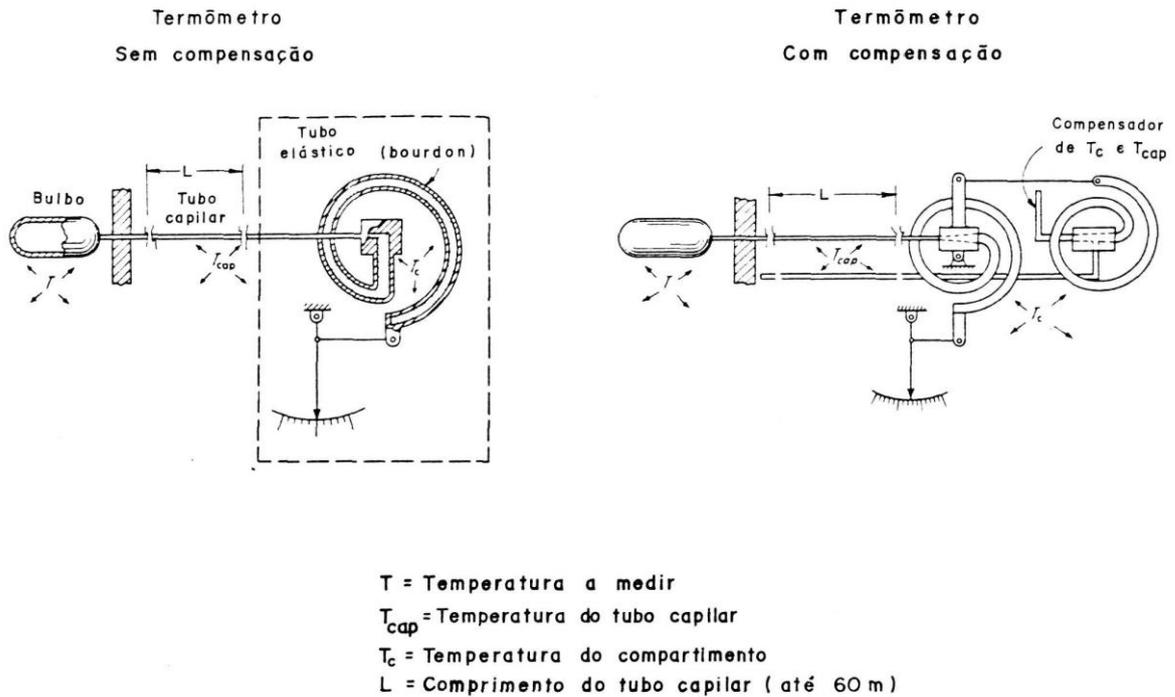


Fig. 4.12 - Termômetro a gás. Compensação automática

b) Termopar com gelo eletrônico

Um dos problemas na medição da temperatura com SM utilizando termopares é o controle da temperatura de referência.

Os termômetros elétricos modernos (fig. 4.13) são adotados de um dispositivo eletrônico denominado de gelo eletrônico que mede a temperatura do ambiente através de um termorresistor e compensa a diferença da temperatura do ambiente em relação a temperatura de referência ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$), superpondo um valor de tensão proporcional à tensão termoelétrica gerada pela termopar /28/.

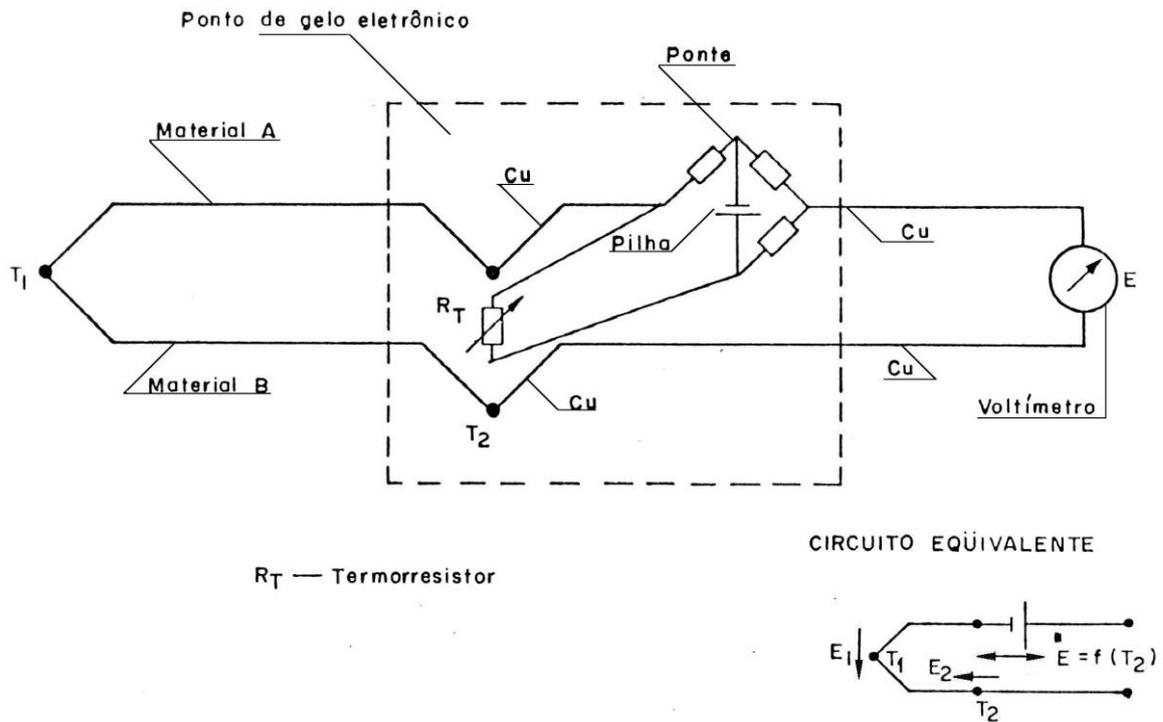


Fig. 4.13 - junta de referência de termopar. Compensação automática das GI

c) Comparador de BP

Na medição de BP por comparação (método direto) é importante ter um rígido controle sobre as temperaturas efetivas dos BP, afim de compensar a dilatação térmica dos mesmos (fig. 4.14).

A medição automatizada do comprimento e da temperatura dos BP permite minimizar os tempos de medição e conseqüentes possíveis variações de comprimento nos BP devidas aos diferentes coeficientes de expansão térmica e temperatura dos BP de referência e a calibrar. Os comprimentos do BP devem ser referenciados à temperatura de 20,0 °C. Com auxílio do mesmo sistema computacional empregado para medir é realizada também a compensação do Es do BP de referência.

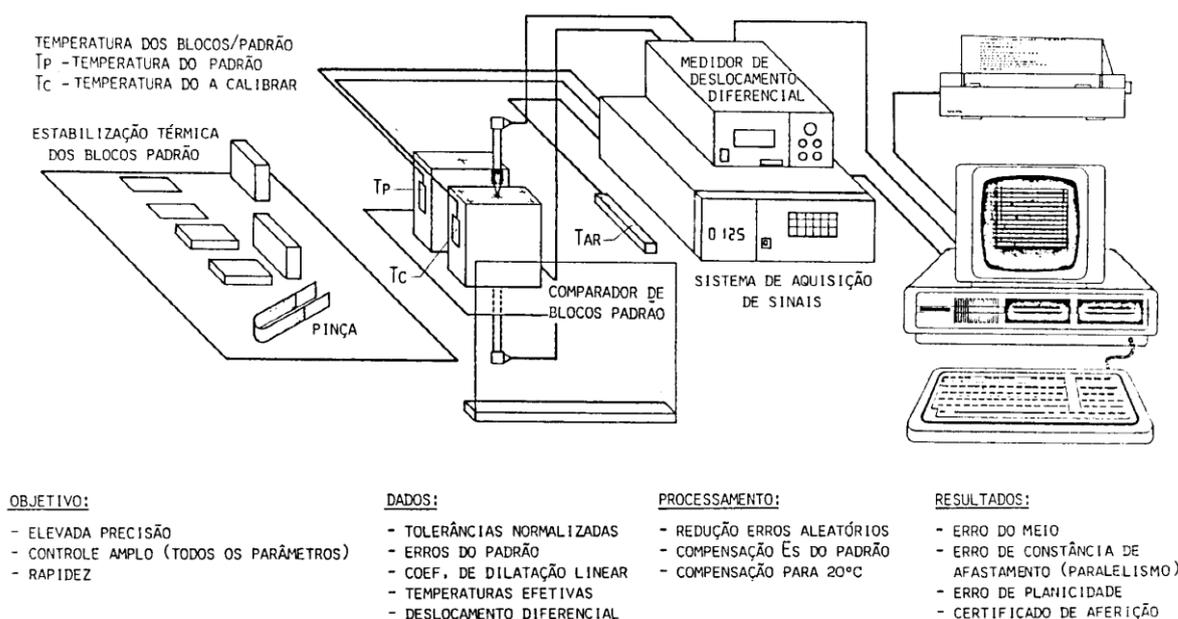


Fig. 4.14 - Calibração de BP. Compensação automática das GI

c) Laser interferométrico

É um SM de alta qualidade destinado a realizar medições de deslocamento (fig. 4.15), podendo ser usado em ambientes não climatizados, em função da compensação automática computadorizada do comprimento de onda do raio laser. As GI atuantes são a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e pressão atmosférica, que são medidas continuamente e compensadas através do computador, obtendo-se o deslocamento medido referido a condições padrão /10, 29/.

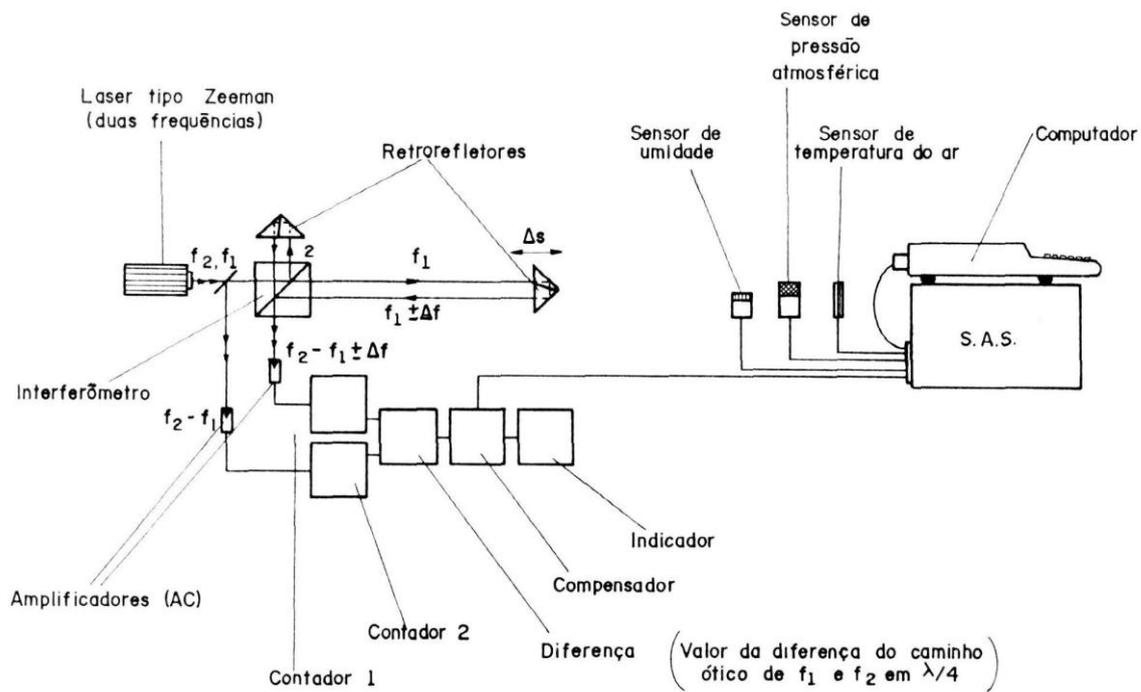


Fig. 4.15 - SM com Laser Interferométrico. Compensação automática das GI

5. CORREÇÃO DOS ERROS SISTEMÁTICOS

É um artifício usado para minimizar a Im de SM, quando há necessidade de realizar medições criteriosas. Com isto pode-se conseguir, muitas vezes, a obtenção de bons resultados de medição usando SM de menor custo, e em outros casos resolver sofisticados problemas de medição usando os SM disponíveis.

5.1 OTIMIZAÇÃO DO RESULTADO DA MEDIÇÃO USANDO FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA REAL

Torna-se vantajosa a realização da correção de erros, usando a FT real determinada em calibração específica do SM, desde que os Es sejam superiores aos Ea correspondentes, principalmente quando Es é maior ou igual a duas vezes a DM.

Deverá também ser considerado o comportamento metrológico em função das GI atuantes sobre a FT. Pode-se destacar duas situações distintas, que são:

- SM operando sob condições estáveis das GI;
- SM operando sob condições adversas das GI.

5.1.1 Correção de erros sob condições estáveis de GI

O comportamento da FT real pode ser apresentado de diferentes modos, devendo ser selecionada a opção mais adequada para cada caso de aplicação, para realizar a correção dos Es.

a) Tabela de conversão

Trata-se de uma relação numérica de valores indicados pelo SM em relação aos valores efetivos, apresentados em forma de tabela. Para maior conveniência constam nestas tabelas os valores efetivos em unidades diferentes das do SM em questão, como por exemplo, na do Sistema Internacional de Unidades (SI). Na tabela de conversão pode ser incluída a própria conversão da unidade de leitura para a unidade de medida, aplicando os parâmetros de transformação de unidade do SM.

Na figura 5.1 apresenta-se um exemplo de "Tabela de Conversão" para um dinamômetro.

Neste caso a unidade de leitura, não coincide com a de medida usualmente

empregada pelo usuário.

A correção dos Es é realizada, entrando-se com as leituras indicadas pelo dinamômetro na coluna (b) em μm , obtendo-se na coluna (c) o valor efetivo da força em kgf.

Deve-se ressaltar que os valores efetivos da GM ainda estarão afetados de uma l_m , que neste caso corresponde à DM, caso não tenham sido feitas reduções de E_a fazendo-se diversas leituras.

Os valores intermediários podem ser obtidos por interpolação linear.

b) Curva de erro

Através da CE pode-se determinar o Es e a DM correspondente a cada leitura do SM.

Com isto é possível obter resultados de medição com menor indeterminação do resultado, através da correção do Es.

Tratando-se de uma GM invariável (massa, comprimento de uma peça à temperatura constante, etc.), a variação nas medidas é originada exclusivamente pelo SM. Realizando-se diversas medidas, pode-se avaliar também estatisticamente o erro residual, como sendo a DM obtida do gráfico da CE dividida pela raiz do número de medições realizadas.

Na figura 5.2 é apresentado um exemplo de CE para um manômetro. Neste caso os Es são significativos a partir de 80% da FO.

MEDIDA DO SM NAS
UNIDADES INDICADAS

a	b	c	d	e
	Leitura SM [um]	VEM U. Anal. [kgf]	VEM SM [um]	VEM U. SI [N]
1	100	171	103	1677
2	200	338	205	3315
3	300	501	304	4913
4	400	662	401	6492
5	500	823	499	8071
6	600	988	599	9689
7	700	1152	698	11297
8	800	1316	798	12905
9	900	1481	897	14524
10	1000	1642	995	16102
11	1100	1803	1093	17681
12	1200	1964	1190	19260
13	1300	2125	1283	20839
14	1400	2285	1385	22408
15	1500	2446	1482	23987
16	1600	2607	1580	25566
17	1700	2768	1678	27145
18	1800	2929	1775	28724
19	1900	3089	1872	30293
20	2000	3248	1969	31852
21	2100	3407	2065	33411
22	2200	3564	2160	34951
23	2300	3720	2255	36481
24	2400	3876	2349	38010
25	2500	4032	2444	39540
26	2600	4190	2539	41090
27	2700	4348	2635	42639
28	2800	4506	2731	44189
29	2900	4660	2824	45699
30	3000	4813	2917	47199
31	3100	4966	3010	48700
32	3200	5120	3103	50210

NOTA:

col.b Leitura no Sistema de Medicao
col.c Valor Efetivo Medio
col.d Valor Efetivo Medio
col.e Valor Efetivo Medio

TABELA DE CONVERSÃO (baseada na media das curvas de carregamento)

Fig. 5.1 – Correção de Es. Tabela de Conversão

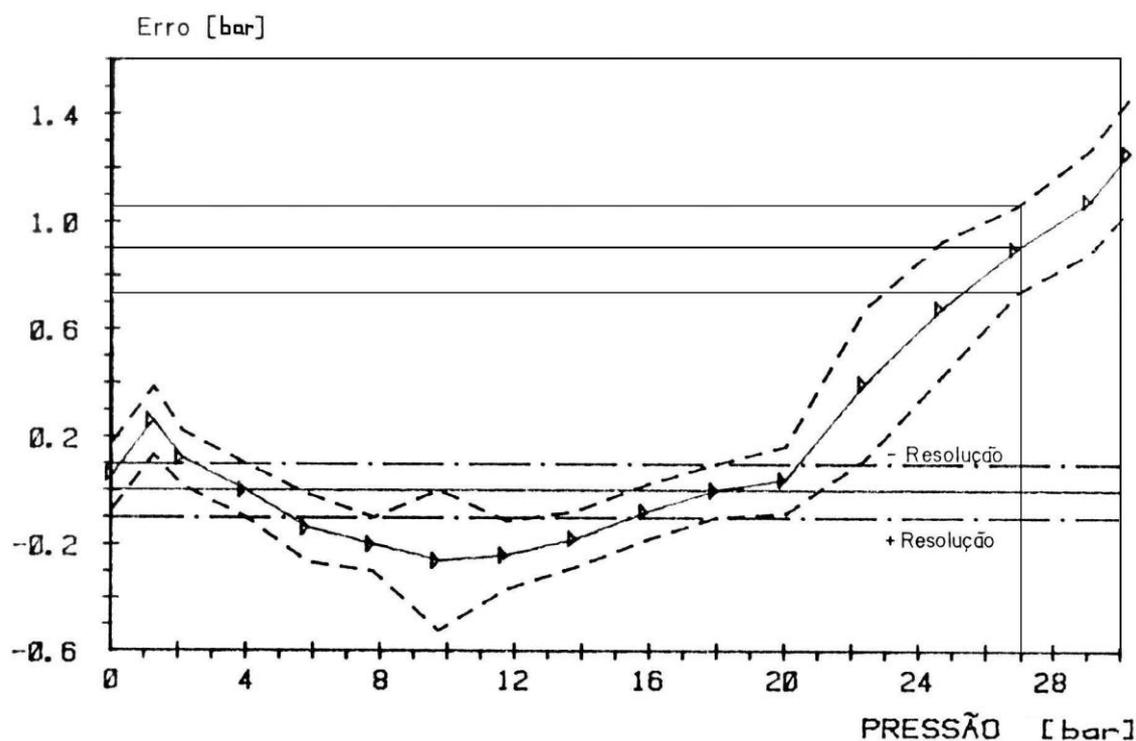


Fig. 5.2 - Correção de Es. CE

Quando por exemplo, for utilizado este manômetro para realizar uma medição, e a leitura obtida for igual a 27,0 bar, o valor do Es a ser corrigido é de 0,9 bar, correspondendo então a um valor efetivo de pressão igual a 26,1 bar, ao qual fica associada a DM igual a $\pm 0,15$ bar, que representado com um algarismo significativo será $\pm 0,2$ bar. Logo o resultado da medição será (26,1 $\pm 0,2$) bar /30/.

c) Método numérico

Consiste na correção dos Es determinados a partir dos valores coordenados (GMi, Li) da FT real levantados na calibração.

Sua aplicação principal é em SM computadorizados, onde a FT real pode ser introduzida e seus E corrigidos automaticamente durante as medições. Também é altamente prático quando se dispõe de um computador para realizar o processamento após o trabalho experimental.

As vantagens do método numérico podem ser observadas na figura 5.3.

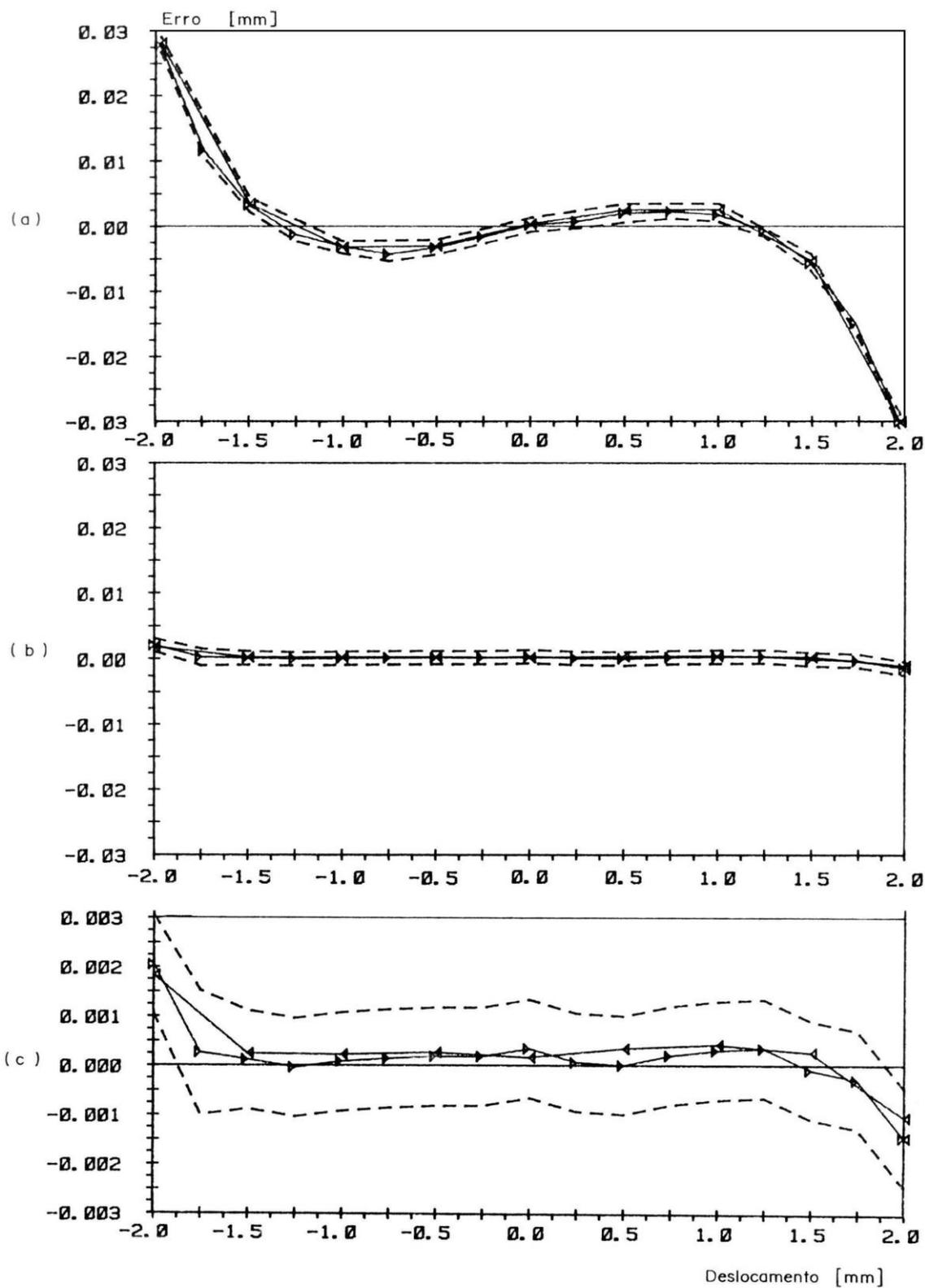


Fig. 5.3 - Correção de Es. Método numérico

Trata-se de um SM eletrônico de deslocamento do tipo indutivo, que após a calibração mostrou ter excelentes características metrológicas, a não ser pela presença de Es (fig. 5.3.a).

Na utilização deste SM com correção pelo método numérico, e fazendo uma nova calibração do SM, observa-se que a l_m foi reduzida aproximadamente 10 vezes (fig. 5.3.b e c), ficando restrito a DM.

d) Método analítico.

Consiste em ajustar um polinômio aos valores coordenados da FT determinados na calibração. O grau apropriado do polinômio dependerá do comportamento característico da FT.

Um exemplo que atesta de forma clara as vantagens do ajuste de polinômios de grau maior que um ($k > 1$) à FT real, é apresentado na figura 5.4. Consiste de um SM de força de compressão para até 500 kN.

Foi ajustado inicialmente um polinômio de grau ($k = 1$) pelo m.m.q. ao conjunto de dados experimentais. A CE resultante é apresentada na fig. 5.4.a. Em linha tracejada está traçada a DM ($P = 95\%$).

Um polinômio de grau dois ($k = 2$) pelo m.m.q. foi ajustado ao mesmo conjunto de dados experimentais. A CE determinada a partir dos valores calculados por este polinômio e os valores efetivos de força são apresentados na figura 5.4.b.

Comparando as duas CE de grau um e dois, não se constata diferenças significativas.

Quando, no entanto, ajustamos um polinômio de grau três ($k = 3$), pelo m.m.q., a redução dos Es é muito mais significativa que para os casos anteriores. Este resultado, deve-se à forma da curva da FT real, que apresenta comportamento típico de um polinômio de grau 3. A CE da figura 5.4.c mostra o E entre este polinômio ajustado e os valores efetivos de força.

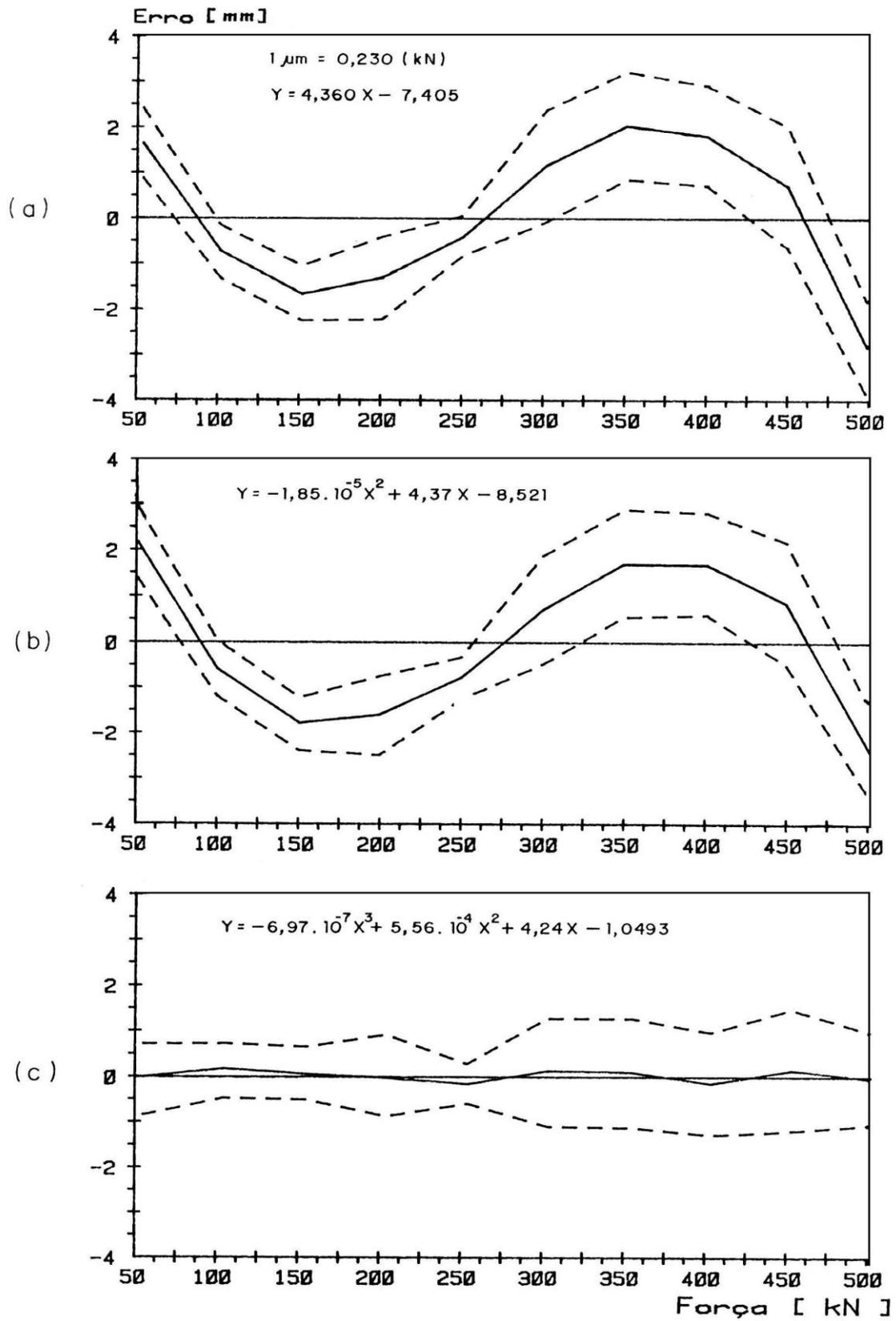


Fig. 5.4 - Correção de Es .Método analítico

5.1.2 Otimização quando o SM é usado sob condições adversas de GI

Quando atuam grandezas de influência sobre o SM a correção dos Es não é tão imediata como nos casos citados no item 5.1.1. É necessário conhecer a influência de cada GI como foi analisado no capítulo 4. É importante identificar as grandezas cuja influência são significativas, como por exemplo, a temperatura, que de uma forma geral atua sobre a FT da maioria dos SM. Quando há duas ou mais GI que alteram significativamente a FT, a correção por CE torna-se bastante complexa.

Diante disto é necessário fazer a correção dos Es usando as famílias de FT e a monitoração das GI. Como exemplo típico em que devemos controlar as GI para correção dos Es, cita-se o SM que opera com o Laser Interferométrico Modular (LIM). Como citado no capítulo 4, é importante que se controle três GI, sendo elas, temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar. Este é um caso em que a correção via computador se faz necessária, pois envolve uma série de cálculos e medições que seriam morosos se realizados manualmente (fig. 4.15).

Quando se dispõe: de uma família de FT, escolhe-se a FT de correção em função do valor da GI, procedendo-se daí para frente como descrito no item anterior.

Caso o comportamento do SM em função da GI possa ser caracterizado univocamente em termos de FZ e FS, pode-se equacionar o valor de correção em relação a um valor de referência da GI e a seguir adicionar a correção pela FT real relativa a esta condição de referência.

5.2 FORMAS DE CORREÇÃO

5.2.1 Correção manual

Trata-se da forma mais simples de eliminar o Es das medidas, aplicável somente para medições estáticas e quase estáticas, devendo necessariamente ser realizada após a execução das medições, por se tratar de uma operação de cálculo de valores a ser executada pelo operador mediante consulta à FT real do SM.

A representação da FT na forma de tabela de conversão e CE é a maneira mais prática de realizar a análise para obtenção do valor corrigido. A tabela de conversão,

por apresentar uma relação numérica de valores informados pelo SM e o correspondente valor efetivo em diferentes unidades, permite facilmente obter o valor corrigido pelos valores discretos informados na tabela. A CE, por facilitar a interpretação da ordem de grandeza dos erros, possibilita a obtenção de valores corrigidos intermediários aos pontos levantados na calibração.

Sua aplicação acontece onde há uma baixa frequência de utilização do SM com necessidade de obtenção de resultados confiáveis e uma incerteza de medida minimizada. Exemplos:

- medições estáticas na pesquisa experimental;
- compensação da não linearidade de anéis dinamométricos usados como padrões de força;
- tabela de erros de comprimento de blocos padrão.

5.2.2 Correção automática

É aplicável a medições estáticas, quase estáticas e dinâmicas, em função da possibilidade de executar quase simultaneamente à medição, trazendo vantagens como a minimização do tempo de correção, e a inexistência de erros provocados por falha humana no cálculo da correção [31, 32].

Existem diferentes formas de executar a correção automática, podendo ser adotadas soluções mecânicas, eletroeletrônicas ou computadorizadas.

a) Soluções mecânicas.

Usadas em SM integrados a máquinas de medir e máquinas ferramenta, registradores e outros, antes da existência da automação eletrônica computadorizada [3]. Atualmente está em desuso devido à dificuldade da execução do mecanismo de automação, que em geral deve ser desenvolvido especialmente para cada máquina ou sistema, em função dos Es específicos, necessitando para tanto técnicos especializados em mecânica de precisão.

Na figura 5.5 é mostrado um sistema mecânico de correção do Es de posicionamento de uma mesa medidora de deslocamento.

b) Soluções eletroeletrônicas

Largamente utilizados em SM que usam transdutores com FT não linear. Em geral a linearização é feita eletronicamente na unidade de tratamento de sinal por

circuitos especialmente projetados para atender a cada SM em particular /33, 34/.

São exemplos, SM como:

- termômetro digital com transdutor tipo termopar e termistor;
- medidores de força, torque, pressão e outros, equipados com transdutores não totalmente linearizados.

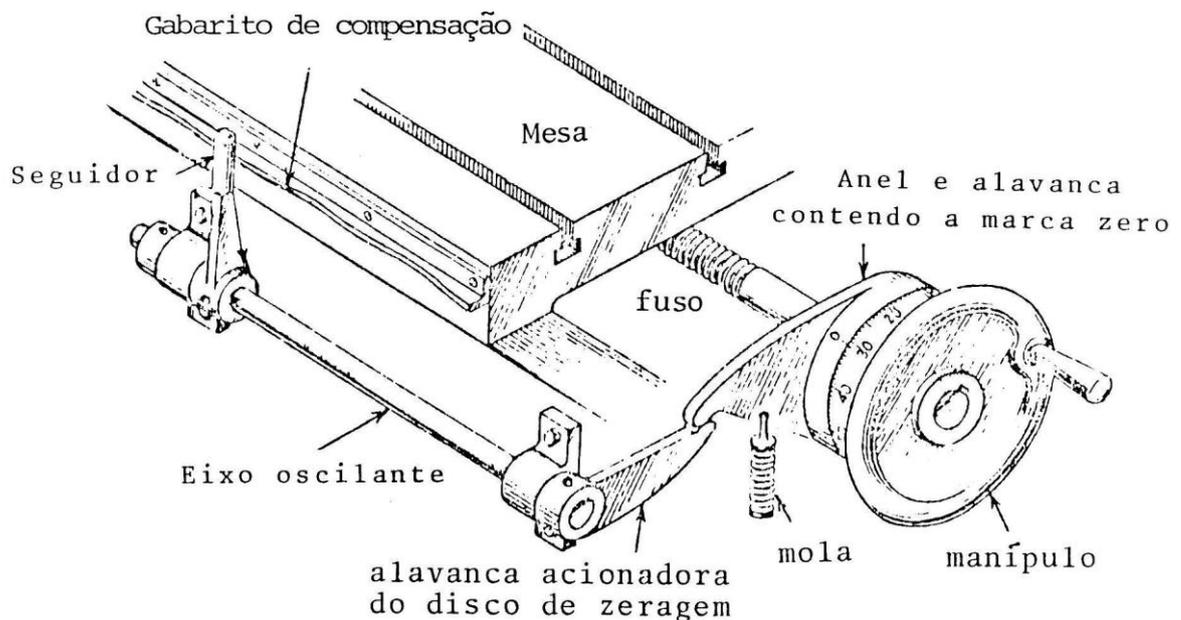


Fig. 5.5 - Sistema mecânico para correção do erro sistemático de posicionamento

c) Soluções computadorizadas

A correção de Es pode ser realizada pelo método numérico ou analítico, tendo as mais diversas aplicações como:

- No controle de qualidade de linhas de produção, onde são empregados SM computadorizados /35/;
- Em máquinas ferramenta ou de medir por CNC, que permitem corrigir os E geométricos, em função de calibrações realizadas;
- Em máquinas de medir por coordenadas, etc. /36/.

As principais vantagens da correção dos Es computadorizada são:

- possibilidade de atender simultaneamente a vários SM;
- informar resultados das medições corrigidas de imediato;

- realizar correções de flutuação de zero, sensibilidade e comportamento em função de condições ambientais (GI) pelo uso de famílias de FT;
- minimização dos tempos de processamento e apresentação dos resultados.

Em função do tipo de sistema de medição, de grandeza a medir e do número de medições, podem ser usados:

- computadores universais (micro, mini ou de porte), para correção após a medição, no processamento de dados. A prática atual é o emprego de microcomputadores associados a Sistemas de Aquisição de Sinais que permitem a correção direta das medidas pelo método numérico;
- Microcomputadores dedicados exclusivamente ao SM. Consiste no uso de microprocessadores com finalidade específica de fazer conversão de leitura em medida compensando Es e eventualmente reduzindo a DM revelando os melhores resultados em termos de funcionabilidade, desempenho e tempo de resposta.

Trata-se de uma, técnica que gradativamente será aplicada com maior freqüência, iniciando pelos SM mais sofisticados.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho baseia-se na experiência adquirida na qualificação de sistemas de medição, máquinas de ensaio de materiais e máquinas ferramenta realizadas com o máximo conteúdo técnico e científico pelo LABMETRO, dentro de um programa de prestação de serviços às indústrias.

Os subsídios da prática deram condições de propor uma metodologia moderna e prática de calibração, extendendo-se os estudos a um aspecto cada vez mais importante que é a otimização de sistemas de medição.

Em função do exposto no transcorrer do trabalho, pode-se concluir:

a) Quanto à metodologia de trabalho:

- as análises teóricas e experimentais da estabilidade da função transferência sujeita à atuação de grandezas de influência sobre os sistemas de medição, mostraram ser fundamental o emprego de metodologias criteriosas, como as propostas neste trabalho. Assim, racionalizam-se os experimentos com a obtenção do maior número de informações sobre a função transferência, possibilitando-se um conhecimento detalhado do comportamento metrológico do sistema de medição.

b) Quanto a estabilidade da função transferência:

- Trabalhos práticos de determinação dos efeitos causados pelas grandezas de influência atuantes sobre os SM mostraram claramente que a temperatura é a de maior importância, seguida de outras que podem ser significativas, em função do tipo de sistema de medição, como vibrações de baixa frequência, ruídos elétricos e outras, introduzindo nos sistemas de medição flutuações de caráter transitório (E_a) ou alterações de caráter permanente (E_s).

c) Quanto à minimização dos erros:

- A possibilidade da obtenção de medições criteriosas com Sistemas de Medição que apresentam E_s significativos, porém estáveis, comparativamente aos E_a , pela realização da correção por um dos métodos citados no capítulo 5.

- Quando as grandezas de influência são variáveis, porém conhecidas através de monitoração computadorizada ou equivalente, é possível minimizar os E_s , compensando-os através de famílias de curvas de erro.

- Correções de E_s em sistemas de medição computadorizados, devem ser efetuadas

sempre que o sistema o permita, a fim de obter resultados finais corrigidos.

d) Quanto à contribuição técnico-científica do trabalho:

- Foram estabelecidos aspectos importantes no procedimento de determinação da função transferência sob condições de grandezas de influência controlada;
- Foi proposta uma metodologia racional de determinação das causas perturbadoras da função transferência para sistemas de medição que operam sob condições ambientais adversas;
- Foi mostrada a relevância das ações de qualificação (calibração/aferição) dos sistemas de medição, em função dos erros que os mesmos apresentam;
- Foi obtida a otimização do Programa Universal de Calibração existente no LABMETRO, permitindo que, além do processamento e da documentação, realize também a aquisição automática dos dados.

e) Quanto à continuidade usando os subsídios levantados por este trabalho sugere-se:

- implantar e operacionalizar a minimização matemática de Es em SM convencionais através do uso de microcomputadores pessoais associados a sistemas de aquisição de sinais, pelo emprego dos métodos numérico e analítico citados neste trabalho.
- Desenvolver SM com microcomputador dedicado, para corrigir Es estáveis juntamente com a compensação de FZ e Sb provocadas pelas GI simultaneamente monitoradas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ PROFOS, P. Hanbuch der Industriellen Messtechnik; Vulkan-Verlag; Essen; 3-8027-2119-5; S.442-444; 1978.
- /2/ ISA Standarts and Practices for Instrumentation; Instrument Society of America; North Carolina; 87664-450-7; (S 51.1) p.32-35; 1980.
- /3/ DOEBELIN, E.O. Measurement Systems, Application and Designs; Mc Graw-Hill International Book Company; Singapura; 0-07-017337-0; p.99-137; 1983.
- /4/ SCHNEIDER, C.A. Metrologia Dimensional Básica; UFSC; Florianópolis; 1986.
- /5/ DIN 1319 Grundbegriffe der Messtechnik Beuth Verlag GMBH; Berlin; Teilen 1, 2 und 3; 11/1971, 12/1968 Und 01/1972.
- /6/ KOHLRAUSCH, F. Praktische Physik; B.G. Teubner; Stuttgart; S.41-74; 1968.
- /7/ SCHNEIDER, C.A. Qualificação de Instrumentos de Medição; SCHOELER, N. LABMETRO; 1985.
- /8/ SCHNEIDER, C.A. Metrologia Dimensional; UFSC; Florianópolis; 1985.
- /9/ SCHRUFER, R. Elektrische Messtechnik; Carl Hanser Verlag; München; 3-446-14203-7; S.14-17;1984.
- /10/ WARNECKE,H.J. Fertigungsmesstechnik Handblich für Industrie und Wissenschaft; Springer Verlag; Berlin; 3-540-11789-9; 5.499-501; 1984.
- /11/ SCHNEIDER, C.A. Sistemas de Medição; LABMETRO; Florianópolis; FLESCH, C.A. 1985. LUCKE, H.A.
- /12/ ASA-C 39-6 Automatic Digital Voltmeters and Radio Meters; American Standarts Association Inc.; New York; 1963.
- /13/ ANSI-B.40.2 Gauges and Indicators Pressure and Vacuum Indicatin Digital Type; The American Society of Mechanical Engineers; New York; 1977.

- /14/ HOTTINGER, K. Welche Genauigkeit ist bei der Kraftmessung und Wagung mit DMS Erreichbar und Welche Genauigkeit Muss Demzufolge von den Prüfmitteln Verlangt Werden; VDI Bericht 137; Darmstadt; 1970.
- /15/ ABNT NBR 6156 Máquinas de Ensaio de Tração e Compressão; ABNT; 09/1983.
- /16/ DALLA VALENTINA, L.V.O. Ensaio Geométricos de Máquinas Ferramentas com laser de Alinhamento; UFSC; Florianópolis; 03/1986.
- /17/ SCHNEIDER, C.A. Programa Universal de Calibração; UFSC; Florianópolis.
- /18/ JONES, B.E. Messgeraete, Messverfahren, Mess-systeme; Teil 1; R.Oldenbourg Verlag; München; 3-486-22511-1; 5.172-185; 1980.
- /19/ FUNKSCHAU Grundschtaltungder Elektronik 2; Sonderheft 17; Franz Verlag; München; 1984.
- /20/ TESA Sistema de Medição de Deslocamento com Indicação Digital; Tesa; Renens.
- /21/ HERINGHAUS, E. Traegerfrequens und Gleichspannungs Messverstaerker fuer das Messen Mechanischer Grössen.
Ein Systemvergleich als Anwendungstechnischer Sicht HBM Messtechnische Briefe 18; Darmstadt; Heften 2 (Teil 1) und 3 (teil 2); 1982.
- /22/ LABMETRO Qualificação de Máquinas de Ensaio de Materiais; relatórios 171/83, 057/84, 268/85 e 050/86; Florianópolis; 1983 a 1986.
- /23/ LABMETRO Qualificação de Máquinas de Ensaio de Materiais; relatórios 03/83, 050/84 e 300/85; Florianópolis; 1983 a 1985.
- /24/ JONES, B.E. Messgeraete Messverfahren Mess-systeme; Teil 2; R. Oldenburg Verlag;.München; 3-486-22511-1; 216-22; 1980.
- /25/ BK CONTRÔLES Ruído Elétrico: Sabotador do Processamento Eletrônicos de Dados; Informativo Técnico BK 002; Porto Alegre; 1984.

- /26/ DIN 861 Parallelendmasse: Begriffe, Anforderrungen, Prüfung; Berlin; 1980.
- /27/ WEILER, W. Kraftmessgeraete für die Untersuchung und der Vergleich van Kraft-Normalmesseinrichtugen; Elektrisches Messen Mechanischer; HBM; Darmstadt; VM 74003; 1974.
- /28/ OMEGA Compensator and Ice Point References; Temperature Measurement Handbook; Omega; Stanford; 1979.
- /29/ HEWLETT PACKARD Calculation of Exact Compensation Factor; Laser Transducer System 5501A Operating and Service Manual; 1977.
- /30/ LABMETRO Estudo da Influência da Temperatura sobre o comportamento de um Manômetro; relatórios 043, 045, 046 e 047/83; Florianópolis; 1983.
- /31/ HOFMANN, D. Hanbuch Messtechnik und Qualitaetssicherung; Vieweg; Wiesbaden; 3-528-08507-x; 1983.
- /32/ GUMMERSBACH HEUSER, B. Rechnergestuetztes Mess und Prüfsystem in der Qualitaetssicherung; QZ Management der Qualitaetssicherung; 27-Heft 1; 1982.
- /33/ GUITON, R.D. Feedback Lineares Resistance Bridge; Eletronics; 10/1982.
- /34/ BROUGHTON, N.B. Analysis and Design of Almost-Linear and One-Thermistor Temperature Transducer; IEEE Transactions on Instrumenattions and Measurement; Vol. IM-23 N° 1; p.1-5; 03/1974.
- /35/ HOFMANN, D. Intelligente Messtechnik Automatisiert die Qualitätskontrolle; Feingerätetechnik; VEB Verlag Technik; 10.84 S. 447-452; 1984.
- /36/ POULTER, K. F. Computer Aided Dimensional Engineering Metrology, Advantages and Disadvantages; National Physical Laboratory Uk; p.37 – 44.