

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

ANÁLISE DO DESEMPENHO METROLÓGICO DE UMA
PRENSA DINAMOMÉTRICA

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

Cláudio de São Plácido Brandão

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1983

ANÁLISE DO DESEMPENHO METROLÓGICO DE UMA
PRENSA DINAMOMÉTRICA

Cláudio de São Plácido Brandão

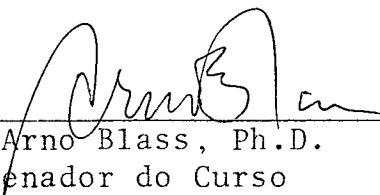
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE

"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA - ÁREA DE CONCENTRAÇÃO - FA
BRICAÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO.

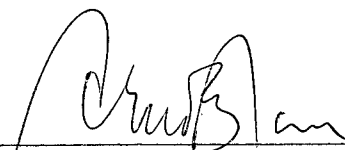


Prof. Hermann Adolf Harry Lücke, Dr. Ing.

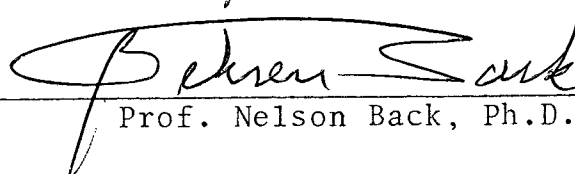


Prof. Arno Blass, Ph.D.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Arno Blass, Ph.D.
PRESIDENTE



Prof. Nelson Back, Ph.D.



Prof. Romeu Odilo Trauer, M.Sc.

Em Homenagem Póstuma
Ao PROFESSOR JAROSLAV KOZEL

À Ilo, Leony, Stela e
Nadyesda

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Hermann Adolf Harry Lücke, pela orientação na realização deste trabalho;

À toda equipe do LABMETRO, pela disponibilidade dos equipamentos e pela colaboração na realização dos ensaios;

Aos amigos, pelo incentivo nas horas difíceis;

Ao Professor Arno Blass e membros da Banca, pelo auxílio na confecção da forma final do trabalho;

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I		Pág.
INTRODUÇÃO.....		01
1.1. CÉLULAS DE CARGA.....		01
1.2. CALIBRAÇÃO DE CÉLULAS DE CARGA.....		02
1.2.1. Método Direto.....		03
1.2.2. Método Indireto.....		04
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO.....		06
CAPÍTULO II		
2.1. INTRODUÇÃO.....		07
2.2. DESCRIÇÃO DA PRENSA.....		07
2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....		10
2.4. LOCALIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES.....		12
2.4.1. Extensômetros de Resistência Elétrica.....		12
2.4.2. Medidores Indutivos de Deslocamento.....		12
2.5. INFLUÊNCIAS SOBRE A CALIBRAÇÃO DE CÉLULAS DE CARGA..		13
2.5.1. Sensibilidade a Forças Laterais.....		13
2.5.2. Influência de Carregamentos Excêntricos.....		15
2.6. AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE MEDIÇÃO DA PRENSA.....		15
CAPÍTULO III		
ENSAIOS REALIZADOS.....		17
3.1. INFLUÊNCIAS SOBRE A CALIBRAÇÃO.....		18
3.1.1. Erros no Sistema de Medição.....		18
3.1.2. Características Estáticas do Sistema de Medi- ção.....		19

3.1.3. Curvas de Erros.....	20
3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	21
3.2.1. Emprego de um Sistema de Aquisição de Sinais.	21
3.2.2. Equipamentos Utilizados.....	22
3.3. PLANO DE ENSAIO.....	25
3.3.1. Calibração dos Transdutores da Prensa.....	25
3.3.2. Calibração das Colunas da Prensa.....	26
3.3.3. Calibração da Prensa Dinamométrica.....	30

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E ANÁLISES.....	32
4.1. CALIBRAÇÃO DAS COLUNAS.....	32
4.1.1. Erros Sistemáticos.....	34
4.1.2. Erros Aleatórios.....	40
4.2. CALIBRAÇÃO DA PRENSA.....	46
4.2.1. Erros Sistemáticos.....	46
4.2.2. Erros Aleatórios.....	54
4.3. COMPORTAMENTO FRENTE A CARREGAMENTOS EXCÊNTRICOS....	57

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
APÊNDICE I.....	62

SIMBOLOGIA

A	Área da coluna	mm
E	Módulo de elasticidade longitudinal	N/mm ²
F	Força aplicada	N
I _m	Incerteza de medição	kN
ℓ ₀	Comprimento inicial	mm
R	Resistência elétrica	Ω
S	Sensibilidade	με/kN
s	Desvio padrão para amostras	kN
X _e	Valor de entrada	kN
X _s	Valor medido	με
Δℓ	Alongamento	mm
ΔR	Variação de resistência	Ω
ε	Deformação específica	με
SAS	Sistema automático de aquisição de sinais	
SM	Sistema de medição	
ERE	Extensômetro de resistência elétrica	
MID	Medidor indutivo de deslocamento	
FT	Função de transferência	
PD	Prensa dinamométrica	

R E S U M O

O presente trabalho realiza uma análise do desempenho metrológico de uma prensa projetada e construída no LAB-METRO/UFSC, com vistas a sua utilização como padrão na calibração de células de carga.

Para realização desta análise a prensa, constituída de três colunas paralelas, é submetida a uma calibração primária que define a precisão do sistema de medição e determina os erros envolvidos.

Devido a limitação na capacidade de carga do padrão disponível, é testada, no trabalho, a possibilidade de uma ampliação na faixa de medição da prensa. Para tanto é realizada, além da calibração da prensa (colunas em paralelo) calibração das colunas em série. Deste modo se verifica se uma calibração das três colunas em série é válida como uma calibração da prensa que amplie sua faixa de operação.

Os resultados apresentados mostram que os erros de medição permanecem constantes entre as duas calibrações, enquanto que as sensibilidades se apresentam diferentes. Portanto a simples calibração das colunas da prensa colocadas em série não é suficiente para ampliação da faixa de medição da prensa.

A B S T R A C T

An analysis of the metrological performance of a press designed and built at UFSC's Metrology Laboratory is performed, in order to verify its adequacy when used as a standard for load cell calibration.

In order to perform this analysis, the press, which is constituted by three parallel columns, is subjected to a primary calibration defining the precision of the measuring system and allowing for the estimation of the errors involved.

Due to load limitation of the available load standard, a possibility is tested of extending the measuring range of the press. In order to achieve this, the calibration of the press (parallel arrangement of the columns) is supplemented by a calibration of the column in a series arrangement. It is thus possible to verify if the calibration of the columns in a series arrangement is valid as a press calibration, extending its operational range.

The results obtained show that the measuring errors remain constant for both calibrations, while the sensitivities are shown to be different. Therefore it is concluded that a simple calibration of the series arrangement of columns is not sufficient to increase the measuring range of the press.

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

1.1. CÉLULAS DE CARGA

A medição de forças é uma das mais importantes tarefas da metrologia, sendo utilizada nos ensaios mecânicos para fins de projeto, ou na determinação de pesos com objetivos comerciais.

As células de carga tratadas neste trabalho são dinamômetros, cujo princípio de funcionamento se baseia na transformação de força em deformação e desta em um sinal elétrico proporcional. Esta característica das células de carga tem sua importância aumentada devido à crescente automatização industrial, que se utiliza cada vez mais de equipamentos que possam ser associados a sistemas automáticos de aquisição de sinais (SAS).

Devido às exigências legais nas transações comerciais e à necessidade de elevar a precisão dos resultados que se destinam ao projeto, as células de carga devem apresentar erros mínimos de medição no valor da força aplicada. Para atender a este requisito as células de carga devem ser submetidas periodicamente a um processo de calibração.

Por calibração entende-se a determinação da correlação entre uma medida (Leitura) e o valor da grandeza a medir (convencionalmente correto) |1|

1.2. CALIBRAÇÃO DE CÉLULAS DE CARGA

A calibração de células de carga é realizada através de dois métodos a saber:

- Método Direto
- Método Indireto

Estes métodos que serão descritos a seguir, são ilustrados resumidamente na Figura 1 |2|.

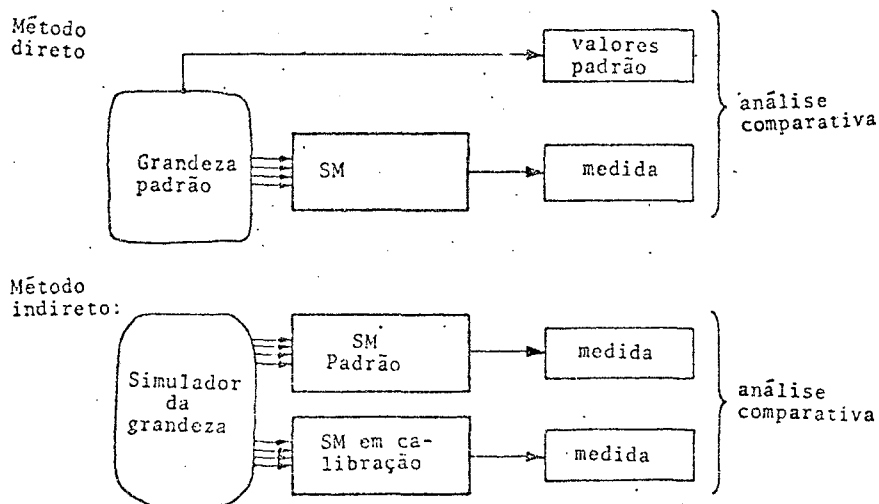


Figura 1 - Esquema dos métodos de calibração utilizados em metrologia.

1.2.1. Método Direto

No método direto de calibração, uma célula de carga a ser calibrada é submetida a pesos padrão, resultando em uma medida que é comparada com os valores dos pesos padrão.

As células de carga de pequena capacidade são normalmente calibradas através do método direto, face à simplicidade do método nestes casos. Esta sistemática consiste na colocação de pesos padrão diretamente sobre a célula de carga, anotando-se as leituras. Ao final do ensaio é realizada uma comparação entre os valores medidos e os valores dos padrões utilizados.

Nota-se que, à medida que aumenta a capacidade das células de carga a calibrar, o procedimento descrito acima torna-se extremamente difícil.

O método direto de calibração é ideal, uma vez que estabelece uma relação direta entre a força padrão e a medida; pode-se notar, porém, que se trata de um método dispendioso quando se necessita de altas forças de calibração. Este método é geralmente utilizado em calibrações de células de carga que serão tomadas como sistemas padrão (calibração primária).

Como avanço no método direto encontra-se na bibliografia a máquina de peso morto [3]. Na Figura 2 tem-se um esquema do funcionamento deste equipamento, onde se observa um atuador hidráulico entre uma estrutura fixa, onde se encontra a célula de carga a calibrar, e outra estrutura móvel, que suporta os pesos padrão. O objetivo destes atuadores é de permitir um carregamento lento durante a calibração e sustentar a estrutura dos

pêso caso a célula de carga se rompa.

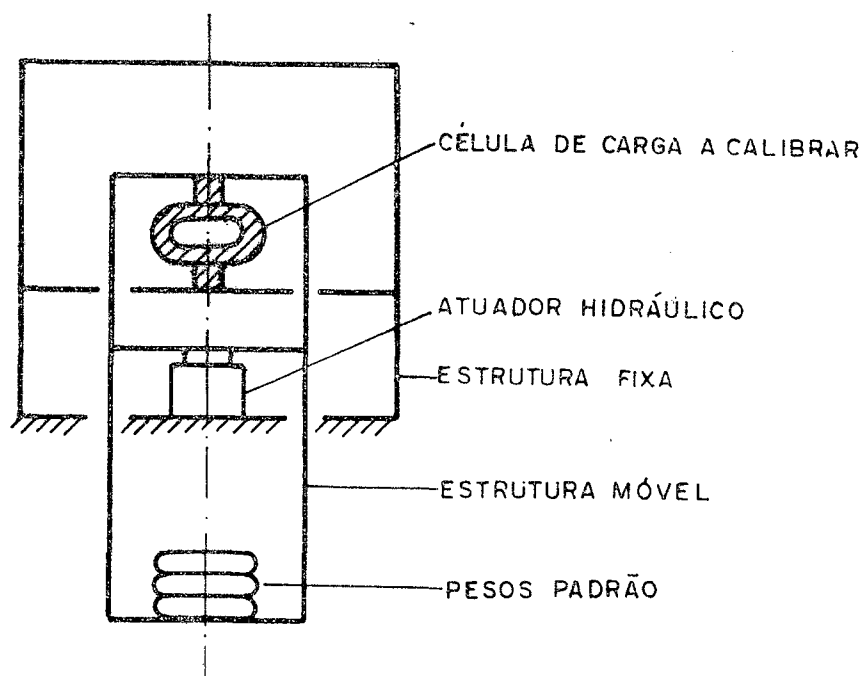


Figura 2 - Máquina de peso morto, para calibração direta de dinamômetros.

1.2.2. Método Indireto

No método indireto de calibração uma célula de carga a ser calibrada é comparada com outra célula, de comportamento conhecido e tomada como padrão. Ambos os sistemas de medição (SM) são carregados e suas medidas são comparadas entre si.

As calibrações realizadas através do método indireto seguem normalmente o exemplo mostrado na Figura 3. A célula de carga a ser calibrada, é colocada em série com um sistema de medição padrão (célula de carga ou dinamômetro de leitura ótica) no interior de uma prensa do tipo utilizada para ensaios mecâ

nicos de tração e compressão. Conforme o esquema da Figura 1, já mostrado, a prensa funciona como um simulador de grandeza. Quando a prensa é carregada, submete os dois sistemas de medição à compressão, comparando-se as medidas fornecidas por estes dois sistemas. As calibrações realizadas com base no método citado tem como desvantagens:

- Dificuldade de obtenção de padrões, uma vez que a condição necessária para se considerar uma célula de carga como padrão, é que esta tenha uma precisão de cinco a dez vezes superior à da célula de carga a calibrar.
- Aparecimento de erros de medição em função do desalinhamento entre os dois sistemas de medição.

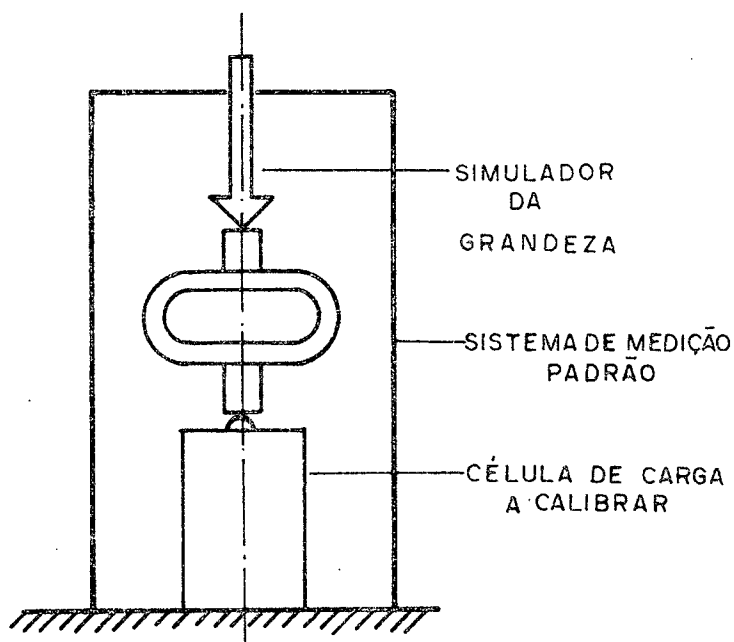


Figura 3 - Arranjo típico para calibração de células de carga através do método indireto.

Apesar destas desvantagens, este é o método de calibração mais largamente utilizado devido a sua simplicidade de execução.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

No presente trabalho é mostrada uma modificação na execução do método indireto de calibração, através da utilização da estrutura de uma prensa compacta como sistema de medição padrão para calibração de outras células de carga.

Ao final do processo de construção da prensa é necessário que esta seja submetida a um ensaio de calibração, de tal modo que seu comportamento seja conhecido. Este processo de calibração define o grau de precisão do sistema de medição projetado e determina os erros de medição envolvidos.

Este trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos:

- Realizar uma análise completa do desempenho metrológico da prensa;
- Concluir sobre a possibilidade de utilizar a prensa como sistema padrão de calibração;
- Testar, devido à limitação na capacidade do padrão, a possibilidade de ampliação na faixa de medição da prensa, a partir do padrão de menor capacidade.

C A P Í T U L O I I

A PRENSA DINAMOMÉTRICA

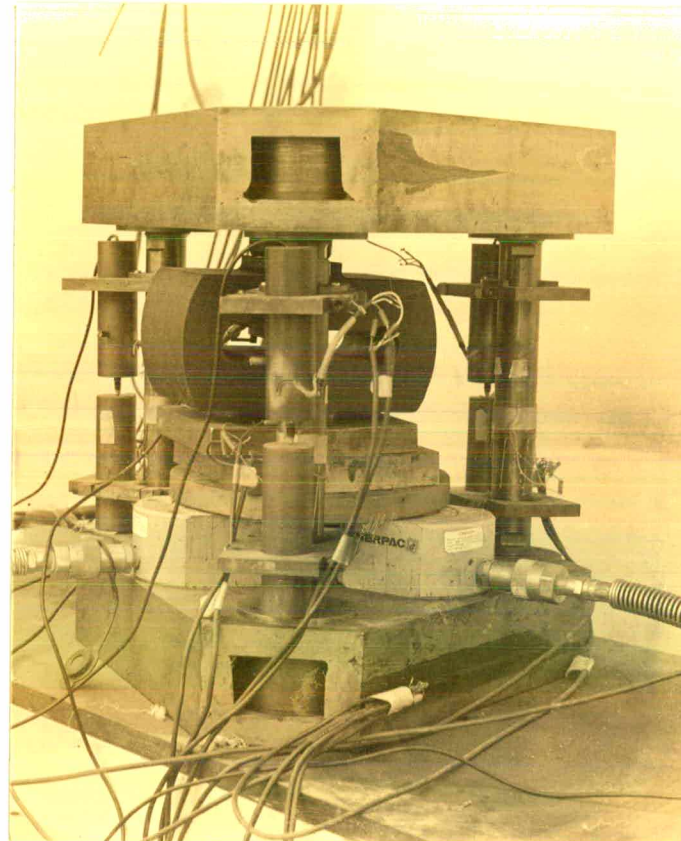
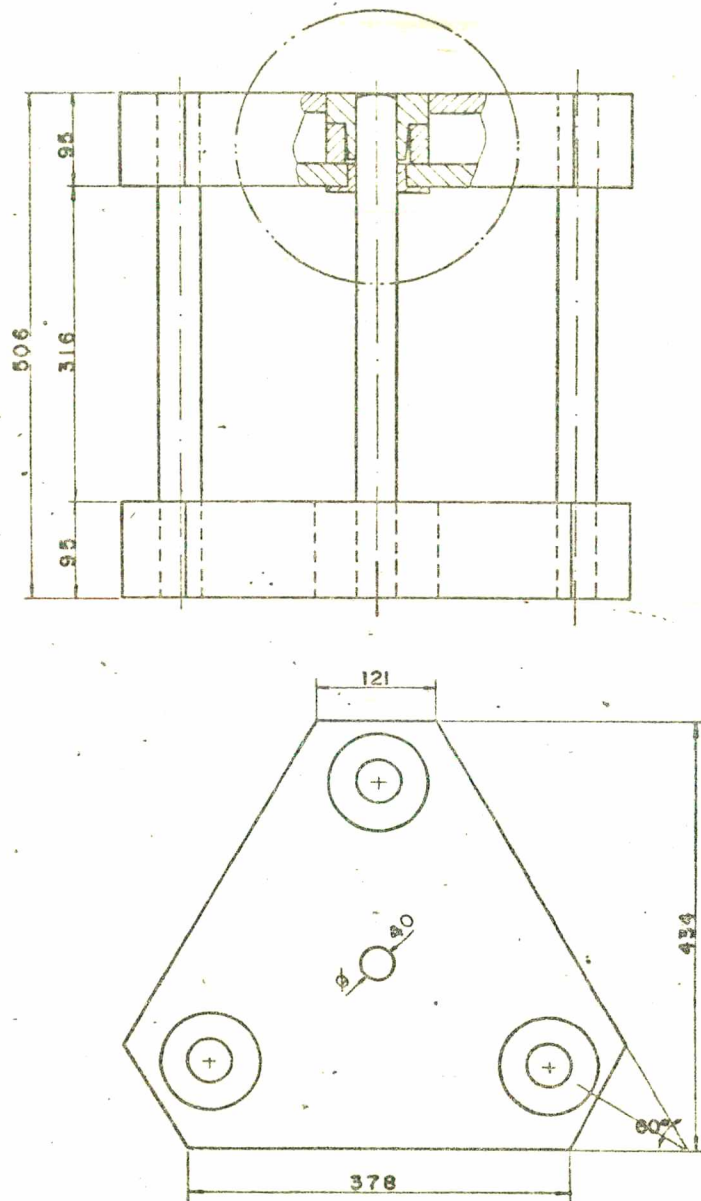
2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é descrito detalhadamente o sistema de medição a ser analisado. O sistema mostrado é definido como prensa dinamométrica devido a sua característica principal, de utilizar a estrutura de uma prensa como sensor de medição de força (dinamômetro).

A prensa dinamométrica foi projetada e construída pelo LABMETRO com o objetivo de auxiliar na pesquisa de novas células de carga. Para tanto suas dimensões reduzidas permitem a calibração de dinamômetros sob condições ambientais variáveis, como, por exemplo, no interior de uma estufa.

2.2. DESCRIÇÃO DA PRENSA

A Figura 4 mostra um esquema da prensa montada de forma a executar calibrações de células de carga à compressão. Observa-se na figura, que a prensa é constituída por duas



material das colunãs : ABNT 4340

Figura 4 - Esquema geral e vista da prensa dinamométrica.

placas supostamente rígidas, ligadas entre si por meio de três colunas de seção transversal circular cheia.

A fixação entre as placas e as colunas foi projetada com o objetivo de não transmitir momentos fletores das placas para as colunas. Na prática verificou-se que este objetivo foi parcialmente alcançado, estando a fixação construída como será visto no esquema da Figura 5.

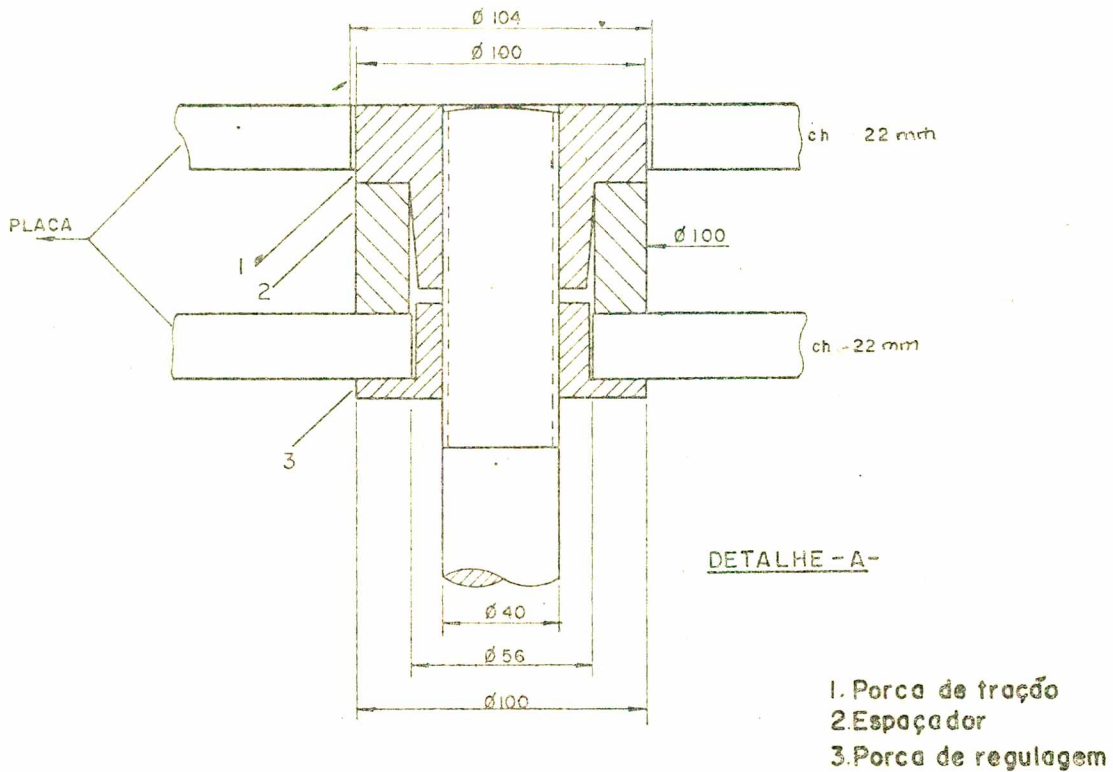


Figura 5 - Detalhe da fixação entre as colunas e placas.

Cada uma das colunas é introduzida na placa, tendo na extremidade a porca de regulação (3). Pela parte superior do orifício da placa é introduzido o espaçador (2) e sobre este é colocada a porca de tração (1). Através desta porca a força é transmitida das placas para as colunas, enquanto que as por-

cas de regulagem sustentam as placas quando o sistema está sem carga e regulam a distância entre as placas.

2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Nas calibrações de células de carga utilizando-se a prensa como padrão de medição, a célula de carga a calibrar é colocada entre as placas da prensa e sob este elemento são colocados um ou mais atuadores hidráulicos, de acordo com a faixa de medição da célula que se deseja calibrar, com o objetivo de suprir a força necessária ao ensaio. A Figura 6 mostra um esquema da prensa para realizar um ensaio de calibração à compressão em uma célula de carga.

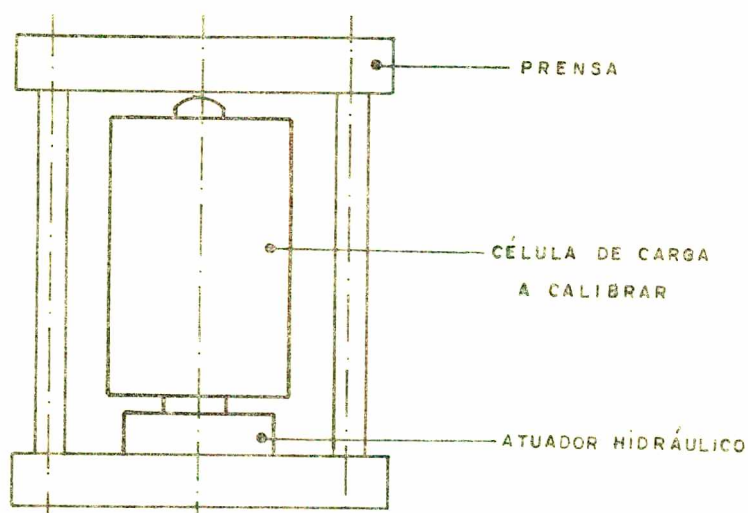


Figura 6 - Esquema da prensa, montada de modo a executar um ensaio de calibração.

Nota-se, através do esquema mostrado acima , que, quando o atuador hidráulico é acionado, a célula de carga a calibrar é comprimida entre as duas placas, enquanto que as colunas da prensa sofrem uma tração.

O valor da força padrão é determinado através da deformação que ocorre nas colunas, utilizando-se a equação

$$F = E \epsilon A \quad (1)$$

onde:

F = força aplicada

E = módulo de elasticidade do material das colunas

A = área da seção transversal das colunas

ϵ = deformação específica nas colunas.

Praticamente, conhecendo-se o fator de conversão da prensa, obtém-se diretamente o valor da força aplicada, a partir da deformação medida. Este fator de conversão é obtido durante a análise do desempenho metrológico da prensa, a ser descrito no próximo capítulo.

A medição da deformação que ocorre nas colunas é realizada por intermédio de dois tipos distintos de transdutores:

- Extensômetros de Resistência Elétrica (ERE)
- Medidores Indutivos de Deslocamento (MID)

2.4. LOCALIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES

2.4.1. Extensômetros de Resistência Elétrica (ERE)

No total estão instalados na prensa 6 EREs dispostos de acordo com o esquema mostrado na Figura 7. Cada coluna possui 2 EREs diametralmente opostos, orientados no sentido do centro da prensa.

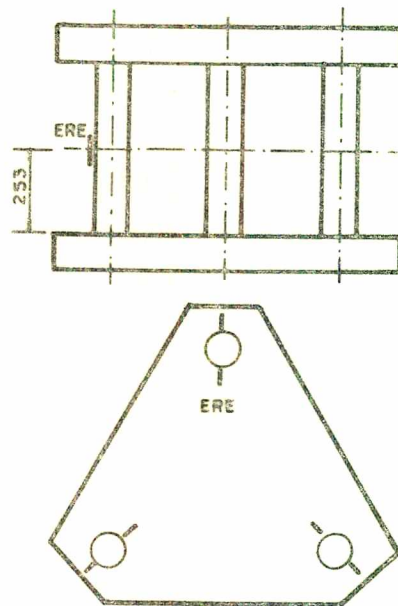


Figura 7 - Posicionamento dos EREs utilizados na prensa.

2.4.2. Medidores Indutivos de Deslocamento (MID)

O projeto da prensa prevê a colocação de um MID em cada uma das colunas, instalados paralelamente ao comprimento a medir, a meia distância entre as placas. Os MIDs estão fixados às colunas por meio de um sistema conforme está mostrado nas Figuras 4 e 8.

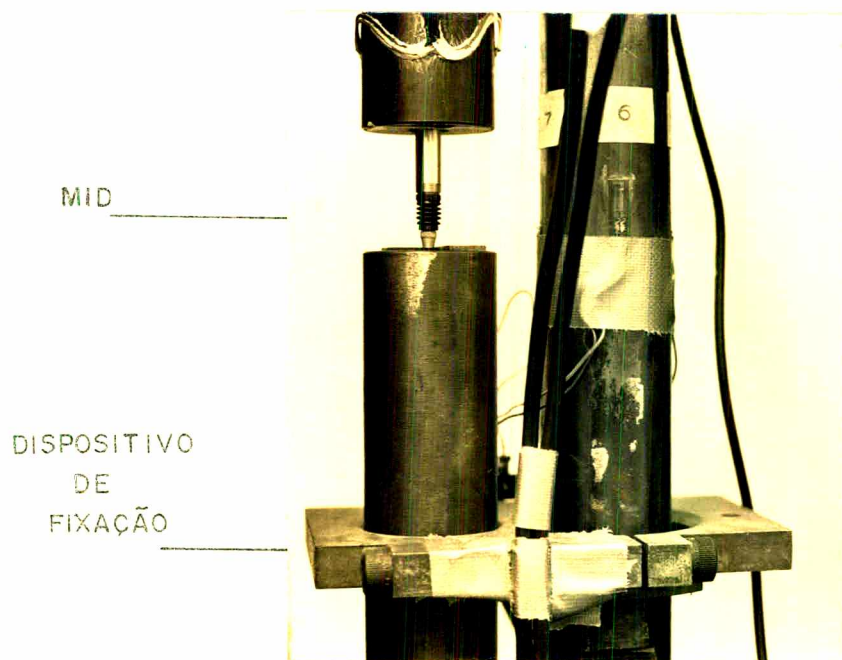


Figura 8 - Detalhe da fixação do MID à coluna da prensa.

2.5. INFLUÊNCIAS SOBRE A CALIBRAÇÃO DE CÉLULAS DE CARGA

2.5.1. Sensibilidade a Forças Laterais

As forças laterais surgem devido a carregamentos inclinados, conforme esquematizado na Figura 9 a) [4,5].

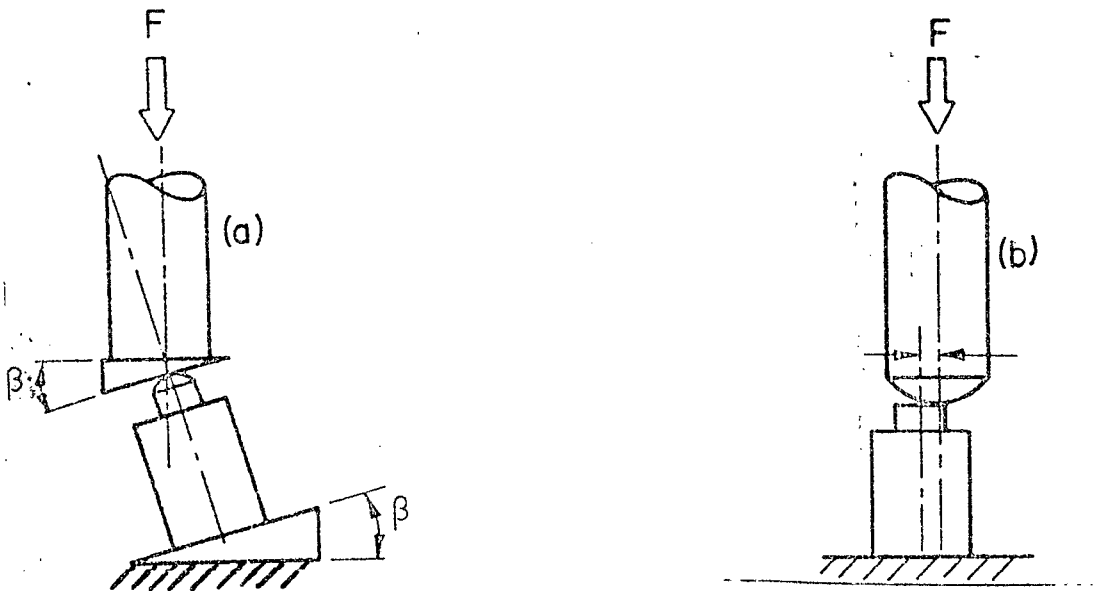


Figura 9 - Exemplo de tipos de carregamentos que podem influenciar os resultados obtidos sobre as calibrações de dinamômetro.

Observa-se na figura que, para uma força F aplicada sobre o conjunto de calibração (célula de carga e padrão) surgem, devido à inclinação do conjunto, duas forças distintas ; uma força normal ($F \cos \beta$) e outra paralela ($F \sin \beta$) à célula de carga. Esta última, definida como força lateral, é responsável pelo aparecimento de flexões sobre o elemento em teste.

As forças laterais possuem maior influência nas calibrações através do método indireto convencional, quando a célula de carga a calibrar está em série com o padrão. No caso da prensa analisada neste trabalho, esta influência é minimizada devido à colocação da célula de carga em paralelo com o padrão.

Conforme já descrito, a fixação entre as pla-

cas e as colunas é projetada de modo a não transmitir momentos ; deste modo deveriam ser eliminadas quaisquer influências de forças laterais agindo nas colunas. Como na prática esta condição não é alcançada, os momentos fletores introduzidos nas colunas são eliminados através da utilização de dois EREs simetricamente opostos em cada uma das colunas. Realizando-se a média entre as leituras destes EREs, elimina-se a parcela de deformação de flexão presente às medições [5].

2.5.2. Influência de Carregamentos Excêntricos

Considerando que as três colunas estão afastadas entre si (340 mm) e supondo que a fixação entre as placas e colunas se comporta aproximadamente como uma fixação ideal (não transmite momentos), espera-se que carregamentos excêntricos como aquele mostrado na Figura 9 b, tenham pequena influência sobre os resultados obtidos.

2.6. AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE MEDIÇÃO DA PRENSA

A prensa dinamométrica, como sistema de medição padrão, deve sofrer um processo de calibração primária, de modo que suas principais características sejam determinadas.

De acordo com a maneira como a prensa está construída, existem duas possibilidades de executar a calibração:

- Calibração das colunas separadamente
- Calibração da prensa

A força total que atua na prensa é determinada a partir da deformação específica que ocorre em cada uma das três colunas. Partindo-se deste princípio, observa-se que, utilizando um mesmo padrão para ambas as possibilidades de calibração, chega-se, através da primeira possibilidade, a uma faixa de medição três vezes maior do que a própria faixa do padrão.

Este método de ampliação da faixa de medição tem como vantagem principal a possibilidade de utilização de padrões de calibração de menor capacidade, porém exige uma análise cuidadosa dos erros.

Neste trabalho são testadas as duas possibilidades de calibração da prensa dinamométrica, sendo os resultados comparados de modo a comprovar a validade do método proposto de ampliação da faixa de medição.

C A P Í T U L O I I I

ENSAIOS REALIZADOS

Com objetivo de realizar a análise do desempenho metrológico da prensa, esta é calibrada em relação a uma célula padrão. Deste ensaio de calibração é obtida a relação entre a força aplicada e a deformação específica que ocorre nas colunas, bem como são determinadas as influências e erros a que está sujeita a prensa dinamométrica.

Para testar a possibilidade de ampliação da faixa de medição, é feita uma calibração individual de cada uma das colunas e outra sobre a prensa, de maneira que os resultados obtidos em ambas as calibrações possam ser comparados. Através desta comparação é possível avaliar se a calibração das colunas é válida como uma calibração que amplie a faixa de medição da prensa.

Para as duas calibrações realizadas é feita, ainda, uma comparação entre um sistema de medição de deformação através de EREs e outro com MIDs.

3.1. INFLUÊNCIAS SOBRE A CALIBRAÇÃO

3.1.1. Erros no Sistema de Medição

Um sistema de medição (SM) tem seu comportamento caracterizado por sua função de transferência. A prensa, como sistema de medição, transforma a grandeza a medir (força) em uma medida (deformação) através da função transferência. A Figura 10 mostra uma função transferência real, obtida através do processo de calibração. Sobre esta função é apresentada a função de transferência nominal, normalmente uma reta. Os desvios da função real em relação à nominal são os erros do sistema de medição.

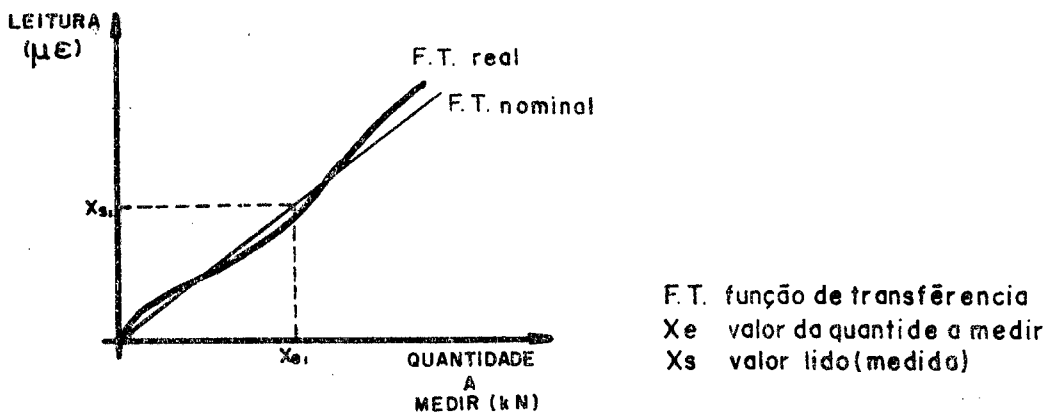


Figura 10 - Exemplo de função de transferência real e nominal.

Os erros de um sistema de medição são definidos através de duas parcelas [5,6]:

- Erro sistemático
- Erro aleatório.

A primeira parcela é previsível, enquanto que a segunda surge em função de valores aleatórios, não sendo, por isso, possível sua previsão.

3.1.2. Características Estáticas do Sistema de Medição

As características estáticas de um sistema de medição são parâmetros que permitem um termo de comparação entre aparelhos de medição. Estas características estão baseadas em grandezas que não variam, ou variam pouco na unidade de tempo (grandezas estáticas). Para o caso do presente trabalho pode-se tomar o sistema como estático em função do tempo esperado para estabilização, antes de cada medição ser efetuada.

As principais características estáticas utilizadas no presente trabalho, estão definidas a seguir:

a) Sensibilidade - A melhor reta que descreve o comportamento do SM é calculada a partir da função transferência pelo método dos mínimos quadrados. A inclinação desta reta ajustada define a sensibilidade do SM. Analiticamente, a sensibilidade é representada pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada. A unidade da sensibilidade, obtida nos ensaios realizados, é dada por

$$S = \mu\epsilon/kN \quad (2)$$

b) Desvio de Linearidade ou Não Linearidade de um Sistema - É o máximo desvio entre a função de transferência real e uma reta

ajustada aos valores lidos.

- c) Histerese - A máxima distância entre as funções de transferência obtidas no carregamento e no descarregamento define a Histerese do sistema.
- d) Repetibilidade - Repetindo-se várias vezes um ensaio de calibração sob as mesmas condições, nota-se que o sistema de medição não reproduz sempre os mesmos valores de saída. Esta característica é definida como repetibilidade ou não-repetibilidade do sistema.

Pode-se observar que as características estáticas (b) e (c) são erros sistemáticos inerentes ao sistema de medição, uma vez que se repetem quando as mesmas condições de ensaio são mantidas, enquanto "d" constitui um erro aleatório.

3.1.3. Curvas de Erros

Normalmente o desvio de linearidade, histerese e repetibilidade são pequenos em relação à faixa de medição do sistema testado, portanto as representações gráficas do tipo mostrado na Figura 10 não são muito informativas sobre os erros de medição.

Uma curva de erros apresenta os erros de medição em função de seu valor indicado. A obtenção destas curvas é mostrada na Figura 11. No ítem (a) dessa figura é mostrada a reta de regressão ajustada aos valores medidos através do método dos mínimos quadrados; este conjunto é levado a passar pela origem

(Fig. 11 b) onde, então, um novo eixo é traçado perpendicularmente à reta de regressão (Fig. 11 c). O par de eixos é girado em relação à origem resultando a curva de erros, conforme mostra a Figura 11 d.

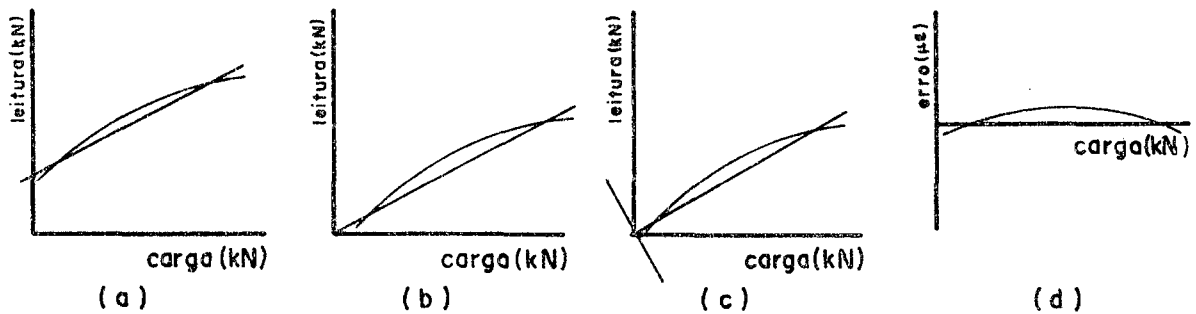


Fig. 11 - Obtenção da curva de erros.

3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.2.1. Emprego de um Sistema de Aquisição de Sinais (SAS)

Todas as medições realizadas, avaliações e apresentação dos resultados são executadas com o auxílio de um SAS. A metodologia de utilização deste sistema se encontra descrita com detalhes em [2]. Algumas particularidades da utilização do SAS neste trabalho são descritas a seguir:

- Os EREs estão ligados a uma chave seletora através de uma ligação de Thompson, com o objetivo de reduzir as influências do chaveamento sobre as leituras. Em função da chave seletora, a

deformação sobre cada um dos EREs é determinada individualmente.

- Os MIDs são também ligados à chave seletora, de modo que suas leituras possam ser executadas individualmente.
- O computador do SAS controla a sequência das medições, permite a avaliação dos resultados e realiza a apresentação dos resultados em forma de gráficos e tabelas, através da plotadora e impressora respectivamente. Um pacote de programas para calibração de transdutores foi desenvolvido [7] para permitir a realização destes ensaios.

A Figura 12 mostra um esquema do SAS na cadeia de medição.

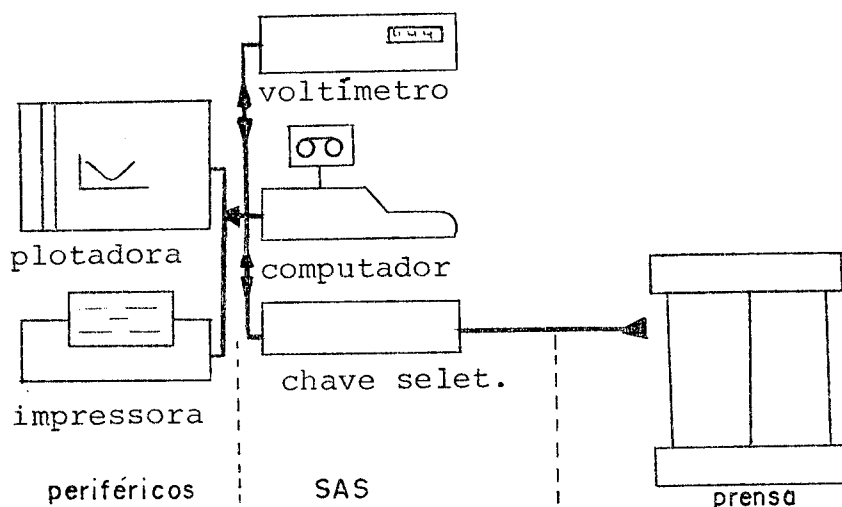


Figura 12 - Localização do SAS na calibração da prensa dinamométrica.

3.2.2. Características dos Equipamentos Utilizados

a) EREs - São utilizados dois EREs ativos por coluna, com as se-

guintes especificações:

Marca: Hottinger Baldwin Messtechnik

Tipo: 6/120 LY 61

Nº de Controle: V-26259/1

Resistência: $120 \Omega \pm 0,2\%$

- b) Ponte Amplificadora - Com objetivo de fazer as leituras da variação de resistência dos EREs é utilizada uma ponte amplificadora com as seguintes especificações:

Fabricante: Hottinger Baldwin Messtechnik

Modelo: MG 3150 S.33

Frequência Portadora: $225 \text{ Hz} \pm 5\%$

Saída: $-10 \text{ V a } + 10 \text{ V}$

Faixa de Operação: $\pm 2 \text{ mV/V} \pm 0,05\%$

- c) MIDs - Para medição da variação de comprimento existe um MID em cada uma das colunas em teste, com as seguintes especificações:

Fabricante: Tesa S.A.

Modelo: GT 21

Faixa de Medição: $\pm 1,2 \text{ mm}$

Comprimento: 92 mm

Diâmetro: 08 mm

- d) Amplificador - O amplificador utilizado tem a finalidade de realizar o tratamento de sinal proveniente dos MIDs e possui as seguintes especificações:

Fabricante: Tesa S.A.

Modelo: Tesamodul 352 403

Capacidade de Medição: 10 canais

Nº de Faixas: 03

Faixa de Operação: $\pm 2000 \mu\text{m}$; $\pm 200 \mu\text{m}$; $\pm 20 \mu\text{m}$

Faixa Utilizada: $\pm 200 \mu\text{m}$

Max. Erro de Amp.: $\pm 2\%$ entre 273 e 313 K

Saída: $\pm 1 \text{ V}$

- e) Padrão de calibração - Como são duas as calibrações realizadas (sobre a prensa e sobre as colunas), são utilizadas duas células de carga de calibração distintas, devido às limitações dimensionais. A primeira, utilizada na calibração das colunas possui as seguintes características:

Tipo: Célula de carga com EREs

Fabricante: Hottinger Baldwin Messtechnik

Procedência: Alemanha

Modelo: C 2 H3

Nº Fabricante: 47194

Carga Normal: 1000 kN

Sensibilidade: 2 mv/v

Histerese: 0,025% VFE

Repetibilidade: $\pm 0,01\%$ VFE

Erros Combinados: $\pm 0,015\%$ VFE

O anel dinamométrico utilizado na calibração da prensa, apesar da mesma capacidade que a célula de carga, possui menor altura e adapta-se ao espaço disponível na prensa.

Para que os dois ensaios possam ser comparados, os dois dinamômetros são comparados entre si. As principais especificações do segundo padrão são:

Tipo: Anel Dinamométrico

Fabricante: VEB KRAFT MESSGERATT HALLE

Modelo: DKM

Capacidade: 1000 kN

Inf. da Temperatura: $\pm 0,027\%$ K (No módulo de Young)

Incerteza de medição: $\pm 0,5\%$ VFE

f) Sistema Hidráulico - Com o objetivo de fornecer a força necessária aos ensaios foram utilizados três atuadores hidráulicos ligados a uma bomba manual. (Ref. Figura 4)

3.3. PLANO DE ENSAIOS

Para que os objetivos do trabalho possam ser atingidos, são mostrados nesta seção os procedimentos utilizados nos ensaios.

3.3.1. Calibração dos Transdutores da Prensa

a) EREs

Considerando que as medições da deformação através de EREs necessitam a utilização de uma ponte amplificadora, é necessário determinar a relação entre a variação relativa de resistência dos EREs e a deformação específica mostrada no amplificador:

$$\epsilon = f\left(\frac{\Delta R}{R}\right) \quad (3)$$

Esta relação pode ser obtida pela aplicação

de resistores de precisão paralelamente aos EREs. Esta técnica simula uma variação de resistência sofrida pelos EREs e se encontra descrita em detalhes em |8|.

b) Calibração dos MIDs

Com o objetivo de determinar a relação entre a mudança de comprimento dos MIDs e o valor de saída mostrado no amplificador, os MIDs são submetidos a variações conhecidas, através de blocos padrão.

Nota-se que a medição feita com MIDs determina de forma direta o alongamento das colunas, sendo necessário calcular indiretamente a deformação específica através da relação

$$\epsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \quad (4)$$

sendo

$\Delta \ell$ = Alongamento (medido pelo MID)

ℓ_0 = Comprimento inicial (195 mm)

ϵ = Deformação Específica.

3.3.2. Calibração das Colunas da Prensa

Este ensaio tem como objetivo determinar a relação entre a força aplicada sobre as colunas e a deformação específica correspondente,

$$\epsilon = f(F) \quad (5)$$

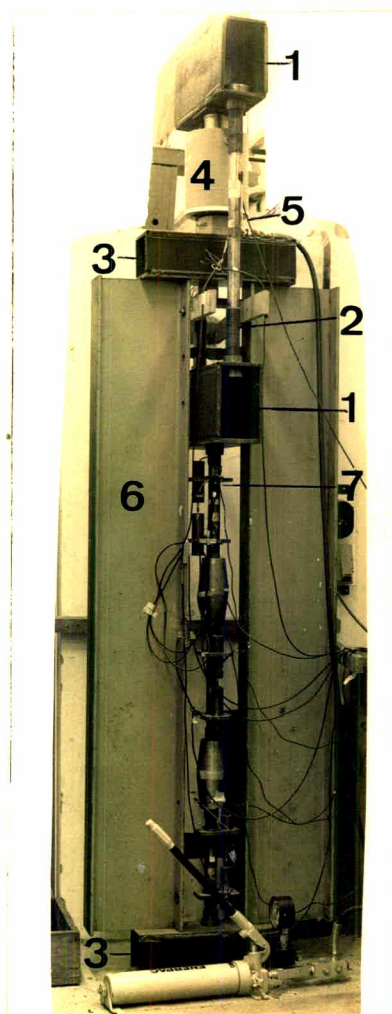
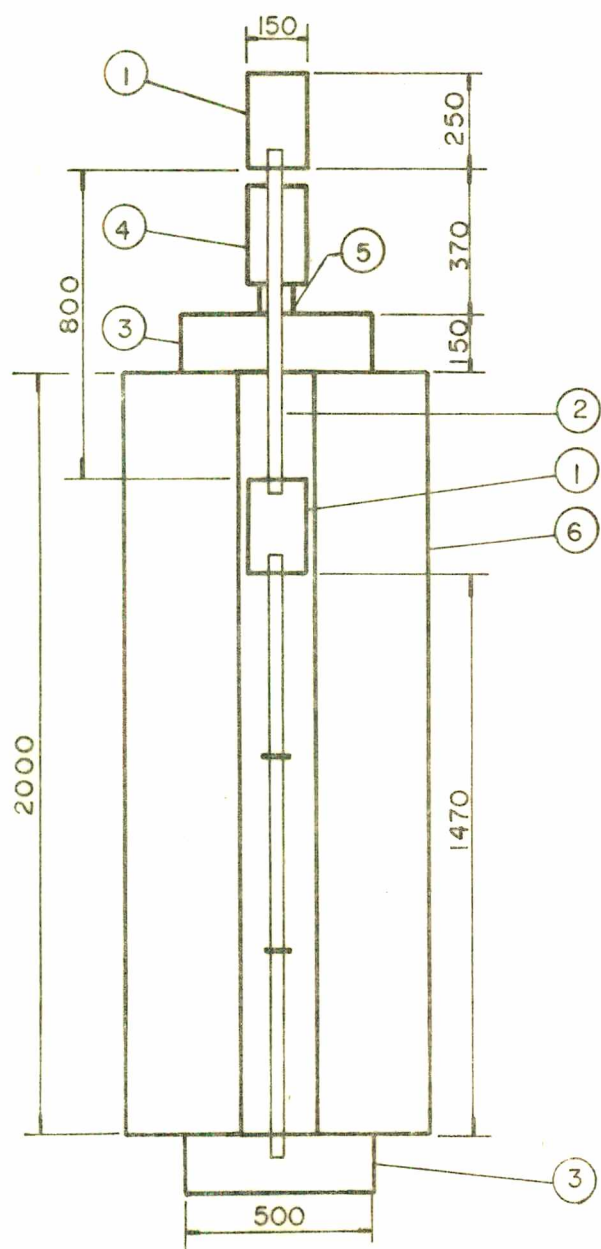
É a partir dos resultados obtidos neste ensaio que se determina a sensibilidade de cada uma das colunas, bem como os erros de medição que serão comparados com os resultados obtidos sobre a prensa.

Para que as três colunas possam ser calibradas simultaneamente sob uma mesma força, um dispositivo de calibração foi desenvolvido, conforme mostra a Figura 13.

A estrutura do dispositivo pode ser dividida em duas partes, para facilitar seu entendimento. A primeira parte, chamada conjunto de tração, é composta de duas caixas (1)* ligadas entre si através de duas colunas de seção circular (2). A segunda parte, dita conjunto de apoio, é formada por duas vigas "I" (6) e duas caixas de seção quadrada (3). As três colunas sob teste estão colocadas em série entre caixas 3 inferior e 1 inferior. A célula de carga padrão (4) e o atuador hidráulico (5) são instalados entre a caixa 3 superior e 1 superior. Nota-se que da maneira como é feita a montagem, o atuador (5), quando acionado, traciona as três colunas simultaneamente.

Durante estes ensaios a deformação nas colunas é lida através dos EREs e MIDs e comparada com a força lida pelo sistema padrão. O esquema da Figura 14 mostra a localização dos transdutores no dispositivo de testes.

* A numeração indicada relaciona-se com os elementos mostrados na Figura 13.



- 1.caixa retangular 250x150
- 2.colunas de ligação
- 3.caixa quadrada 150x150
- 4.padrão
- 5.atuador hidráulico
- 6.estrutura de apoio
- 7.colunas em teste

Figura 13 - Vista geral do dispositivo para calibração das colunas em série.

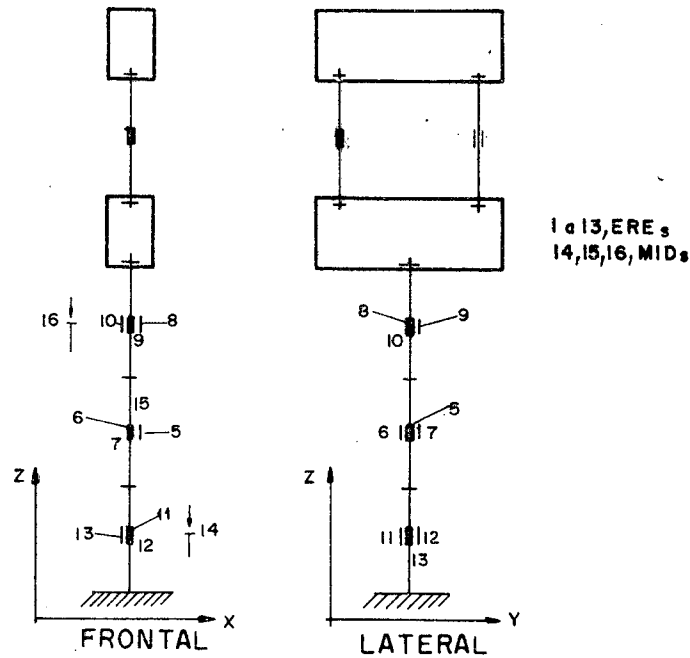


Figura 14 - Localização dos transdutores no dispositivo de calibração das colunas.

Para um ensaio completo são definidas as seguintes características:

- Faixa de medição no ensaio: 0-275 kN
- Ciclos de medição: 5 (realizados com a mesma montagem do dispositivo)
- Leituras por ciclo: 15 (carregamento) e 15 (descarregamento)
- Valores da grandeza a medir: Quadro I

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0.00	19.40	34.80	50.70	67.50	86.10	105.80	126.50	148.00	169.70	191.10	211.90	232.70	253.60	273.50	(kN)

Quadro I - Valores da grandeza a medir na calibração das colunas (pontos de medição) em relação ao padrão.

3.3.3. Calibração da Prensa Dinamométrica

A partir do ensaio da prensa dinamométrica é determinada a relação entre a força aplicada e a deformação específica nas colunas, quando montadas na prensa. Para que se possa testar a possibilidade de aplicação da faixa de medição da prensa, a força aplicada neste ensaio é tomada aproximadamente três vezes maior do que no ensaio anterior. Desta maneira, em ambos os casos, tem-se, para cada coluna, a mesma carga aplicada.

O presente ensaio tem as seguintes características:

- Faixa de medição do ensaio: 0-800 kN
- Ciclos de medição: 5
- Leituras por ciclo: 15 (carregamento) e 15 (descarregamento),
- Valores da grandeza a medir: Ver Quadro II

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0.00	59.00	118.00	170.00	223.00	274.00	325.00	377.00	431.00	482.00	535.00	588.00	640.00	706.00	800.00	(kN)

Quadro II - Valores da grandeza a medir na calibração da prensa dinamométrica.

A localização dos transdutores é mostrada na Figura 15, a seguir.

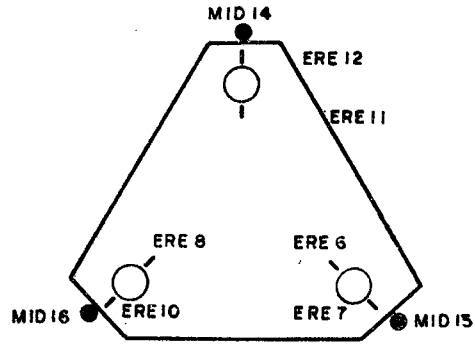


Figura 15 - Localização dos transdutores na prensa dinamométrica.

C A P Í T U L O I V

RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo é apresentado um resumo dos resultados obtidos, de forma a possibilitar conclusões sobre os objetivos propostos. Os resultados são analisados à medida em que são apresentados, facilitando desta maneira sua compreensão.

Os resultados apresentados estão divididos em dois grupos básicos:

- Resultados da calibração das colunas
- Resultados da calibração da prensa

e resultam de uma comparação entre as medições de deformação específica obtidas através de EREs e MIDs.

4.1. CALIBRAÇÃO DAS COLUNAS

A calibração das três colunas da prensa é realizada simultaneamente através do dispositivo de testes descrito no Capítulo III, que permite a colocação das três colunas e do padrão de calibração em série.

O primeiro resultado analisado refere-se à sensibilidade de cada uma das colunas, isto é, ao fator que relaciona a força aplicada (kN) e a deformação específica ($\mu\epsilon$).

A Figura 16 mostra, em diagrama de barras, a comparação entre as sensibilidades dos principais transdutores envolvidos. As barras 1 e 2 do diagrama representam os resultados dos EREs opostos da coluna 2 enquanto que as barras 3 e 4, 5 e 6 representam, respectivamente, os EREs opostos das colunas 1 e 3. As barras indicadas por C1, C2 e C3 indicam a sensibilidade média de cada uma das colunas; as três últimas barras mostram a sensibilidade dos MIDs. Uma linha (tracejada) de referência indica a sensibilidade média das três colunas.

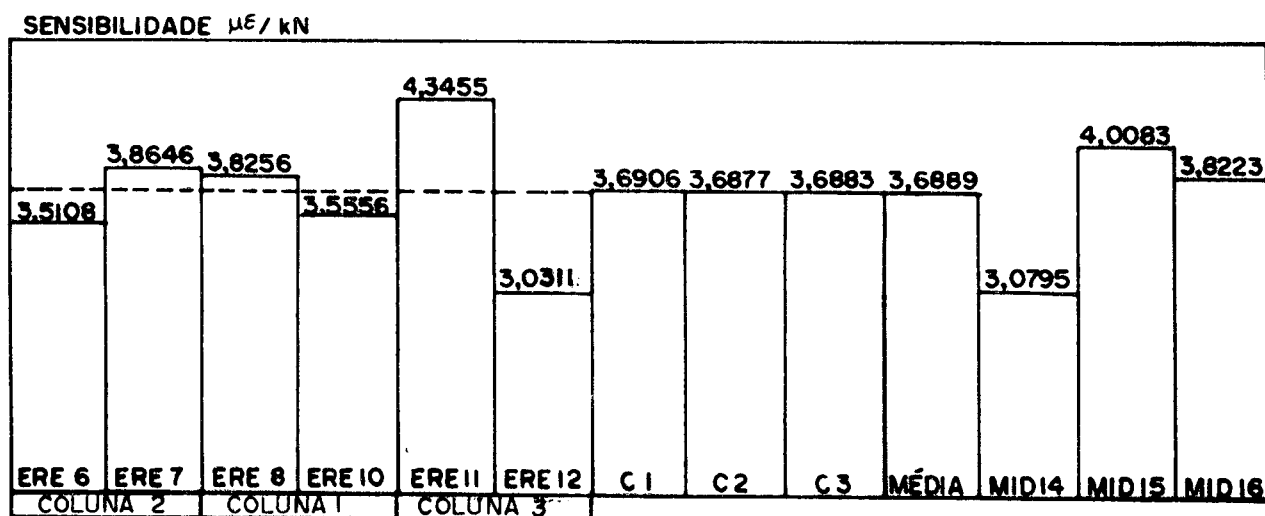


Figura 16 - Comparação da Sensibilidade entre os vários transdutores em teste.

4.1.1. Erros Sistemáticos

São analisados neste item os erros inerentes ao sistema de medição e que se repetem sempre que as mesmas condições de ensaio sejam observadas, tais como o desvio de linearidade e a histerese.

Através da Figura 16, mostrada acima, observa-se a existência de diferenças, às vezes acentuadas, entre as sensibilidades de cada par de ERES de uma mesma coluna. Comparando esta diferença com as pequenas diferenças entre as médias das colunas é possível concluir que existem momentos fletores superpostos à força axial de calibração. A causa principal destes momentos fletores parece ser uma excentricidade que ocorre entre cada coluna e o conjunto de tração e entre as colunas, conforme mostra a Figura 17.

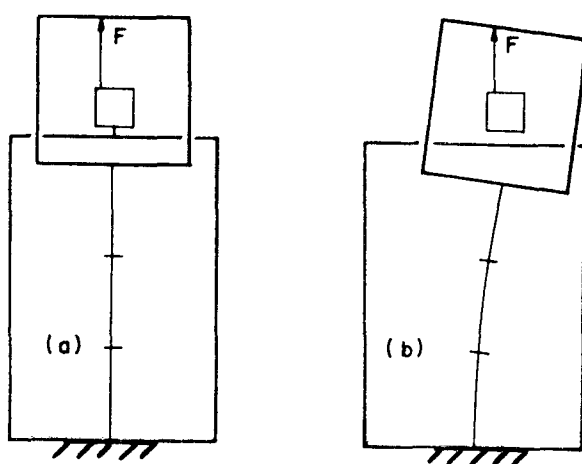


Figura 17 - Flexão das colunas devido à excentricidade da carga. a) antes do carregamento. b) após o carregamento.

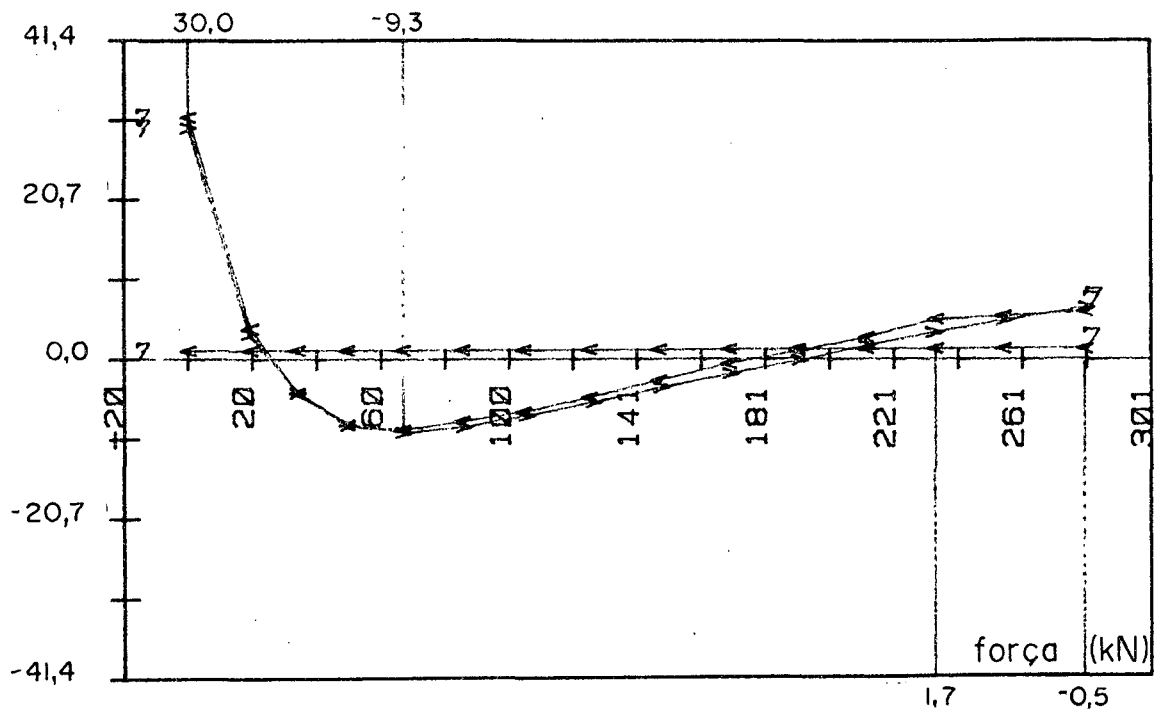
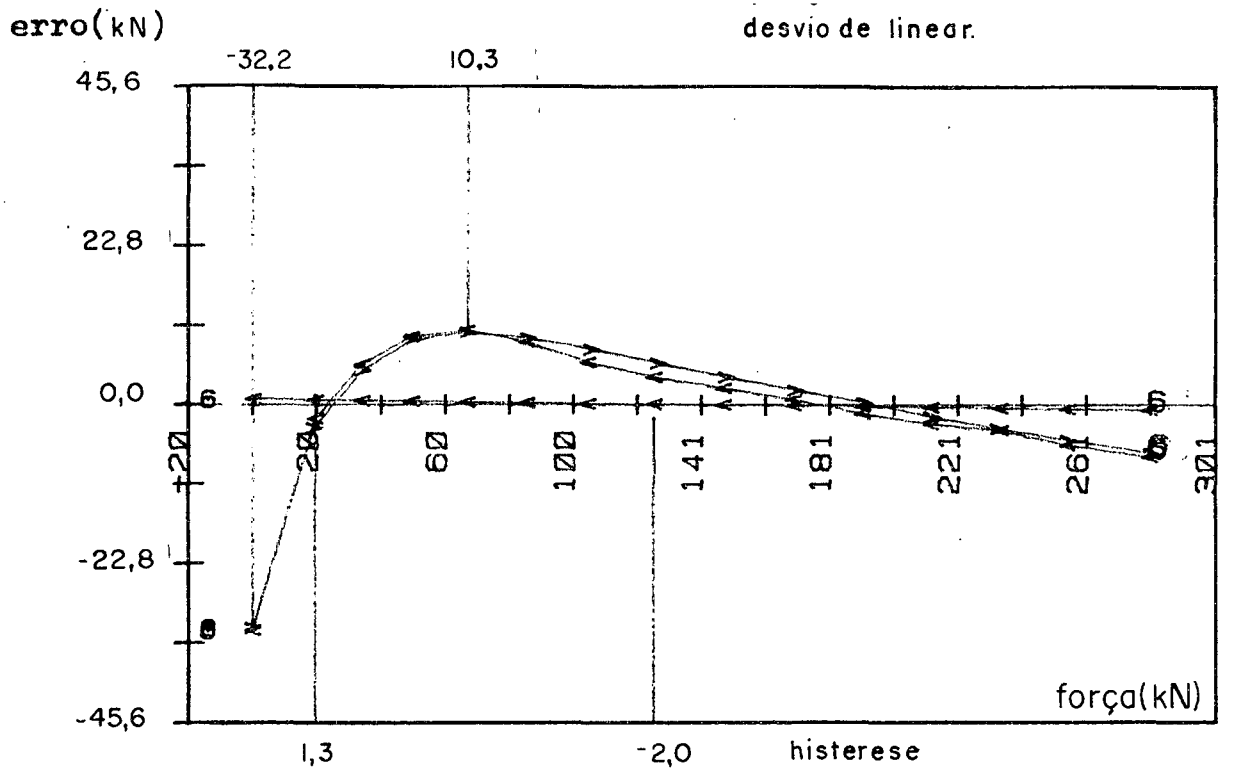


Figura 18 - Comparação entre curvas de erros dos EREs opostos 6 e 7 na coluna 2.

As características desta flexão são mostradas por intermédio da Figura 18, onde se tem as curvas de erros para dois EREs opostos (ERE 6 e 7, coluna 2), obtidas a partir de 5 ciclos de medição.

Todas as informações necessárias ao entendimento desta e das outras curvas de erros estão no Apêndice I deste trabalho.

As curvaturas acentuadas no trecho inicial da curva de erros evidenciam uma flexão inicial elevada na coluna , com tendência a decrescer à medida que o ensaio se desenvolve. Este comportamento indica que as colunas tendem a fletir até se alinharem em relação à direção da força de calibração, quando, então, a flexão decresce.

A pequena diferença entre as curvas de carregamento e descarregamento permite concluir que as deformações específicas medidas se situam dentro do regime elástico.

A Figura 19, a seguir, representa a curva de erros média entre os resultados obtidos para os EREs 6 e 7 mostrados anteriormente. O ponto a destacar nesta figura é a eliminação quase total dos desvios de linearidade causados pela flexão das colunas, comprovando que o método utilizado para eliminar o efeito da flexão sobre as medições é válido. Resumindo os erros sistemáticos para a coluna 2 são:

- Máximo desvio de linearidade: 0,4 kN
- Máxima histerese: 1,0 kN.

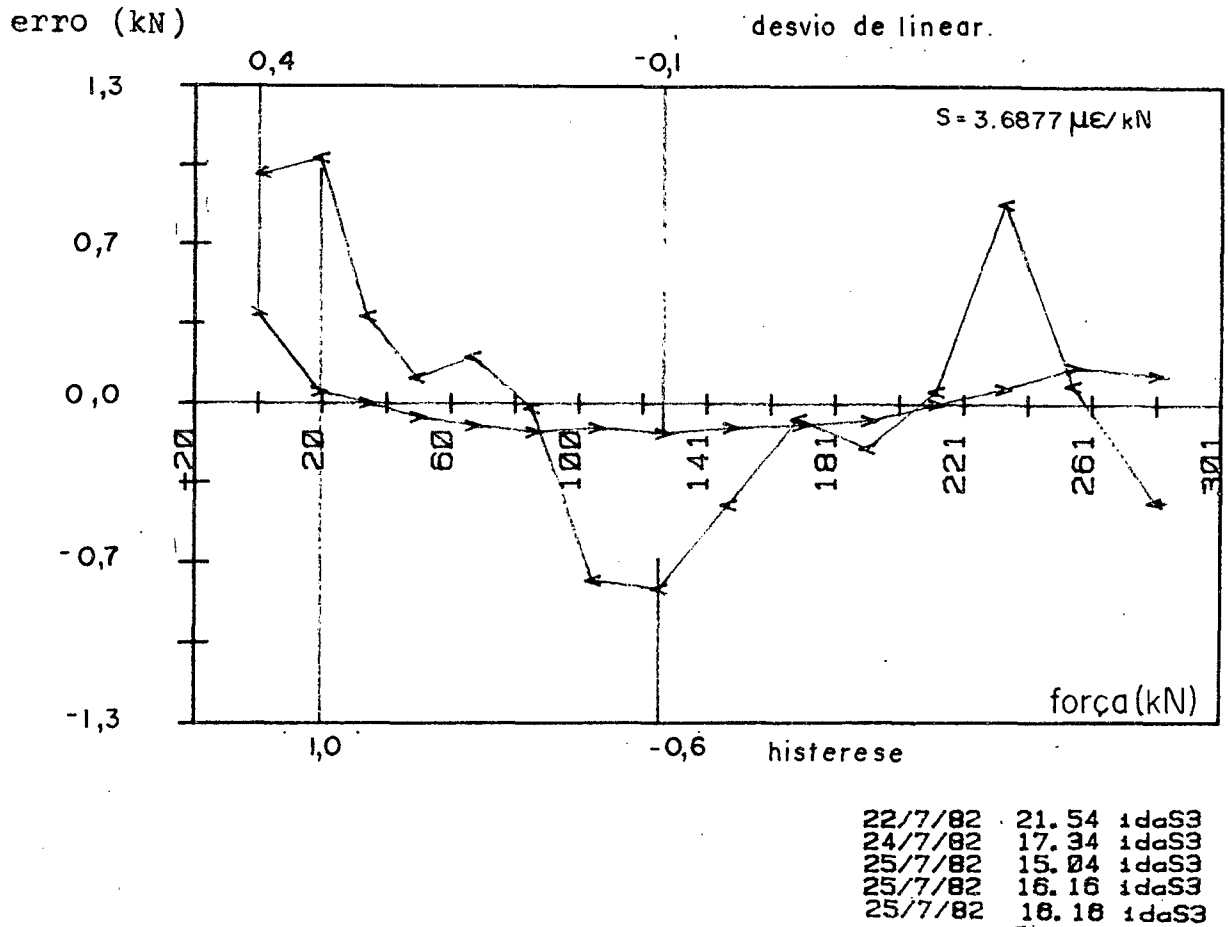


Figura 19 - Curva de erros média para a coluna 2.

Uma comparação entre os erros sistemáticos para as três colunas calibradas simultaneamente está mostrada nas Figuras 20 a e b, nas quais é possível comprovar que o exemplo da coluna 2, que foi descrito acima, é significativo para o comportamento das três colunas durante o processo de calibração. São mostrados no gráfico os mesmos erros para a média das três colunas, isto é, para o comportamento médio do ensaio.

A curva de erros que descreve este comportamento médio do ensaio está mostrada na Figura 21.

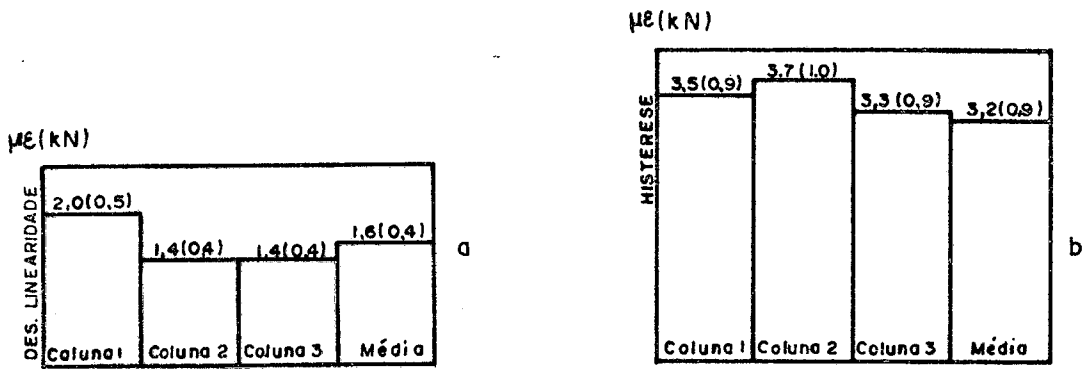


Figura 20 - Comparação entre os erros sistemáticos. a) Desvio da Linearidade. b) Histerese.

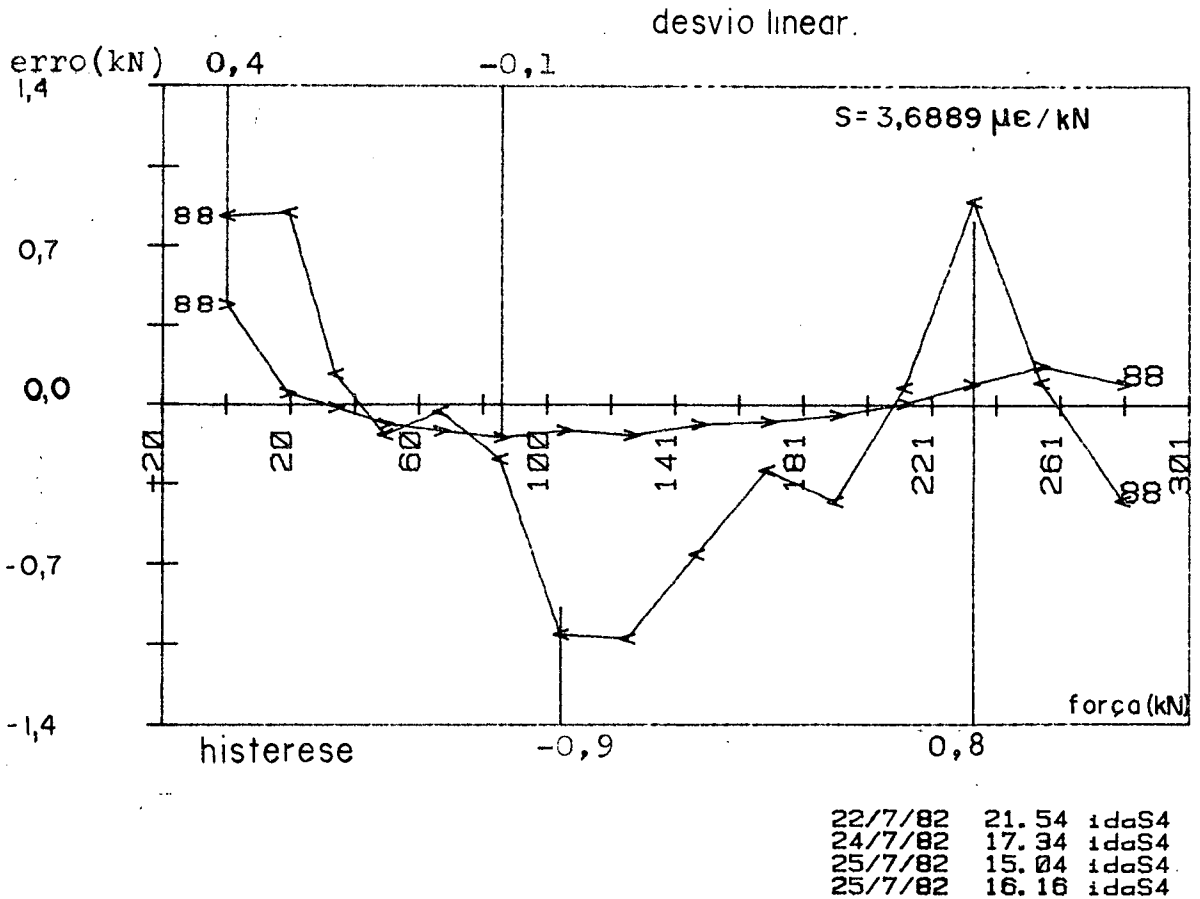


Figura 21 - Curva de erros média para calibração das três colunas.

As informações obtidas a partir do gráfico mostrado na Figura 21 servirão de referência aos resultados de calibração da prensa:

- Máximo desvio de Linearidade: 0,4 kN ~ 0,2% VFE
- Máxima Histerese: 0,9 kN ~ 0,5% VFE
- Sensibilidade (S): 3,6889 $\mu\epsilon$ /kN

A medição da deformação específica através de MIDs não é recomendada da maneira como está prevista, isto é, com os MIDs localizados paralelamente ao comprimento a medir. Face à flexão que ocorre nas colunas, um só transdutor por coluna não fornece informação suficiente para a determinação posterior da força axial de calibração, já que a componente de flexão do valor medido não pode ser eliminada, como era feito com os EREs.

A Figura 22 mostra uma comparação entre um MID (Nº 15) e um ERE (Nº 7) ambos medindo na mesma direção, na coluna 2, através das respectivas curvas de erro. Observa-se na figura citada que o comportamento de ambos os transdutores é semelhante, porém o MID apresenta um desvio de linearidade cerca de três vezes superior ao ERE. Este resultado se deve ao fato do MID estar afastado da coluna, portanto determinando a deformação de flexão em um ponto afastado do eixo da coluna.

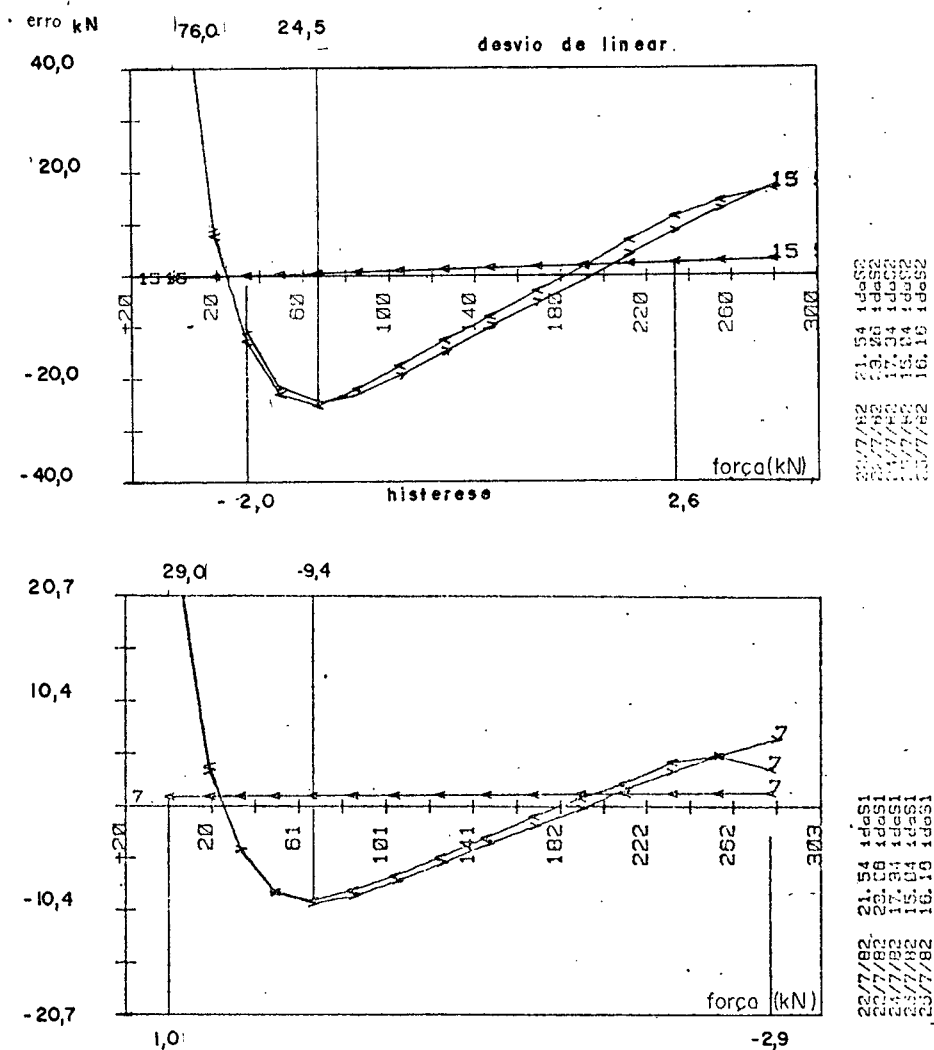


Figura 22 - Comparação entre curvas de erros dos MID 15 e ERE 7.

4.1.2. Erros Aleatórios

A precisão do sistema de medição depende dos erros aleatórios existentes, isto é, da repetibilidade do sistema.

A medida da precisão é obtida através do cálculo do desvio padrão para as várias repetições do ensaio. Este cálculo é realizado de acordo com a fórmula

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{n-1}} \quad (6)$$

onde

S_x = Desvio padrão para amostras

x = Leitura

n = Número de ciclos de medição.

Na Figura 23 está mostrada a curva de erros média para o ERE 7, obtida através de cinco repetições do ensaio de calibração (somente carregamento). Sobre a curva de erros média são plotadas as curvas de erros obtidas em cada ciclo de medição, indicadas através de algarismos de um a cinco. Calculando-se o desvio padrão para cada um dos valores da grandeza a medir é determinado o intervalo de confiança de cada medida, isto é, a faixa de dispersão do erro aleatório. Os valores máximos e mínimos calculados para o desvio padrão são indicados na parte superior da figura, enquanto que a escala à esquerda indica os erros encontrados.

Na observação da figura anterior nota-se que as curvas de erros estão deslocadas entre si por um valor constante. Este comportamento evidencia uma flutuação do ponto zero entre cada ciclo de medição da ordem de 1% VFE.

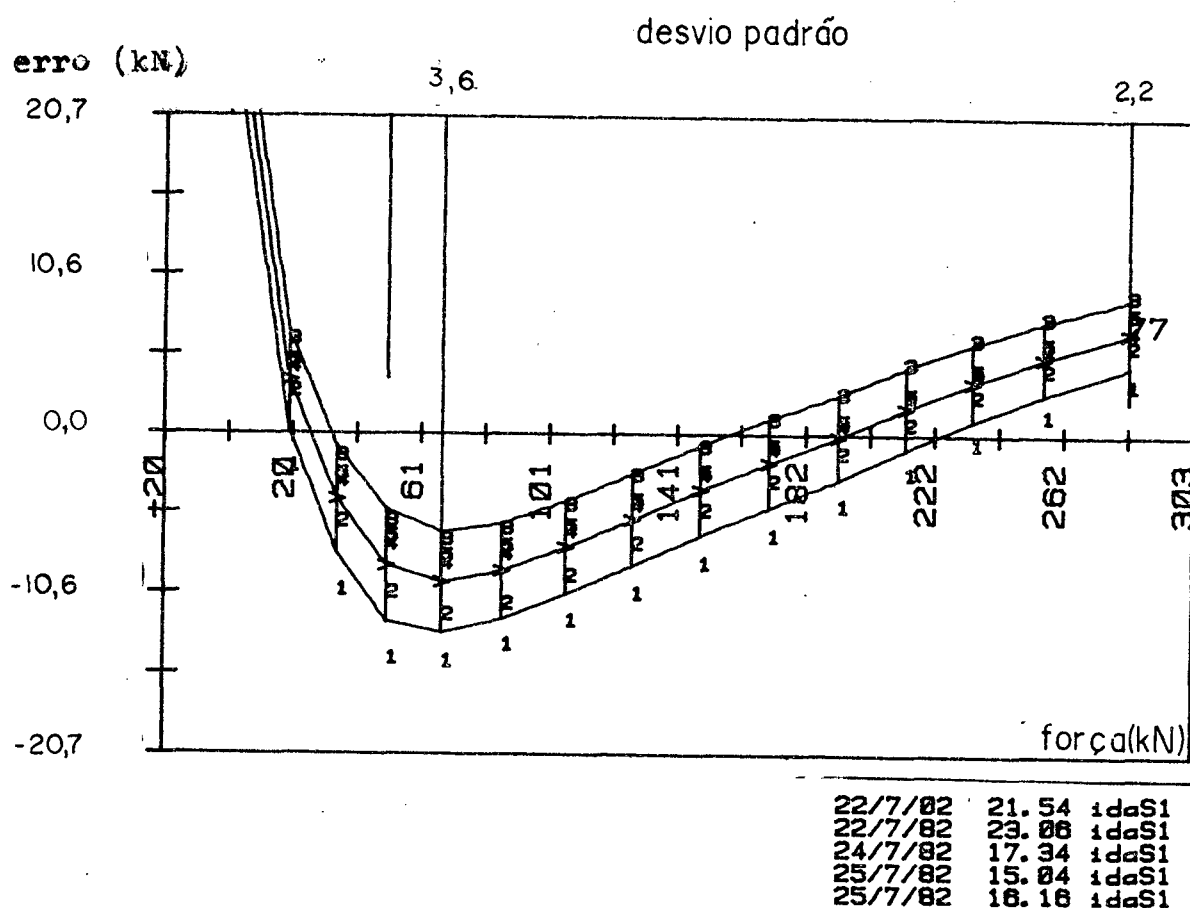


Figura 23 - Curva de erros mostrando a repetibilidade do ERE 7 para 5 ciclos de medição.

Na Figura 24, a seguir, são plotados somente os zeros de cada ciclo de medição, mostrando seu comportamento ao longo do ensaio.

Analisando-se as condições de ensaio (temperatura e tempo decorrido entre as medições) conclui-se que a flutuação do zero é puramente aleatória.

No cálculo dos desvios padrão, todos os ciclos são zerados em função do primeiro ciclo; eles mantêm, portanto, sua diferença relativa, resultando em valores altos do desvio.

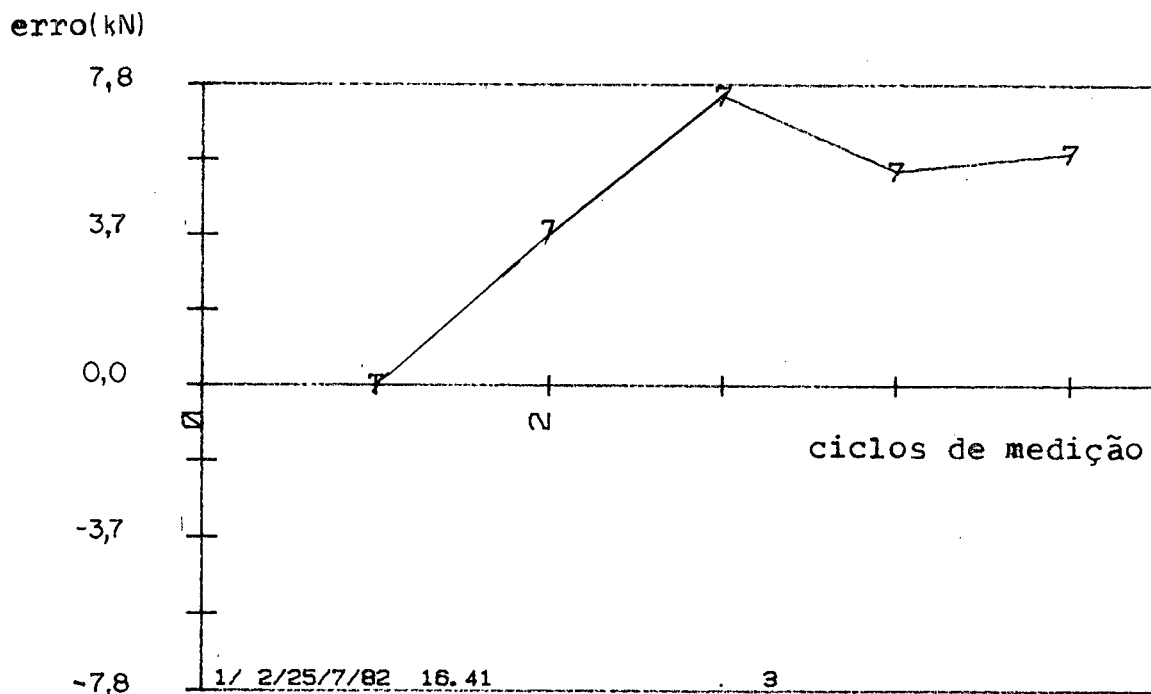


Figura 24 - Flutuação do Ponto Zero durante os 5 ciclos de medição.

Para minimizar este efeito, pode-se zerar analiticamente cada um dos ciclos de medição, eliminando assim a influência da flutuação do zero sobre a repetibilidade do sistema em teste. Resultados mostrando a diferença entre os máximos desvios obtidos destas duas maneiras são vistos na Figura 25. Na mesma figura são mostrados, ainda, os máximos desvios padrão para cada um dos MIDs e para a curva de erros média de todos os EREs. Este último, resulta em um valor baixo do desvio, porque o máximo desvio de cada ERE não o-

corre sempre para um mesmo ponto. Por exemplo: um alto valor de desvio pode ser eliminado por um desvio pequeno de outro ERE.

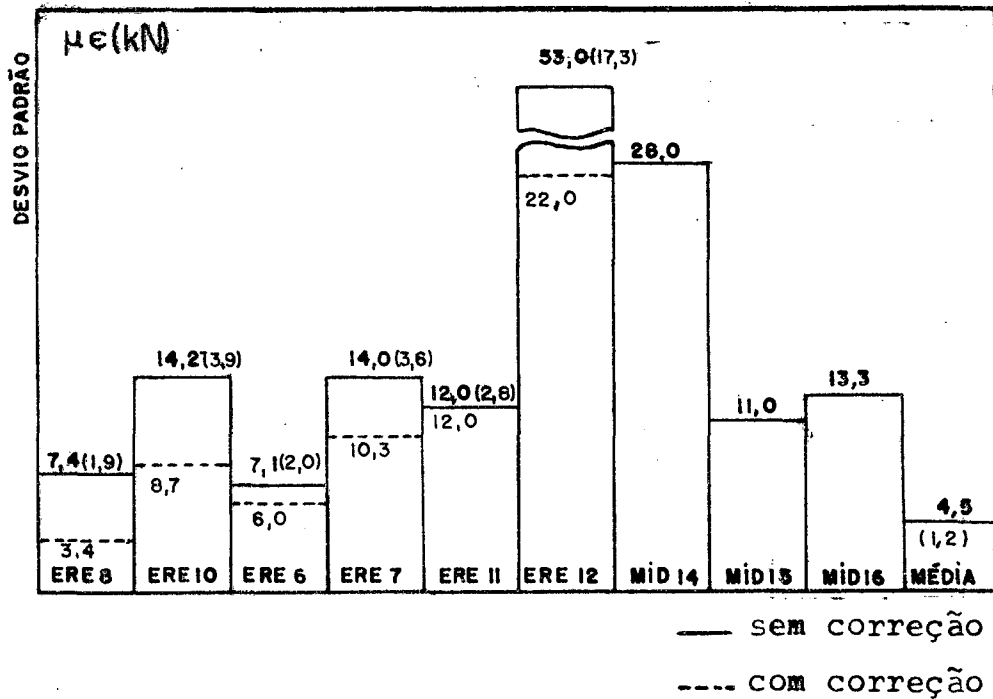
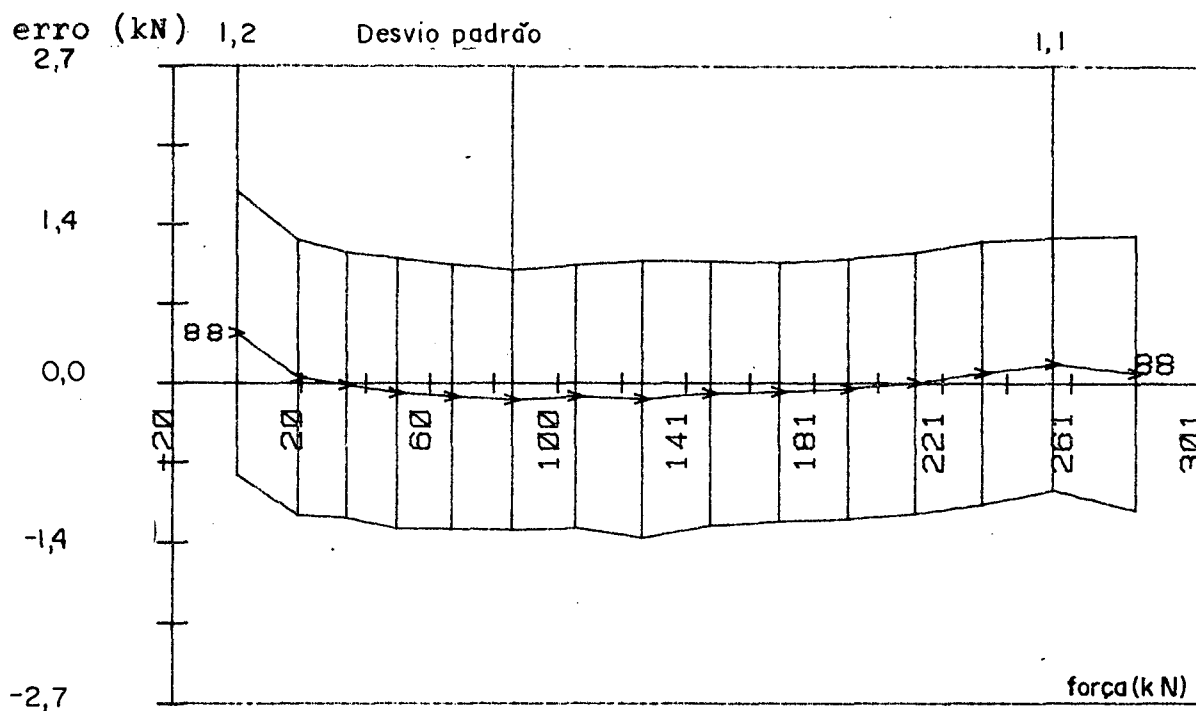


Figura 25 - Comparação entre Desvios Padrão para os vários transdutores.

A Figura 26 mostra a curva de erros da média de todos os EREs com o intervalo de confiança calculado para cada valor da grandeza a medir, sendo portanto representativa da calibração das colunas.

Os erros aleatórios a que estão sujeitas as medições do presente ensaio de calibração são definidos através da incerteza de medição, que especifica a faixa de valores dentro da qual existe a probabilidade de encontrar-se 95% dos erros possíveis [1]:



22/7/82	21.54	idaS4
24/7/82	17.34	idaS4
25/7/82	15.04	idaS4
25/7/82	16.16	idaS4
25/7/82	18.18	idaS4

Figura 26 - Intervalo de confiança para a média das três colunas.

$$I_m = t \cdot s$$

(7)

onde

I_m = Incerteza de medição

s = Desvio padrão para uma amostra

t = Fator de correção para pequenas amostras (tabelado) |1|

Para a curva de erros média do ensaio de calibração das colunas, a incerteza de medição vale

$$I_m = \pm 2,4 \text{ kN} \sim 0,8\% \text{ VFE} \quad (t = 2)$$

4.2. CALIBRAÇÃO DA PRENSA

A força de calibração aplicada à prensa é aproximadamente três vezes maior do que a força aplicada na calibração das colunas. Deste modo, cada uma das colunas está sujeita à mesma força em ambas as calibrações realizadas, permitindo a comparação entre os dois casos e testando a possibilidade de ampliação da faixa de medição da prensa.

O primeiro resultado obtido na calibração da prensa refere-se à sensibilidade dos transdutores. A Figura 27 mostra a comparação entre as sensibilidades dos vários transdutores através de um diagrama de barras.

4.2.1. Erros Sistemáticos

A partir das observações da Figura 27 conclui-se que também na prensa as colunas estão sujeitas a uma flexão. Este fato fica evidente através da diferença de sensibilidade que existe entre EREs opostos. Esta constatação leva à comprovação de que o sistema de fixação entre colunas e placas não se

comporta da forma ideal, isto é, sem transmitir momentos.

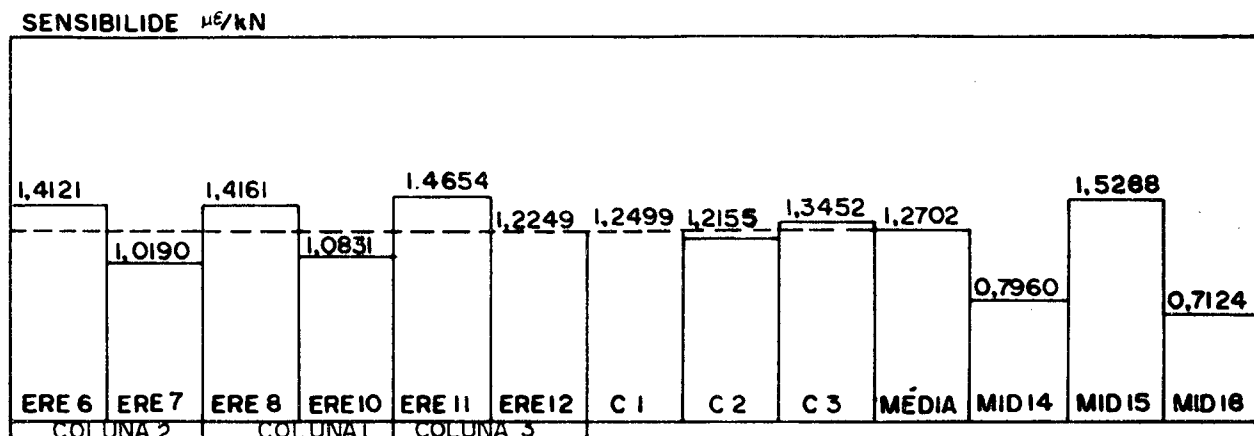


Figura 27 - Comparação entre as sensibilidades determinadas para os transdutores utilizados na prensa.

Uma outra constatação em relação à mesma figura refere-se à diferença entre a média das três colunas. Enquanto que na calibração das colunas, (Fig. 16), a diferença entre as sensibilidades médias é bastante pequena, estas diferenças são maiores na prensa, evidenciando uma força excêntrica atuando sobre a mesma, apesar de todo cuidado na preparação do ensaio.

A partir dos resultados mostrados no diagrama de blocos da Figura 27 pode-se estabelecer a primeira comparação entre as duas calibrações realizadas:

- Sensibilidade das colunas = $3,6880 \mu\epsilon/kN$
- Sensibilidade da prensa = $1,2702 \mu\epsilon/kN$

uma projeção dos resultados obtidos na calibração das colunas em série indicia uma sensibilidade de $3,6880/3$ ou $1,2293 \mu\epsilon/kN$. Ou se

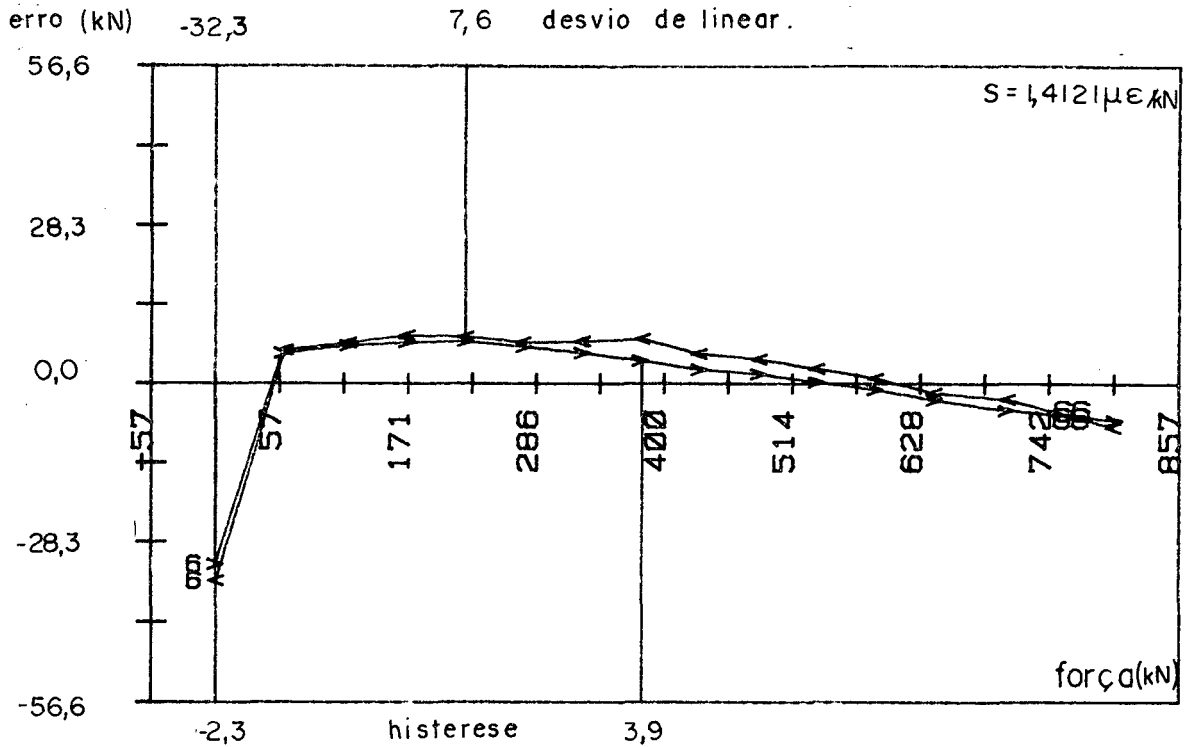
ja, um erro de 3,5% em relação à sensibilidade da prensa (colunas em paralelo). Estes resultados indicam que a sensibilidade obtida em relação às colunas em série não é válida como sensibilidade da prensa, que amplie sua faixa de medição.

A natureza dos momentos que ocorrem na prensa são discutidos a partir dos resultados apresentados na Figura 28. Nesta figura tem-se uma comparação entre as curvas de erros, média das 5 leituras dos EREs 6 e 7, os mesmos mostrados no item referente à calibração das colunas. Pode-se observar, nestas curvas, a existência de curvaturas iniciais acentuadas, que indicam uma flexão que é elevada no início do ensaio e tende a diminuir à medida que as forças de calibração aumentam.

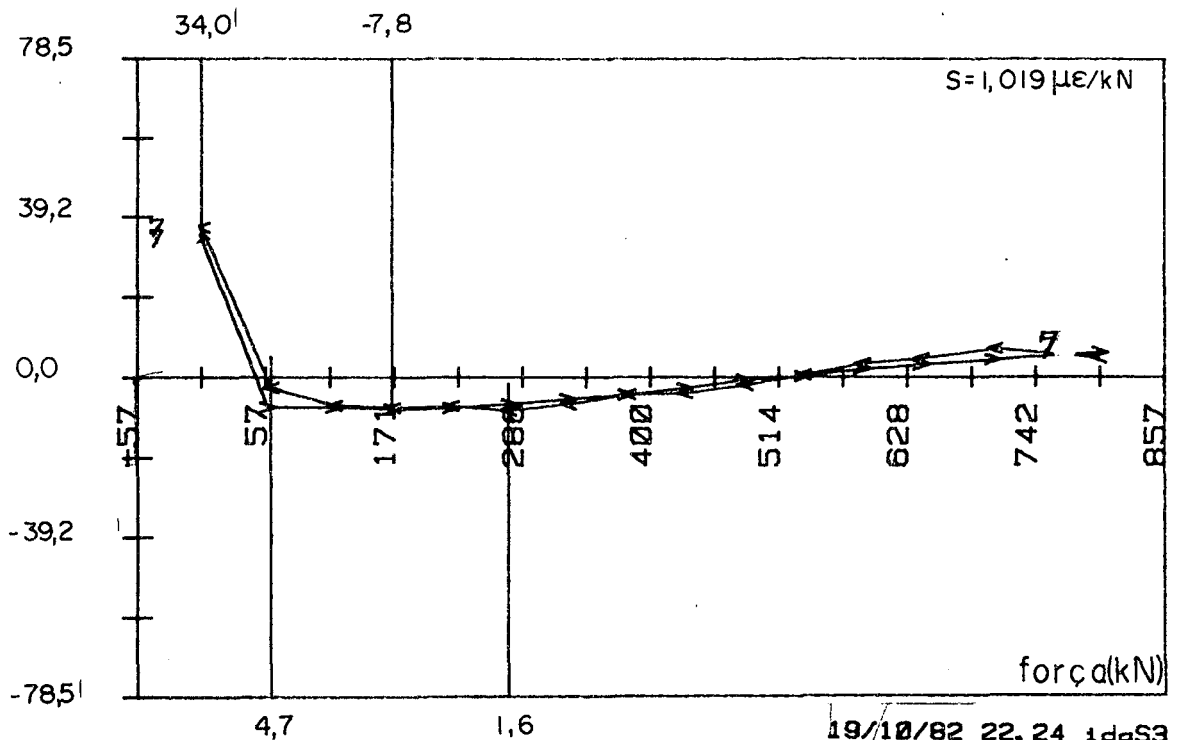
Uma observação da histerese mostra uma pequena diferença entre as curvas de carregamento e descarregamento na ordem de 0,4% VFE.

Efetuando-se a média entre os resultados obtidos para os dois EREs opostos é obtida a curva de erros mostrada na Figura 29, onde se pode observar que o efeito da flexão é praticamente eliminado.

A Figura 30 mostra uma comparação entre os erros sistemáticos para as três colunas e para a prensa (média das três colunas) conforme se observa, os desvios de linearidade aumentam na calibração da prensa, se comparados aos resultados obtidos na calibração das colunas. Levando-se em conta que para as três colunas os máximos desvios de linearidade ocorrem para uma faixa inicial de medição (0-10kN), estes erros podem ser associados ao padrão de calibração, que possui erros de medição no iní-



19/10/82	22.24	1daS3
19/10/82	24.07	1daS3
19/10/82	24.53	1daS3
20/10/82	0.55	1daS3
20/10/82	10.50	1daS3



19/10/82	22.24	1daS3
19/10/82	24.07	1daS3
19/10/82	24.53	1daS3
20/10/82	0.55	1daS3
20/10/82	10.50	1daS3

Figura 28 - Curvas de erros para dois ERES opostos (6 e 7) localizados na coluna 2.

cio da faixa, conforme foi constatado na comparação entre padrões.

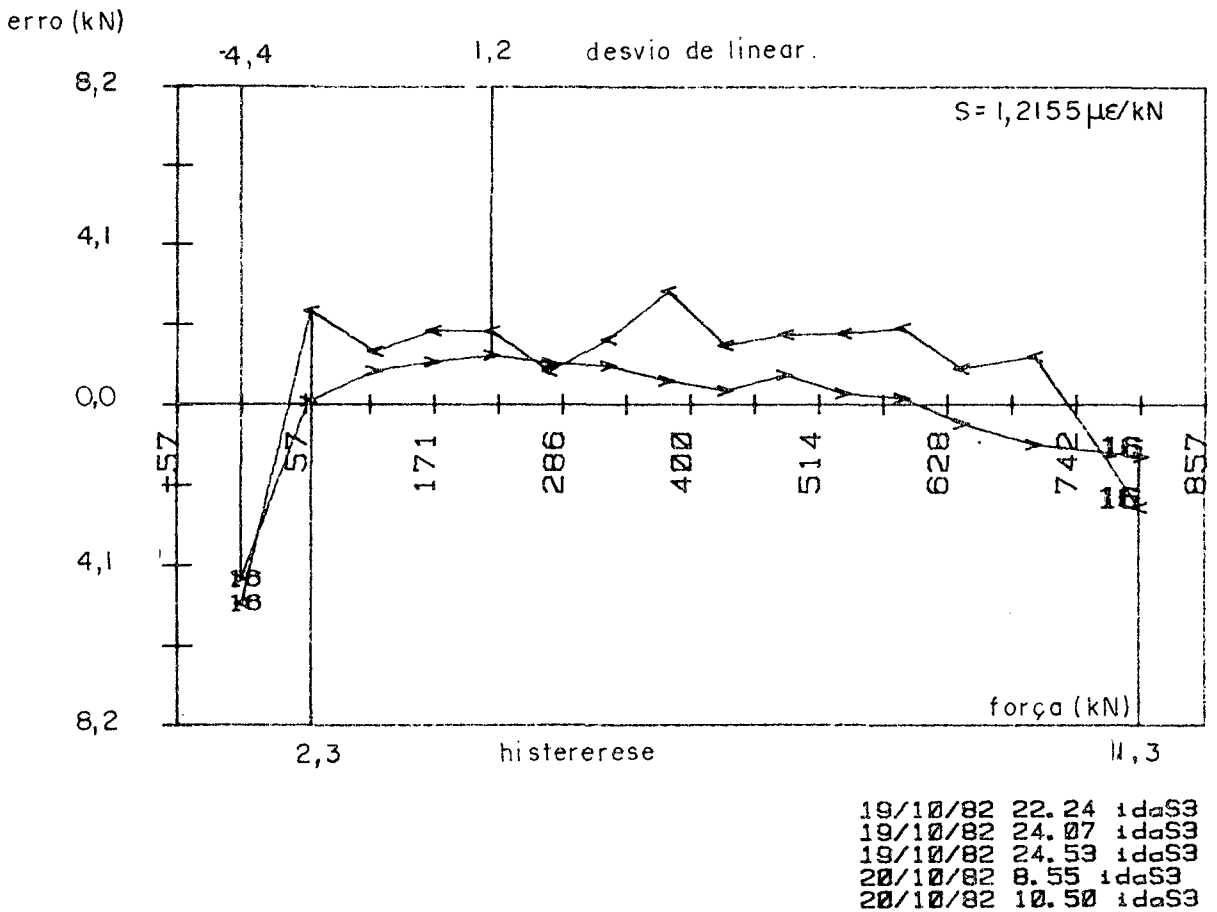


Figura 29 - Curva de erros média para a coluna 2.

Conforme se observa na Figura 30, a seguir, as histereses encontradas são da mesma ordem que aquelas obtidas na calibração das colunas, portanto independem do tipo de calibração realizada.

A curva de erros que representa a calibração da prensa está mostrada na Figura 31.

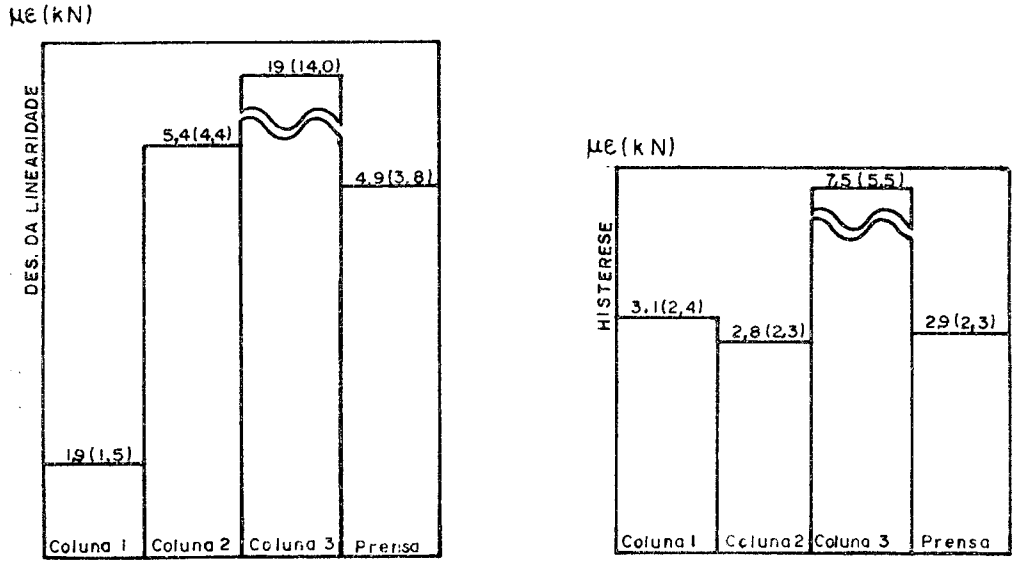


Figura 30 - Comparação entre os erros sistemáticos. a) Desvio de linearidade. b) Histerese.

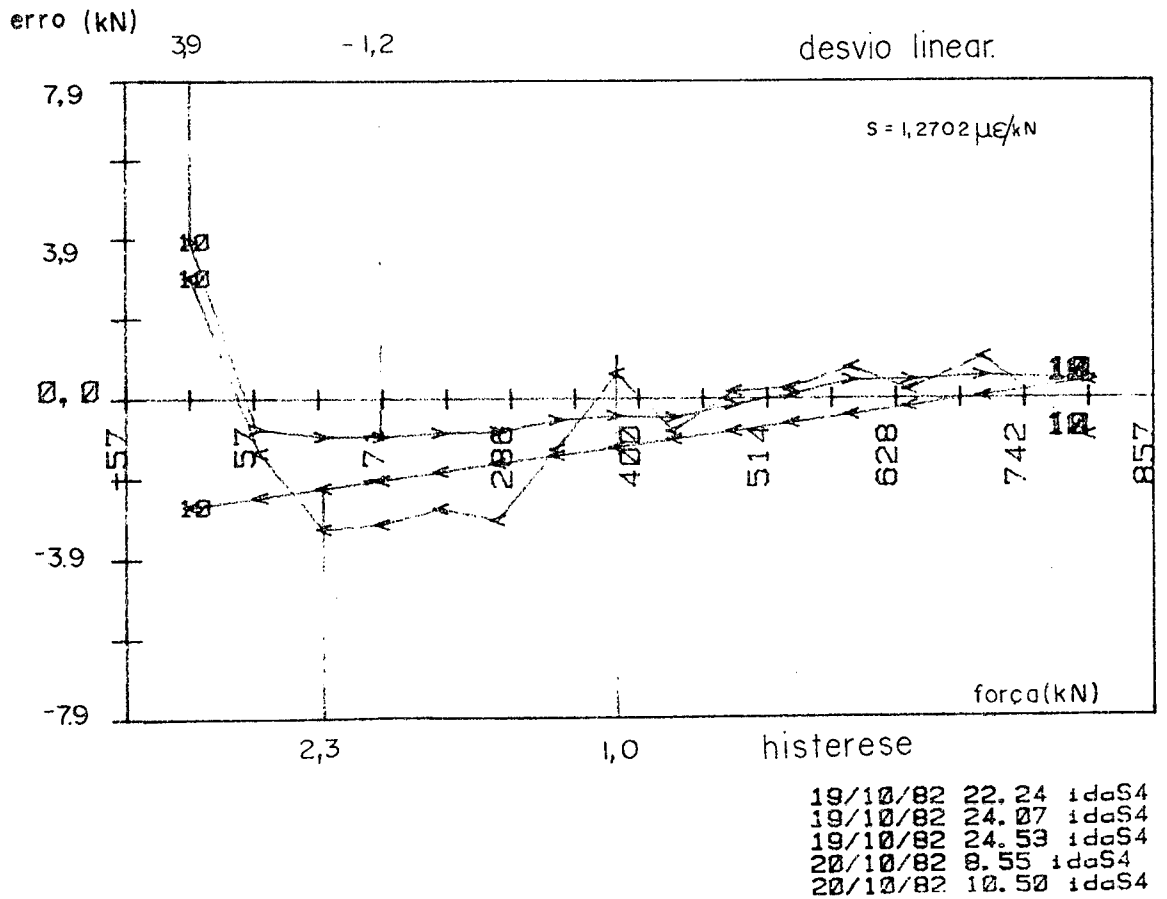


Figura 31 - Curva de erros sistemáticos da prensa.

Conforme foi mostrado anteriormente, um desvio de linearidade elevado permanece ainda na faixa inicial da curva de erros da prensa, enquanto que a característica de histerese permanece praticamente constante, se comparada aos resultados do ensaio anterior.

O quadro 3, resume a comparação entre os resultados obtidos nos dois ensaios de calibração do ponto de vista dos erros sistemáticos.

	Colunas	Prensa
Sensibilidade	3,6889 $\mu\epsilon / \text{kN}$	1,2702 $\mu\epsilon / \text{kN}$
Desvio de Linearidade	0,4 kN 0,2% VFE	3,9 kN 0,5% VFE
Histerese	0,9 kN 0,5 % VFE	2,3 kN 0,3% VFE

Quadro 3 - Comparação entre erros sistemáticos observados nos dois ensaios de calibração.

Com o objetivo de se compreender o comportamento da prensa durante os ensaios, tem-se na Figura 32 uma comparação entre as curvas de erros para cada um dos EREs.

Pode-se observar na Figura 32, o comportamento semelhante entre EREs opostos de uma mesma coluna, enquanto que as três colunas não apresentam comportamento semelhante entre si. Para os EREs 8 e 10 (coluna 1) nota-se uma flexão máxima inicial ficando a coluna fletida com a concavidade voltada para o lado externo da PD.

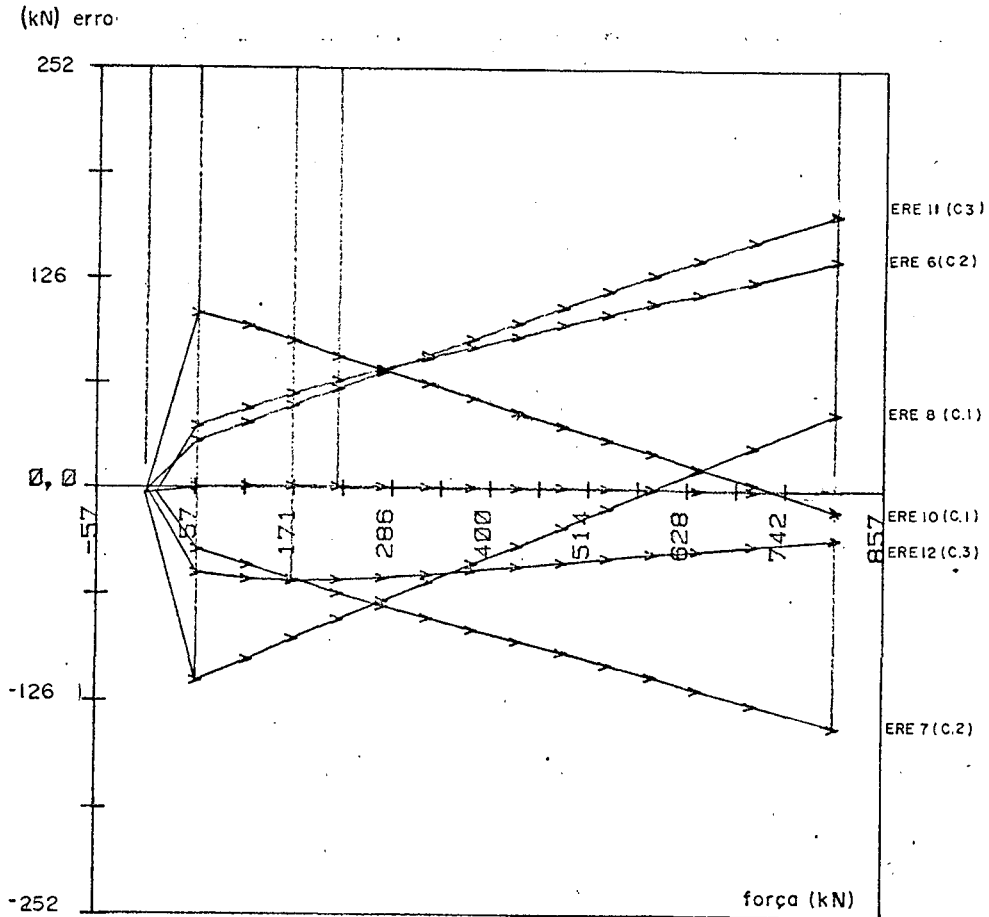


Figura 32 - Comparação entre as curvas de erros dos ERES utilizados.

À medida que o ensaio se desenvolve, esta flexão diminui, conforme se observa, invertendo seu sentido na altura do 13º valor da grandeza a medir (630 kN), ficando a concavidade voltada para o centro da PD.

Para os ERES 6 e 7 (coluna 2) a flexão aumenta proporcionalmente à carga aplicada, com a concavidade voltada ao centro da PD.

Na coluna 3 os ERES 11 e 12 indicam um comportamento semelhante à coluna 2 ocorrendo flexão no mesmo sentido,

isto é, com a concavidade voltada ao centro da PD.

As constatações acima levam a supor que, ao primeiro valor de carga aplicada, um momento fletor elevado aplicado à coluna 1, provavelmente devido a erros de fabricação nos elementos de fixação da coluna. Este momento fletor vai diminuindo à medida que inicia a deformação das placas da PD, chegando-se ao final do ensaio com as três colunas fletidas de maneira semelhante. A Figura 33 esquematiza esta deformação final, supondo uma deformação das placas.

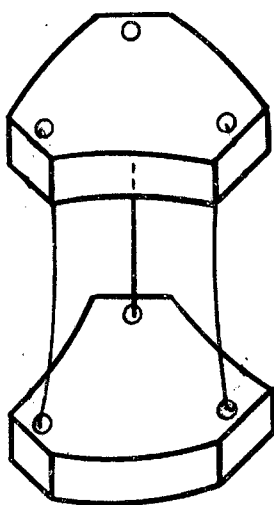


Figura 33 - Provável configuração da prensa dinamo-métrica durante a calibração.

4.2.2. Erros Aleatórios

Com objetivo de comparar-se os resultados das

duas calibrações realizadas, é mostrada na Figura 34 a curva de erros média do ERE 7, o mesmo mostrado durante a calibração das colunas.

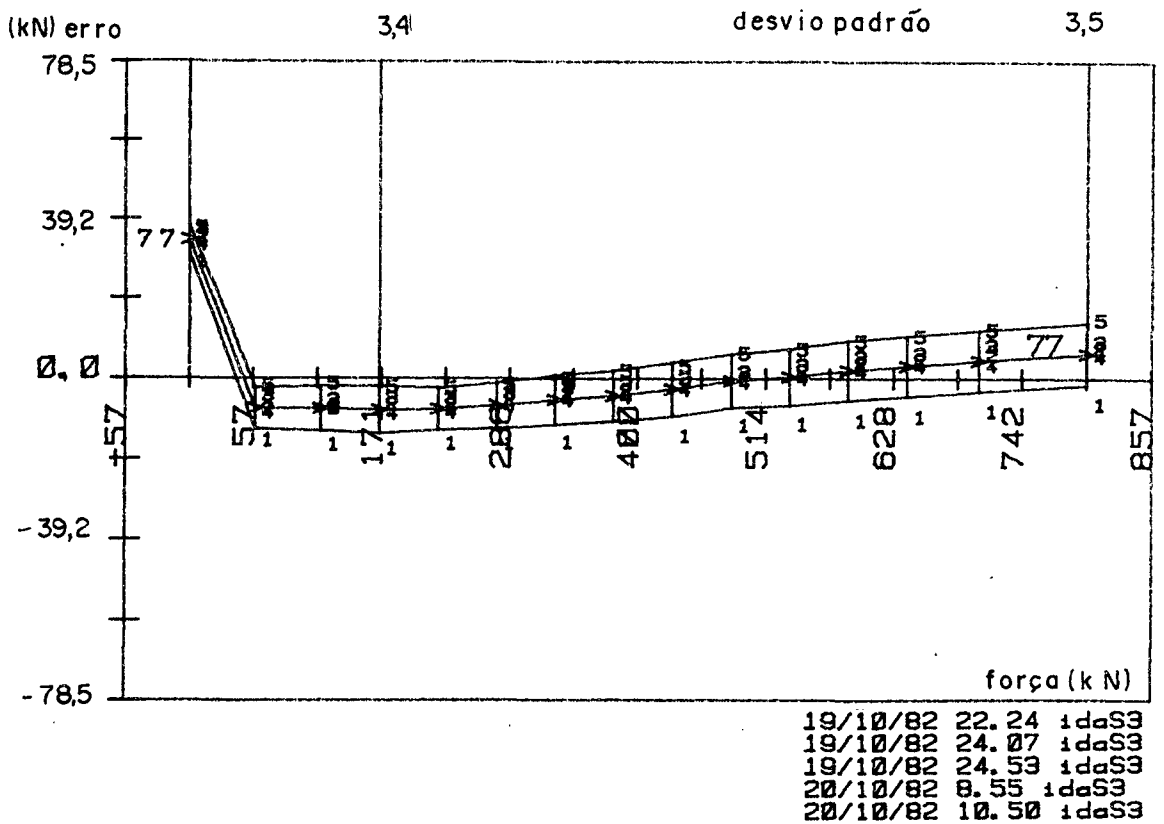


Figura 34 - Curva de erros aleatórios para o ERE 7.

Conforme já descrito anteriormente, os algoritmos de 1 a 5 representam a curva de erros para cada ciclo de medição. A distribuição das medidas em torno da média é semelhante àquelas obtidas nos resultados correspondentes no ensaio das colunas.

O desvio padrão mostrado na parte superior do gráfico indica que os erros aleatórios não se alteram quando muda a forma de calibração.

Os máximos desvios padrão para os transdutores testados estão comparados na Figura 35, onde podem ser constata-

das as diferenças existentes entre os valores obtidos na calibração da prensa e os valores obtidos na calibração das colunas (valores entre parenteses).

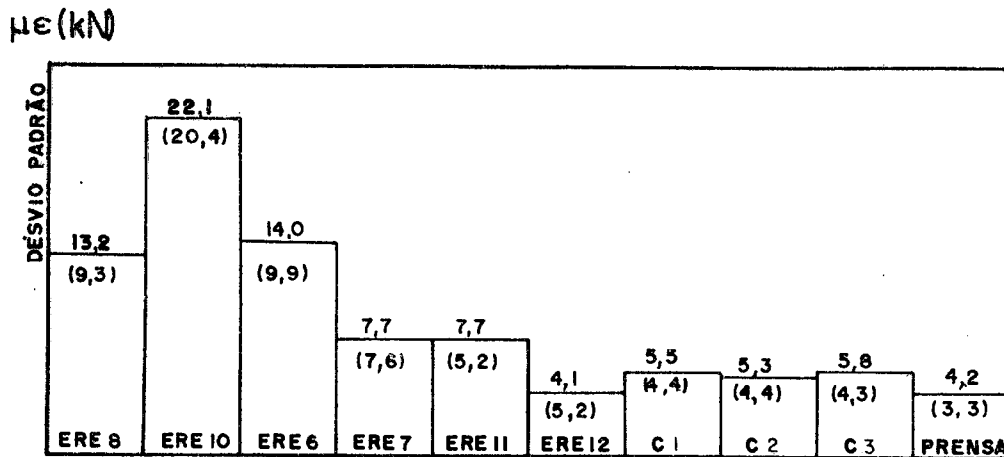


Figura 35 - Comparação entre os máximos desvios padrões dos EREs, colunas e prensa.

A curva de erros média, que representa o comportamento dos erros aleatórios para a prensa, está mostrada na Figura 36, onde se observa uma faixa de dispersão constante ao longo de toda faixa de medição.

A partir dos resultados mostrados na Figura 36 é calculada a incerteza de medição como sendo

$$I_m = \pm 6,3 \text{ kN} \sim 0,8\% \text{ VFE.}$$

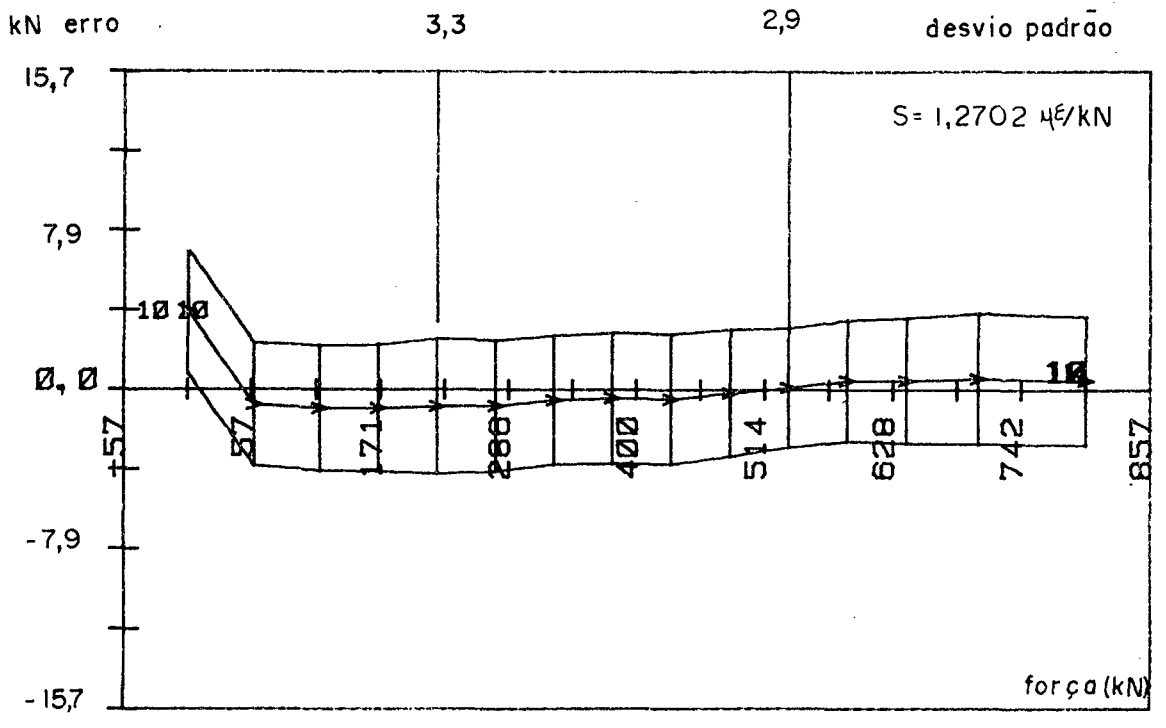


Figura 36 - Curva de erros aleatórios ou carta de calibração da prensa dinamométrica.

4.3. COMPORTAMENTO FRENTE A CARREGAMENTOS EXCÊNTRICOS

Nos ensaios de calibração da PD tentou-se aplicar a força tão próxima quanto possível do centro; nota-se, porém, pelo comportamento das sensibilidades de cada coluna, que a força se encontra deslocada na direção da coluna 3 (maior sensibilidade).

Fazendo-se um ensaio da prensa com o ponto de

aplicação da força propositadamente fora do centro, observam-se os resultados mostrados na Figura 37.

Da comparação entre as duas situações de carregamento pode-se concluir que a prensa é afetada por forças ex-cêntricas. Entretanto, trabalhando com a média das três colunas e eliminam-se, em parte, os efeitos da excentricidade sobre o resultado final.

$\mu\epsilon/kN$			
() C. EXCÊNTRICA			
1,2499 (1,4481)	1,2155 (1,4520)	1,3452 (1,0380)	1,2702 (1,3127)
COLUNA 1	COLUNA 2	COLUNA 3	PRENSA

Figura 37 - Comparação entre Sensibilidades para carregamento central e excêntrico.

A variação de 3,3% nas sensibilidades indica que a centragem do conjunto, atuador hidráulico e célula de carga a calibrar, não pode ser desprezada durante os processos de calibração.

C O N C L U S Ō E S

Com base nos resultados analisados no capítulo anterior são possíveis as seguintes conclusões:

- 1 - Em ambas as calibrações realizadas é mostrada a existência de momentos fletores superpostos às forças axiais de calibração. Resultados da medição da deformação com EREs opostos mostram que os efeitos das flexões são eliminados.
- 2 - A medição da deformação através de MIDs não é recomendada na posição em que foi utilizada no trabalho. Devido às flexões existentes, os MIDs registram além de um deslocamento linear resultante do carregamento axial, um deslocamento angular devido à flexão das colunas. Este último mascara os resultados encontrados.
- 3 - A comparação entre as sensibilidades obtidas em ambas as calibrações indicam que não é possível utilizar a sensibilidade das colunas em série como uma sensibilidade válida para ampliar a faixa de medição na prensa. Portanto, mesmo com as limitações de carga do padrão, faz-se necessário um ensaio sobre a prensa para determinação da sensibilidade real da mesma.
- 4 - A comparação dos erros sistemáticos e aleatórios indica que estes erros não são afetados pelo tipo de montagem utilizada (barras em série ou paralelas). Deste modo, sob o aspecto de

erros, a calibração das colunas em série é válida como uma calibração da prensa que amplia sua faixa de medição.

- 5 - Os erros aleatórios indicam uma precisão da prensa de 0.8% VFE. Considerando que a classe de precisão de um padrão é normalmente de 5 a 10 vezes superior à precisão do elemento a ser testado, conclui-se que a prensa dinamométrica pode ser utilizada como padrão nas calibrações que permitem uma precisão da ordem de 4% VFE.
- 6 - Os resultados sobre a prensa dinamométrica estão afetados por forças excêntricas, conforme foi visto. Portanto, quando na utilização da prensa, se faz necessária a centragem do elemento em teste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SCHNEIDER, C.A., Calibração de sistemas de medição. Apostila, Minicurso 11. Encontro Nacional de Atualização Tecnológica em Engenharia Mecânica (ENATEM) LABMETRO, UFSC, 1983.
2. LUCKE, H. e SCHNEIDER, C.A., Aplicação de um sistema de aquisição de sinais para calibração de transdutores. In: V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Campinas, 1979, p. 231-241.
3. WIERINGA, H., Deadweight standardising machine 55.500 kgf. VDI Berichte Nr 137. Netherlands, 1970. p. 75-77.
4. INSTRUMENT SOCIETY of AMERICA. Specifications and tests for strain gages force transducers. ISA - S 37.8, 1975. North Carolina.
5. TEGELLAR, P. e WIERINGA, H., Some developments at TNO on load cells for weighing purposes. VDI Berichte Nr. 137. Netherlands, 1970, p. 29-40.
6. NORTON, H., "Handbook of transducers for electronic measurements and instrumentation" Prentice-Hall, N. Jersey, 1969.
7. LUCKE, H., Pacote de programas para aquisição e tratamento de dados. Publicação Interna LABMETRO - UFSC, Florianópolis, 1982.
8. BECKWITH, T.G. e BUCK, N.L., Mechanical Measurements. Massachusetts, Addison Wesley, 1965, 559 p.

A P Ê N D I C E I

DESCRIÇÃO DOS GRÁFICOS UTILIZADOS

1 - CURVAS DE ERROS

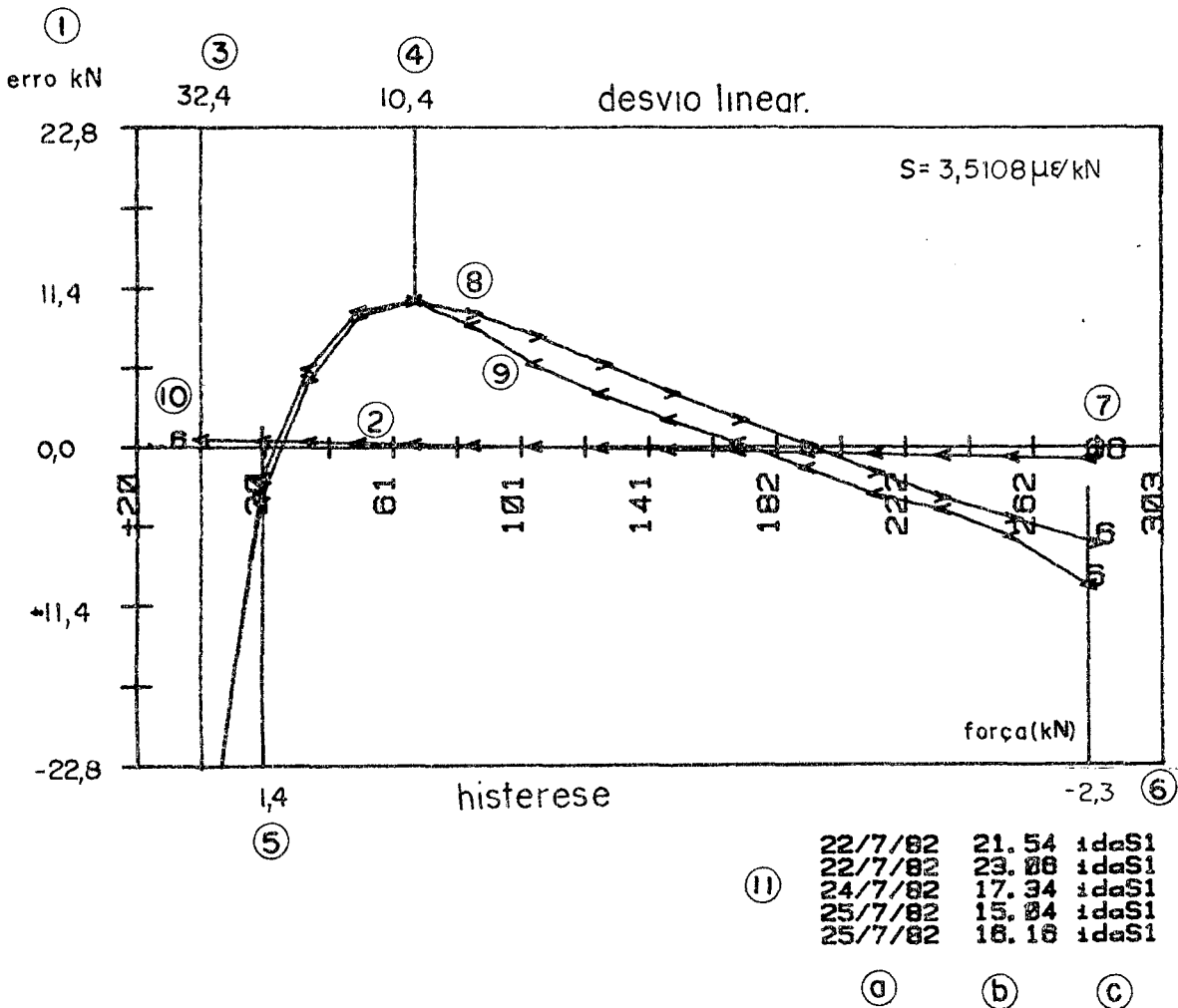


Figura 1 - Curva de Erros.

As curvas de erros conforme já visto, são obtidas a partir das curvas de calibração e fornecem uma série de

informações sobre o comportamento do sistema de medição. Um exemplo destas informações será descrito de acordo com a Figura 1.

- 1 - No eixo das ordenadas encontra-se a escala de erros já transformados de deformação $[\mu\epsilon]$ para força equivalente $[kN]$.
- 2 - Eixo das Abcissas - representa a reta de regressão ajustada sobre a curva de carregamento. Sobre esta reta estão indicados os valores da carga aplicada.
- 3 - Máximo desvio de linearidade abaixo da reta de referência (valor negativo).
- 4 - Máximo desvio de linearidade acima da reta de referência.
- 5 - Máxima histerese quando a curva de carregamento está abaixo da curva de descarregamento.
- 6 - Máxima histerese quando a curva de carregamento está acima da curva de descarregamento.
- 7 - Identificação do transdutor ou coluna.
- 8 - Curva de erros obtida no carregamento do sistema.
- 9 - Curva de erros obtida no descarregamento do sistema.
- 10 - Reta de regressão ajustada à curva de descarregamento.
- 11 - a) Data de cada ciclo de medição
b) Horário
c) Tipo do programa utilizado para avaliação.