

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MÉTODO DE MEDIÇÃO DA RIGIDEZ
ESTÁTICA ABSOLUTA EM MÁQUINAS FERRAMENTAS

V O L U M E I

TESE SUBMETIDA A UNIVERSIDADE
FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
A OBTENÇÃO DO GRÁU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS.

EDEMAR SOARES ANTONINI

FEVEREIRO - 1974

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTE EM CIÊNCIAS - ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Kozel

PROF. ENG^o. JAROSLAV KOZEL, Ph.D - ORIENTADOR

Domingos Boechat

PROF. ENG^o. DOMINGOS BOECHAT ALVES, Ph.D. - IN-
TEGRADOR DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS
PROFESSORES:

- PROF. ENG^o. JAROSLAV KOZEL, Ph.D.

Kozel

- PROF. ENG^o. NELSON BACK, Ph.D.

Nelson Back

- PROF. ENG^o. CLOVIS SPERB DE BARCELOS, M.Sc.

Clovis Sperb de Barcelos

EM MEMÓRIA DE MEU PAI
QUE NORTEOU MEUS PRIMEIROS PASSOS

A MINHA ESPOSA LILIANE
AOS MEUS FILHOS LIEDE
SIMONE, BIANCA E FABIANO

A G R A D E C I M E N T O S

O autor deseja expressar seus agradecimentos:

- ao professor Jaroslav Kozel, do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, pela orientação prestada.
- aos funcionários do Laboratório de Máquinas Ferramentas do Centro Tecnológico pela valiosa ajuda na fabricação dos dispositivos.
- à COPERTIDE (Comissão Permanente para Tempo Integral e Dedicção Exclusiva) pelo regime especial de tempo.
- à CAPES (COORDENAÇÃO do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida.
- e a todos que direta e indiretamente, através do incentivo e da espontanea colaboração tornaram possível a conclusão desta tese.

S U M A R I O

RESUMO

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I - RIGIDEZ ESTÁTICA

1.1 -	Conceituação	03
1.2 -	Adição de Rigidez	07
1.3 -	Medição de Rigidez	10
1.3.1 -	Força aplicada	12
1.3.2 -	Deformação	13

CAPÍTULO II - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 -	Aplicação das forças	17
2.1.1 -	Dinamômetro de anel WAZAU	19
2.1.2 -	Dinamômetro de anel para pequenas cargas	20
2.1.3 -	Glinômetro AUS/JENA	20
2.2 -	Medição das deformações	21
2.2.1 -	Aparelhos de medição TESA GN 22	21
2.2.2 -	Apalpadores TESA	22
2.2.3 -	Relógios comparadores	22
2.3 -	Traçador de gráficos (plotter)	22

CAPÍTULO III - MÉTODO INDIRETO

3.1 -	Princípio de Funcionamento	24
3.2 -	Estrutura	24
3.3 -	Tripé com barras de reforço	25
3.3.1 -	Banca de Teste	27
3.3.2 -	Rigidez de uma coluna	27
3.3.3 -	Rigidez de duas colunas interligadas	31
3.3.4 -	Rigidez de três colunas interligadas	31

3.4 - Travessa de sustentação dos instrumentos	35
3.4.1 - Condições de teste	36
3.4.2 - Determinação Teórica das deformações " Y_i " ...	37
3.4.3 - Determinação experimental das def. " Y_i "	43
3.4.4 - Rigidez da travessa de sustentação	44
3.5 - Haste de fixação dos instrumentos	48
3.5.1 - Condições de teste	49
3.5.2 - Determinação teórica das defs. da haste	55
3.5.3 - Determinação experimental das defs. da haste.	56
3.5.4 - Rigidez da haste de fixação dos instrumentos.	57
3.6 - Aplicação do Método Indireto	57
3.6.1 - Máquinas testadas	57
3.6.2 - Condições de teste	58
3.6.3 - Deformações medidas (Y_m)	60
3.6.4 - Erro devido a deformação da haste (E_h)	62
3.6.5 - Erro da travessa de sustentação (E_t)	65
3.6.6 - Erro devido a deformação do tripé (E_e)	69
3.6.7 - Correção nas deformações medidas	71
3.6.8 - Rigidez da máquina ferramenta testada	73

CAPÍTULO IV - MÉTODO DIRETO

4.1 - Princípio de funcionamento	75
4.2 - Materiais e Métodos	77
4.2.1 - Método de Determinação do E	78
4.3 - Aplicação do Método	79
4.3.1 - Máquina testada	81
4.3.2 - Condições de teste	81
4.3.3 - Determinação das deformações - Y_m	82
4.3.4 - Determinação das defs. (E) da estrutura	82
4.3.5 - Correção das deformações medidas	84
4.3.6 - Rigidez da máquina ferramenta testada	85

CAPÍTULO V - DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

5.1 - Comparação dos métodos	87
5.2 - Conclusões	90
5.3 - Considerações sobre a estrutura de referência	91
 BIBLIOGRAFIA	 93

V O L U M E II

- Apêndice 1 - Tabelas e gráficos
- Apêndice 2 - Desenhos
- Apêndice 3 - Dinamômetro de anel para pequenas cargas
- Apêndice 4 - Força de mola dos apalpadores
- Apêndice 5 - Tamanho das amostras e Determinação do Erro Padrão
- Apêndice 6 - Programas de Computador

R E S U M O

O presente trabalho visa desenvolver um método experimental de medição da rigidez estática de máquinas-ferramentas. Apesar da análise da aplicabilidade do método de desenvolvido ter sido feita em máquinas ferramentas, seu uso pode ser estendido às máquinas de um modo geral.

A B S T R A C T

In the present work a method of measuring the static rigidity of machine tools is developed. Although the applicability of the method has been tested in machine tools, it can be used for any type of machines.

I N T R O D U Ç Ã O

O conhecimento da rigidez estática das máquinas ferramentas é de grande importância na pesquisa, projeto e construção das mesmas. Na Europa funcionam a mais de uma década, laboratórios de pesquisas em máquinas ferramentas com publicação de dezenas de trabalhos específicos de estudo da rigidez¹.

Koenisberger em seus livros de projeto de máquinas ferramentas¹, dedica capítulos especiais na análise da rigidez das mesmas.

Este trabalho visa introduzir e familiarizar no Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, métodos de medição da rigidez estática em máquinas ferramentas, tradicionalmente usados nos Institutos de pesquisa da Europa (capítulo 3). Naturalmente ao longo do desenvolvimento dos trabalhos experimentais, foram surgindo soluções que diferem dos métodos tradicionais (capítulo 4). Isto se deve principalmente às condições locais que lhes são próprias, e que exigem adaptações dos métodos que se queiram ali introduzir.

Assim sendo, a apresentação deste trabalho - considerou-se útil a curto e médio prazo ao desenvolvimento tecnológico do País, merecendo citação em revista de âmbito nacional¹⁰ e oportuno quando o atual Governo está concentrando incentivos no desenvolvimento das indústrias de máquinas que fabricam máquinas.

C A P Í T U L O I

R I G I D E Z E S T Á T I C A

1.1 - CONCEITUAÇÃO

Entende-se por rigidez estática como sendo a relação entre a carga estática aplicada num ponto de um corpo e a deformação que este sofre.

$$K = \frac{\text{carga}}{\text{deformação}} \quad (1)$$

Em função do tipo de carga distingue-se alguns tipos característicos de rigidez estática. Assim, num corpo submetido à Força de tração (fig.1), distingue-se a rigidez à tração que relaciona a força de tração F com a deformação X que o ponto de aplicação da força sofre na direção desta. A figura 2 mostra um corpo sob esforços de flexão e a relação entre a Força F e a deformação X define-se como a rigidez à flexão. Caso a força F seja estática, tem-se rigidez estática à flexão.

Em ambos os casos a rigidez é dada pela expressão:

$$K = \frac{F}{X} \quad (2)$$

As figuras 3 e 4 mostram casos de rigidez à tração e rigidez de contato, respectivamente.

Nos tipos característicos de rigidez acima mencionados, a direção das deformações coincide com a direção da força. Estes tipos característicos são denominados de "Rigidez Direta". Quando não há coincidência das direções da força e deformação, a rigidez obtida é dita "transversal", sendo necessário posicionar relativamente num sistema de coordenadas os vetores força e deformação. Na figura 5, as relações F/X' , F/Y' e F/Z' representam a rigidez transversal segundo os eixos X' , Y' e Z' , respectivamente.

Nos métodos de medição de rigidez analisados no presente trabalho, o ponto de aplicação da força não coincide com o ponto de medição da deformação correspondente, ficando, portanto, indeterminado qual o tipo de rigidez que está sendo medido. Ocorre normalmente a superposição delas.

Destacando a rigidez de um elemento de máquina isolado (por exemplo, da própria árvore de um torno, sem levar em consideração as deformações de mancais, da caixa do cabeçote, da ligação entre o cabeçote e a bancada, etc) tem-se a rigidez parcial e, no caso de considerar o conjunto como um todo, tem-se a rigidez total.

Levando em consideração as deformações relativas entre os elementos da máquina ferramenta, determina-se a rigidez-relativa. No caso de análise das deformações com relação a um sistema de coordenadas fora da máquina (por exemplo: uma estrutura fixa ao solo), tem-se a rigidez absoluta.

Os métodos analisados neste trabalho, permitem a análise da rigidez absoluta das máquinas ferramentas.

O valor recíproco da rigidez denomina-se "flexibilidade" (c), sendo então :

$$c = \frac{1}{K} \quad (3)$$

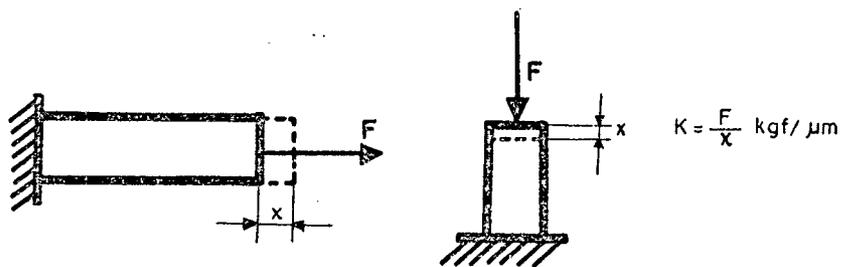


FIG. 1 — Rigidez à tração e compressão

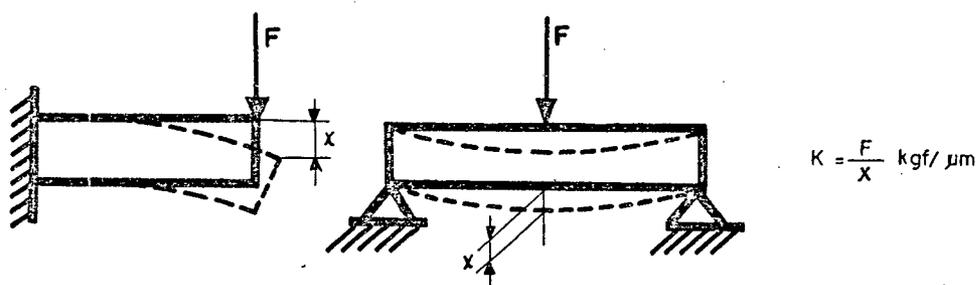


FIG. 2 — Rigidez à flexão

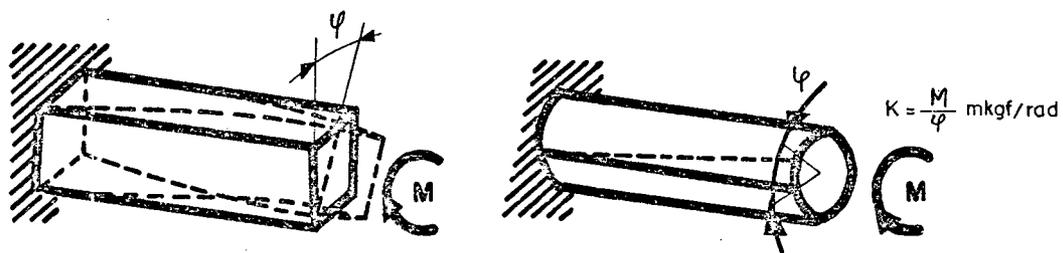


FIG. 3 — Rigidez à torção

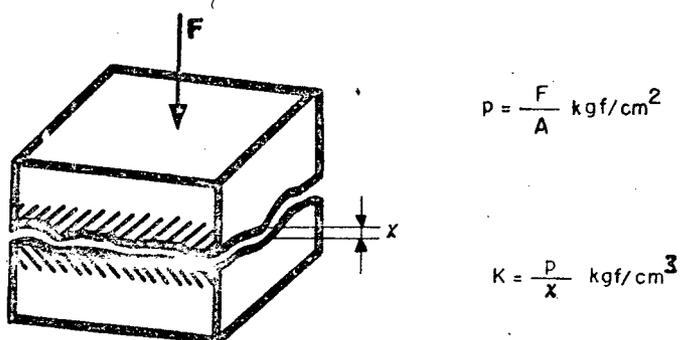


FIG. 4 — Rigidez de contato

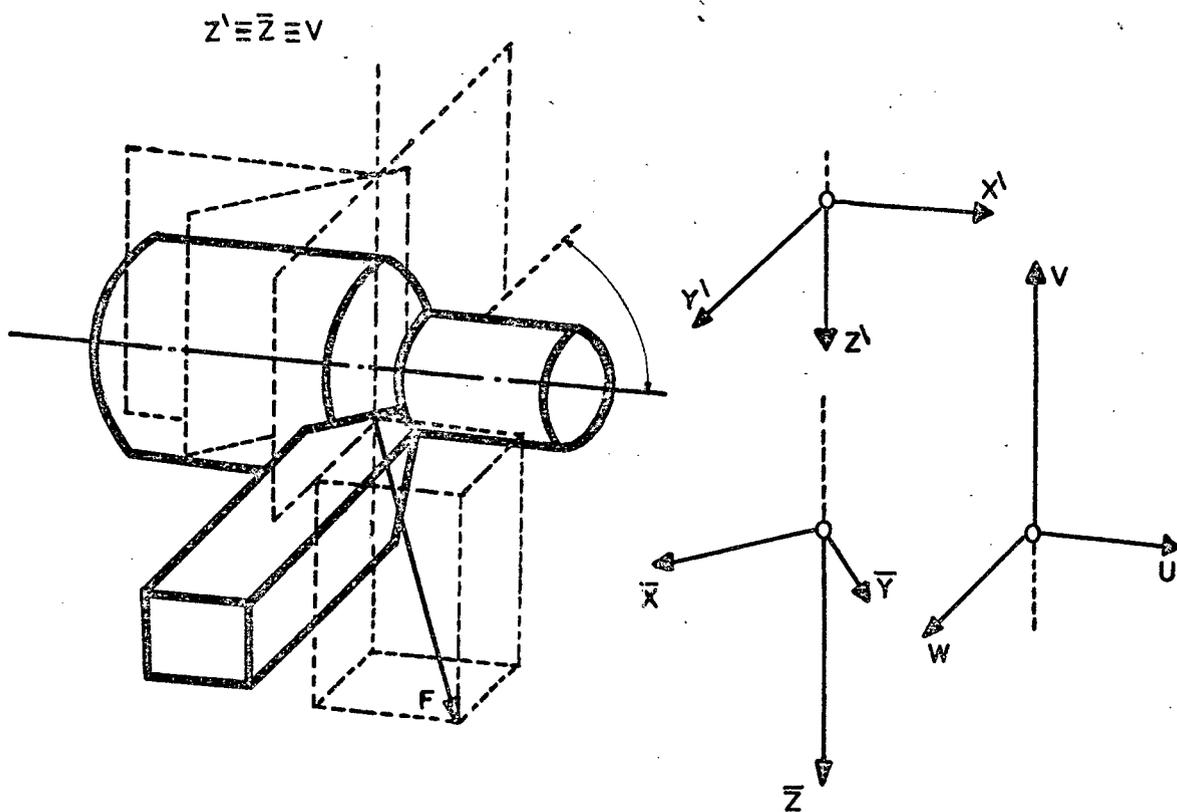


FIG.5 — Sistemas de coordenadas

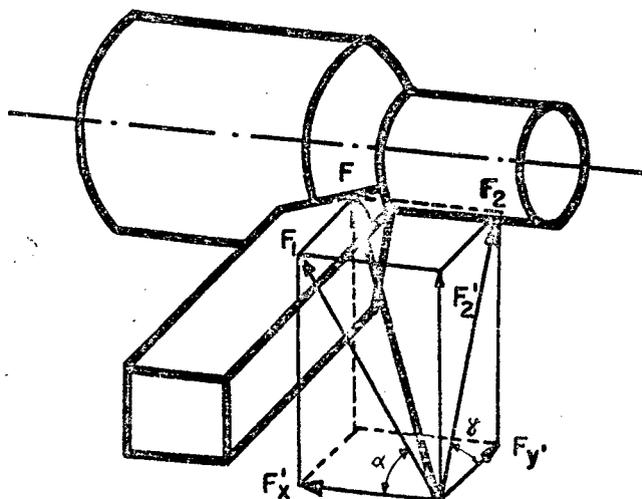


FIG.6 — Fôrça de corte e suas componentes.

1.2 - ADIÇÃO DE RIGIDEZ

Os elementos de máquina são flexíveis e, portanto podem ser idealizados como molas e a rigidez dos mesmos será equivalente ao conceito de constante de mola. Um conjunto de elementos de máquina, conseqüentemente, permite idêntico tratamento matemático⁴ dado a sistemas de mola em série ou em paralelo

Assim, para um sistema de molas em série, vale a expressão⁵:

$$K = \frac{(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \dots \cdot K_n)}{(K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \dots \cdot K_n) + (K_1 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \dots \cdot K_n) + \dots + (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_{n-1})} \quad (4)$$

onde K é a rigidez resultante e sendo c a flexibilidade resultante, pode-se escrever :

$$c = \frac{1}{K} \quad c_1 = \frac{1}{K_1} \quad \dots \quad c_n = \frac{1}{K_n} \quad (5)$$

tem-se para um sistema de molas em série, a expressão:

$$c = c_1 + c_2 + c_3 + \dots + c_n \quad (6)$$

No caso de molas em paralelo⁵, tem-se :

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n \quad (7)$$

Os dois exemplos⁴ que se seguem evidenciam bem a analogia dos elementos de máquinas com sistemas de molas em série e paralelo.

A figura 7 mostra um eixo com 3(três) rebaixos;

sendo que cada um deles tem a flexibilidade à torção c_1, c_2 e c_3 .

Carregando a parte central do eixo com um momento torçor Tq , os rebaiços sofrem diferentes distorções angulares : ψ_1, ψ_2, ψ_3 , respectivamente. Aplicando o conceito de flexibilidade para cada rebaixo, tem-se:

$$c_1 = \frac{\psi_1}{Tq} \quad c_2 = \frac{\psi_2}{Tq} \quad c_3 = \frac{\psi_3}{Tq} \quad (8)$$

considerando que a distorção total ψ é a soma :

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 \quad (9)$$

e a flexibilidade total do eixo é dado por:

$$c = \frac{\psi}{Tq} \quad (10)$$

ou substituindo (8) em (9) e por fim em (10), a flexibilidade do sistema é dada pela expressão :

$$c = c_1 + c_2 + c_3 \quad (11)$$

o que mostra que o eixo pode ser considerado como três molas em série.(Fig.8).

Na figura 9, o eixo de diâmetros diferentes está -

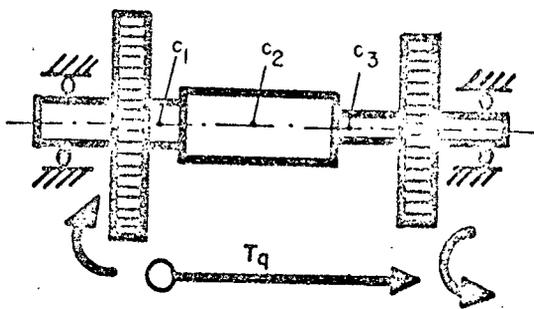


FIG. 7 — Eixo com três rebolços

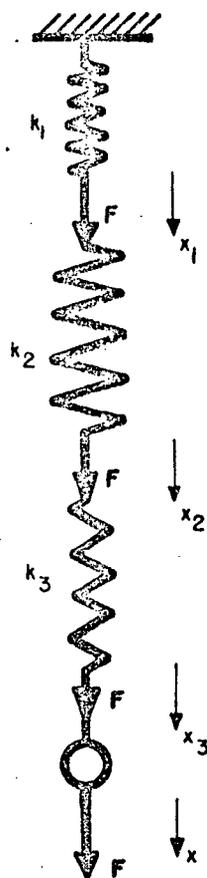


FIG. 8 — Molas em série

fixo nas extremidades e carregado na polia central por um torque T_q . A deformação angular ψ no centro é a mesma para ambos os trechos do eixo:

$$\psi = \psi_1 = \psi_2 \quad (12)$$

O Torque total é dado pela soma :

$$T_q = T_{q1} + T_{q2} \quad (13)$$

como :

$$T_{q1} = K_1 \cdot \psi \quad T_{q2} = K_2 \cdot \psi \quad \text{e} \quad T_q = K \cdot \psi \quad (14)$$

obtem-se substituindo (14) em (13) :

$$K = K_1 + K_2 \quad (15)$$

A rigidez resultante K é a soma das rigidezes parciais K_1 e K_2 , evidenciando um caso típico de molas em paralelo (fig.10).

Esta analogia, permite que seja obtida a rigidez total de uma estrutura, medindo a rigidez de cada um de seus componentes. Resta considerar as folgas das juntas de união dos elementos componentes que influem na rigidez total.

1.3 - MEDICÃO DA RIGIDEZ

Na determinação da rigidez de um corpo é

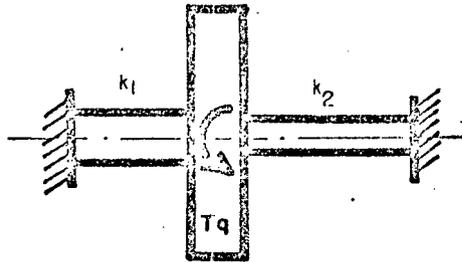


FIG. 9 — Eixo de diâmetros diferentes

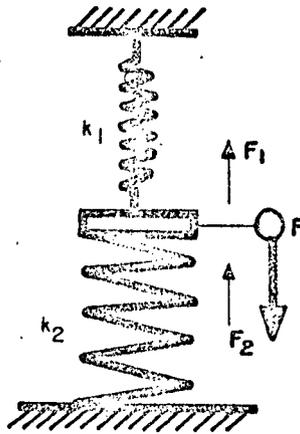


FIG. 10 — Molas em paralelo

cessário que se conheçam as forças aplicadas nele e as consequentes deformações provocadas por estas. A medição propriamente dita consiste em aplicar forças conhecidas e medir as deformações consequentes.

Nas máquinas ferramentas as deformações de sua estrutura são causadas principalmente pelas forças de usinagem, além do peso e forma da peça, posição dos conjuntos de máquina, etc. No caso de querer determinar a rigidez da máquina, é conveniente que as forças aplicadas, além de serem conhecidas, tenham uma ação semelhante às forças que ocorrem durante a usinagem, uma vez que é nestas condições que há maior interesse de se conhecer a rigidez.

1.3.1 - FORÇA APLICADA

A força pode ser aplicada através da usinagem ou através de um carregamento com carga simulada.

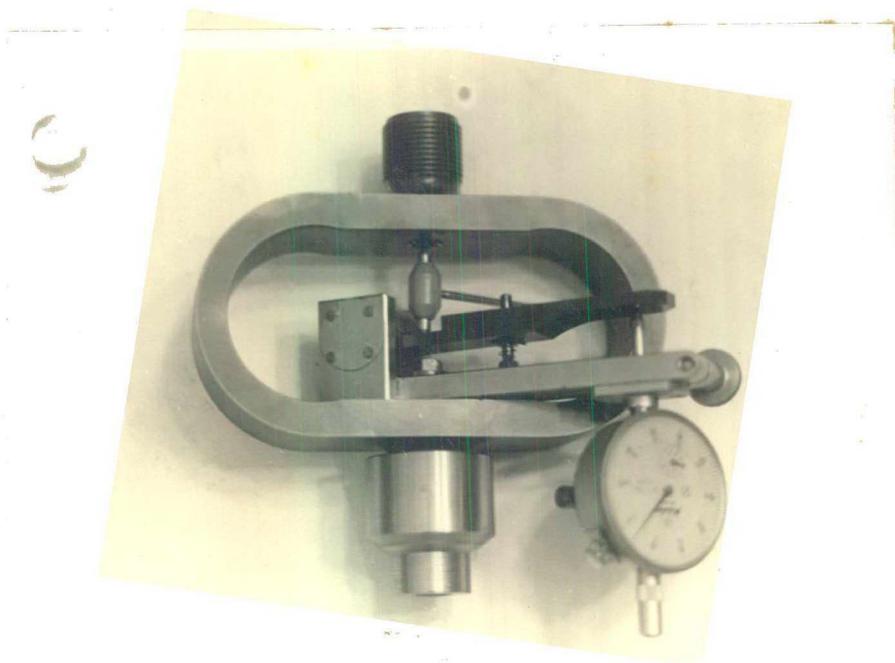
A medição da rigidez das máquinas ferramentas usando diretamente forças de usinagem, proporciona valores mais exatos. A intensidade da força é variável em função das condições de corte, podendo ser medida com auxílio de um dinamômetro, tipo portaferramenta. A rigidez estática dificilmente pode ser medida por este método, tendo em vista a característica dinâmica da força aplicada, pela dificuldade de se ter uma força constante e pela dificuldade de se medir as deformações correspondentes a cada força, sem sofisticar a aparelhagem utilizada. Isto exige grandes investimentos e pessoal especializado, impossibilitando o uso generalizado do método, na indústria.

A medição da rigidez usando carga estática - que simulem as forças de corte, consiste em aplicar forças estáti-

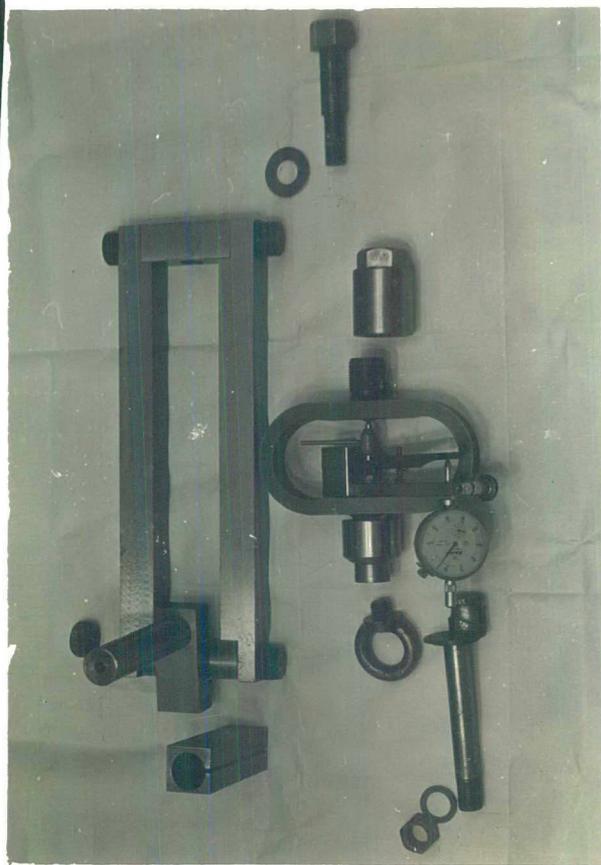
s na máquina com auxílio de um dispositivo especial, como por exemplo o das fig.12 e 13. Por este método é mais difícil obter forças semelhantes às forças que ocorrem na usinagem. Por outro lado, obtém-se mais facilmente valores qualitativos e quantitativos da rigidez para os mais variados pontos da máquina ferramenta, permitindo análises da qualidade do projeto e fabricação da mesma. Um método que nos dá valores bem definidos tendo em vista a fácil repetibilidade dos testes. O instrumental necessário é simples, de fácil manejo e de custo relativamente baixo.

1.3.2 - DEFORMAÇÕES

Quanto às deformações a serem medidas para a determinação da rigidez, são função do tipo de rigidez que se quer conhecer. Assim, para conhecer a rigidez relativa do barramento de um torno com relação à peça usinada, mede-se a variação da distância entre os mesmos devido às forças aplicadas. Enquanto que para determinar a rigidez absoluta do barramento é necessário medir a deformação que este sofre com relação a um sistema de referência independente do torno. Nas máquinas ferramentas, em condições normais de trabalho, as deformações que ocorrem são na faixa dos milésimos até os centésimos do milímetro. Isto exige um instrumental de alta sensibilidade (figs.14 a 17) e um cuidado pouco comum na realização das medições.



-FIG.11- DINAMÔMETRO DE ANEL. CAPACIDADE 3 t.



-FIG.12- DISPOSITIVO DE APLICAÇÃO DA FORÇA. VISTA EXPLODIDA.

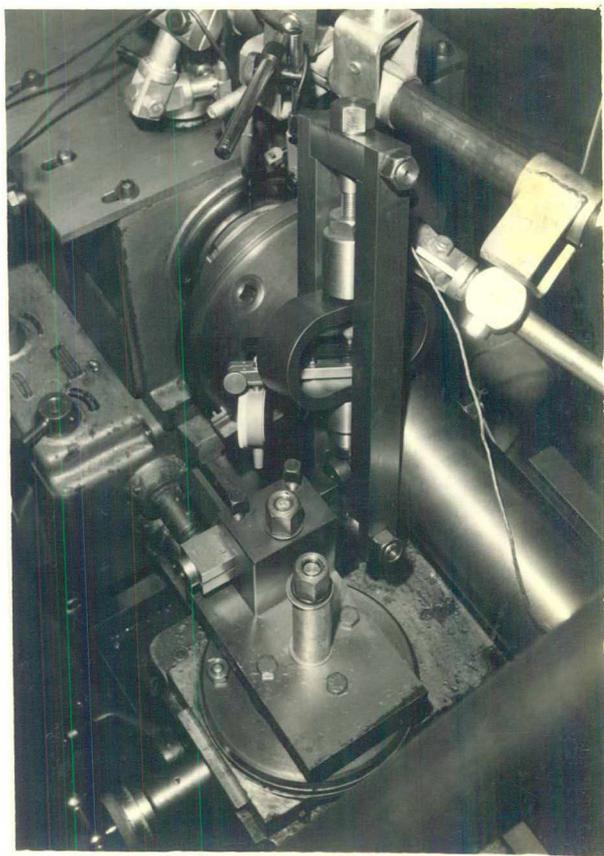


FIG.13- DISPOSITIVO DE APLICAÇÃO DA FORÇA NA POSIÇÃO DE TESTE.



FIG.14 - ESTRUTURA. VISTA GERAL.

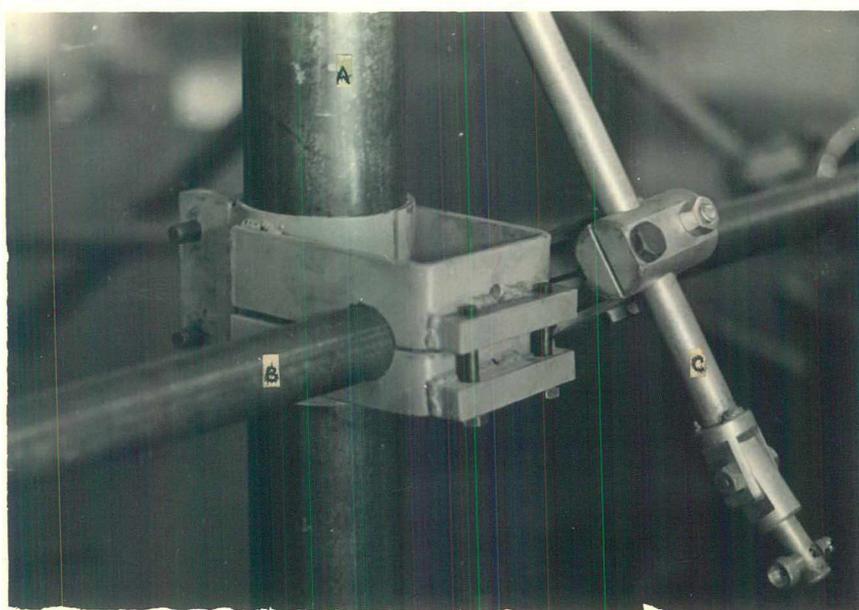


FIG.15- ESTRUTURA. DETALHE MOSTRANDO UMA DAS COLUNAS (A) DO TRI-
PÉ, A TRAVESSA DE SUSTENTALÇÃO (B) e A HASTE DE FIXAÇÃO (C) DOS
INSTRUMENTOS.

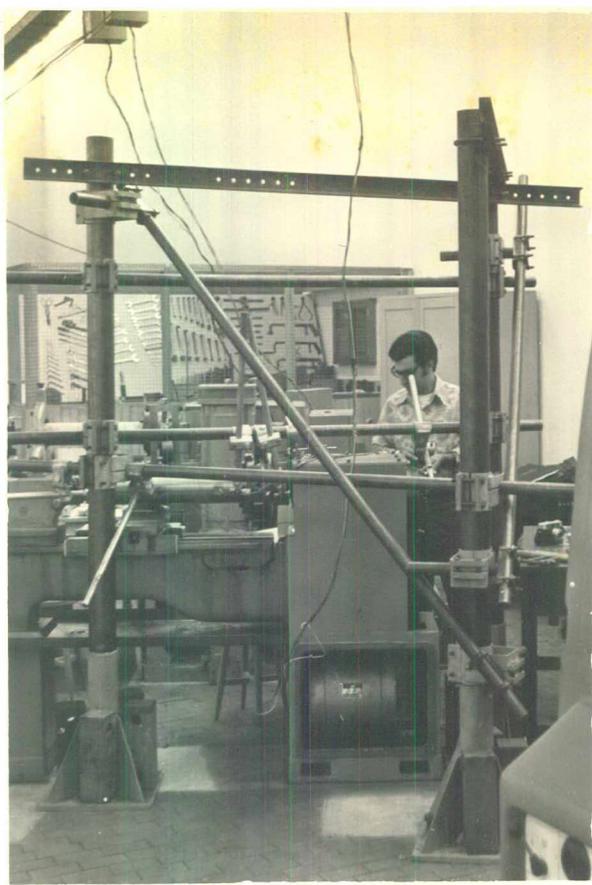


FIG. 16 - ESTRUTURA MONTADA JUNTO AO TORNO EM CONDIÇÕES DE ENSAIO



FIG. 17 - FOTO DOS APARELHOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES (ITEM 2.2.1) E DO TRAÇADOR DE GRÁFICOS (ITEM 2.3)..

C A P Í T U L O I I

MÉTODOS E MATERIAIS

O presente trabalho trata de métodos de medição da rigidez absoluta das máquinas ferramentas. Foram dois os métodos a apresentados, que diferem apenas no que diz respeito à medição das deformações. Quanto à forma de aplicar as forças, são idênticos.

Para testar a validade dos métodos e compará-los entre si, foram feitas medidas de rigidez pelos dois métodos em um torno de fabricação nacional, de marca NARDINI, modelo DN-300, sendo que as características, estão descritas no capítulo III, item 3.6.1.

2.1 - APLICAÇÃO DAS FORÇAS

Nos ensaios foram usadas forças estáticas que simulassem as forças de corte. Para isso foi construído um dispositivo (Fig.12 e 13), cujos desenhos estão no apêndice II, dotado de recursos para variar e medir a intensidade das forças aplicadas e variar a direção das mesmas. A variação da intensidade foi conseguida com a colocação do parafuso que pode ser visto no extremo superior do dispositivo (Fig.13). Este traciona o dinamômetro (Fig.11) que faz parte do dispositivo, medindo a intensidade das forças. Suas características estão descritas no item 2.1.1. O dinamômetro tem sua extremidade inferior acoplada a pe-

a através de um anel e um pino. A peça montada entre a placa e contra-ponta é de elevada rigidez à flexão (diâmetro 110 mm e comprimento 60 mm). O extremo inferior do dispositivo foi fixado no porta ferramentas do carro transversal do torno.

A intensidade de forças diversas foram medidas com auxílio de um dinamômetro de anel descrito no item 2.1.2, e apaladores TESA descritos no item 2.2.2 .

A direção das forças foram definidas pelos ângulos alfa e gama(Fig.6). Estes ângulos foram medidos com auxílio de um clinômetro ótico, gentilmente cedido pelo Centro de Tecnologia da UFSM, cujas características, estão descritas no item 2.1.3 . Na tentativa de simular a força resultante que ocorre na ferramenta em condições típicas de usinagem, a direção das forças aplicadas foram inclinadas, i.é, $\alpha = 68^{\circ}29'$ e $\gamma = 76^{\circ}49'$. Por razões construtivas a inclinação máxima obtida corresponde aos ângulos acima citados que, ainda é menor que aquelas que ocorrem com maior frequência em ferramentas de tornos. Também realizou-se ensaios com forças verticais tendo em vista a facilidade encontrada no momento e por permitir a comparação dos métodos sob diferentes condições.

O dispositivo acima descrito (Fig.13) possui algumas restrições que não invalidam o método. Assim, o desalinhamento da força aplicada na peça com a reação no porta-ferramenta provoca torções e flexões na estrutura do torno, inexistentes em funcionamento normal. O projeto de um dispositivo mais sofisticado reduziria a influência das forças distintas daquelas que simulam as forças de corte.

Por razões econômicas e tendo em vista que o objetivo do trabalho era apurar a validade dos métodos e não especificamente determinar a rigidez da máquina usada nos testes, os ensa

os foram assim mesmo realizados.

Para evitar o giro da peça, da placa e do sistema de transmissão do torno ao aplicar forças, foi usado um freio - construído no laboratório para uma pesquisa do eng^o. HÉLIO HARTSBEIN, em máquinas ferramentas⁷. Atuando dentro da caixa de transmissão, teve seus esforços absorvidos pela estrutura da caixa.

2.1.1 - DINAMÔMETRO DE ANEL WAZAU

Um dinamômetro de anel, marca WAZAU, modelo nº 70057 foi usado para medir a intensidade das forças aplicadas no torno, durante os ensaios de rigidez, através do dispositivo descrito no item 2.1. Na Figura 11 tem-se uma vista geral do dinamômetro; na Fig. 12 este aparece como um dos componentes do dispositivo de aplicação de forças, enquanto na Fig. 13 está montado na posição de teste.

Ao aplicar a força, o anel se deforma. - Estas deformações elásticas são medidas com auxílio de um comparador do tipo acionamento mecânico, marca MITUTOYO. Através de um sistema de alavanca a deformação do anel é ampliada para então ser medida pelo relógio comparador. Especificação do fabricante - determinam seu uso tanto para compressão como tração, sendo a capacidade máxima de 3.000 Kgf. A relação da força com a deformação medida no apalpador é de 0,555 kgf por micron.

$$\text{FORÇA} = 0,555 \times \text{DEFORMAÇÃO}$$

A aferição do dinamômetro e a constatação de sua linearidade foram realizadas nos laboratórios do Centro Tecnológico⁷.

2.1.2 - DINAMÔMETRO DE ANEL PARA PEQUENAS CAR - GAS

A fim de complementar a banca de testes descrita no item 3.3.1, foi necessário um dinamômetro que medisse pequenas forças (menos que 10 Kgf) com variação contínua de intensidade e com possibilidade de transferência dos valores medidos para um dos eixos do traçador de gráficos também usado naquela banca de testes. A Fig.19, mostra, em esquema, a posição do dinamômetro (elemento nº 3) no conjunto.

O tipo escolhido foi o dinamômetro de anel pela sua facilidade de fabricação. Descrição do projeto e fabricação encontra-se desenvolvido no Apêndice III, onde se anotou as características que seguem:

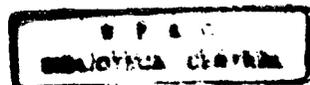
Capacidade máxima	10 Kgf
Relação força-deformação	2,22 $\mu\text{m}/100 \text{ g}$
Sensibilidade	5 gramas

2.1.3 - CLINÔMETRO AUS-JENA

Equipamento usado para as medições de ângulos, na determinação da direção das forças (item 2.1) além de auxiliar no posicionamento de todo o instrumental de precisão. Pertencente ao Centro de Tecnologia da UFSM, apresenta as seguintes características:

Tipo de leitura	Ótica
Leitura mínima de ângulo.....:	um minuto

Ajuste da superfície de nivelamento através de dois níveis de bolha de precisão dispostos perpendicularmente entre si.



2.2 - MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

Por tratar-se de análise de rigidez absoluta, as deformações foram medidas com os instrumentos apoiados sobre uma estrutura independente da máquina. Esta estrutura, cuja vista geral está na Fig.14 e sua representação geométrica na Fig.18, é uma parte integrante dos instrumentos de medição de deformações. Construída nos laboratórios do Centro Tecnológico, sua análise e determinação das características fazem parte do presente trabalho e estão descritos no Capítulo III.

2.2.1 - APARELHOS DE MEDIÇÃO TESA GN-22

Ambos são vistos na Fig.20, um em cada lado do traçador de gráficos (a esquerda na foto) fazendo parte dos equipamentos auxiliares da banca de testes da estrutura de referência. Na figura 35 (esquerda na foto) são vistos nos testes da travessa de sustentação. Foram usados ainda, nos testes de rigidez da máquina ferramenta, da haste de fixação dos instrumentos e na determinação das forças de mola dos apalpadores indutivos.

Possuem as seguintes características:

Capacidade máxima de medição :

1º - escala de medição	300 μm
2º - escala de medição	100 μm
3º - escala de medição	30 μm
4º - escala de medição	10 μm

Leitura direta visual mínima :

1º - escala	10 μm
2º - escala	5 μm

3º - escala	1 μ m
4º - escala	0,5 μ m
Tipo de leitura:.....	visual

Saída de sinal : possuem tomada do sinal análogo elétrico gerado, permitindo a transferência deste para um traçador de gráficos ou qualquer outro equipamento adequado.

2.2.2 - APALPADORES TESA

Os apalpadores são do tipo indutivo com mola mecânica para manter o encosto da ponteira. Os modelos usados foram os GT-10, GT-12 e GT-20 que possuem as seguintes características:

Força de medição (ver Apêndice IV).....	11 g/100 μ m
Repetibilidade do GT-10 e do GT-12.....	0,02 μ m
Repetibilidade do GT-20	0,01 μ m

As aferições dos apalpadores ocorreram antes de cada série de ensaios, com auxílio de lâminas calibradas.

2.2.3 - RELÓGIOS COMPARADORES

Os relógios comparadores (apalpadores mecânicos) apesar de menos sensíveis, também foram usados nos testes preliminares e como auxiliar na constatação qualitativa das deformações em pontos diversos da estrutura.

Os relógios usados foram:

MIKROKATOR 500 - A ₄ , sensibilidade	0,001 mm
MIKROKATOR 520 - A , sensibilidade	0,002 mm
RELÓGIO COMPARADOR , sensibilidade	0,01 mm

2.3 - TRAÇADOR DE GRÁFICOS (PLOTTER)

Fabricado pela Houston Instrument, Modelo -

nigraphic 2000, com duas entradas (x,y) e escala de tempo. Usado banca de testes descrita no ítem 3.3.1, possui as seguintes características :

- Precisão : 0,2 % do valor de plena escala (x,y)
 1% do valor de plena escala (tempo)
- Linearidade : 0,1 % do valor de plena escala (x,y)
 0,25% do valor de plena escala (tempo)
- Repetibilidade : 0,05 % do valor de plena escala
- Tamanho máximo do papel : 210 x 197 mm
- Fixação do papel : a vácuo

No presente trabalho usou-se apenas as escalas X e Y. A escala X usada para o registro das forças, enquanto que a escala Y para o registro das deformações correspondentes. As figuras 25, 26 e 27 mostram cópias de gráficos obtidos durante as experiências com a estrutura de referência.

C A P Í T U L O III

MÉTODO INDIRETO

3.1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O método indireto de medição da rigidez estática consiste em usar como apoio dos instrumentos de medição das deformações, uma estrutura com rigidez previamente determinada. Esta estrutura é composta de um conjunto de elementos que também teve sua rigidez previamente determinada. O conhecimento da rigidez de cada um dos componentes permite determinar a rigidez do conjunto.

O uso desta estrutura como apoio de instrumentos de medição de deformação num ensaio de rigidez estática de máquinas-ferramentas vai gerar um erro na deformação medida na máquina. Este erro é função da rigidez da estrutura, da força de mola dos apalpadores e do número de apalpadores sustentados pela estrutura. O número de apalpadores é função da quantidade de pontos de máquina que se quer medir simultaneamente as deformações. A força de mola dos apalpadores pode ser determinada experimentalmente com auxílio de uma balança de precisão (Apêndice IV). A rigidez da estrutura pode ser conhecida determinando a rigidez de cada um dos componentes, conforme descrição neste mesmo capítulo.

3.2 - ESTRUTURA

Baseado em informações bibliográficas¹ e nas condições locais foi projetada e construída uma estrutura tubular (fig. 14 a 17) . A estrutura, construída nos laboratórios do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, possui recur -

s para a fixação do instrumental necessário. Tem uma base adaptá-
 l ao piso existente no laboratório, sem danificá-lo e, custo com
 tível com os recursos disponíveis. Três são os componentes princi-
 ais da estrutura e que merecem análise para determinação de seus
 eficientes de rigidez, permitindo, conseqüentemente, conhecer a
 gidez da estrutura; são (fig.15) :

- a - tripé com barras de reforço
- b - travessa de sustentação dos instrumentos
- c - haste de fixação dos instrumentos.

Cada um destes componentes possui forma própria e
 foi avaliado teórica e experimentalmente quanto à rigidez.

3.3 - TRIPÉ COM BARRAS DE REFORÇO

Compreende três colunas de aço, forma tubular,
 diâmetro externo $D = 102$ mm e diâmetro interno $d = 93$ mm, interli-
 gadas por várias travessas convenientemente distribuídas, formando
 um conjunto espacial hiperestático (fig.14).

Este conjunto após uma série de testes preli-
 minares, adquiriu a forma definida no esquema da figura 18. Para o
 conjunto assim construído são válidos os parâmetros fixados poste-
 riormente.

Os testes que permitiram fixar a forma final-
 do tripé com barras de reforço, consistiram na análise da:

- Rigidez de uma coluna
- Rigidez de duas colunas interligadas
- Rigidez de três colunas interligadas.

Estas análises parciais permitiram a constata-
 ção dos pontos menos rígidos do conjunto e a determinação dos ar-
 ranjos estruturais que acusavam linearidade quanto a relação força
 deformação.

Para a constatação experimental da rigidez do

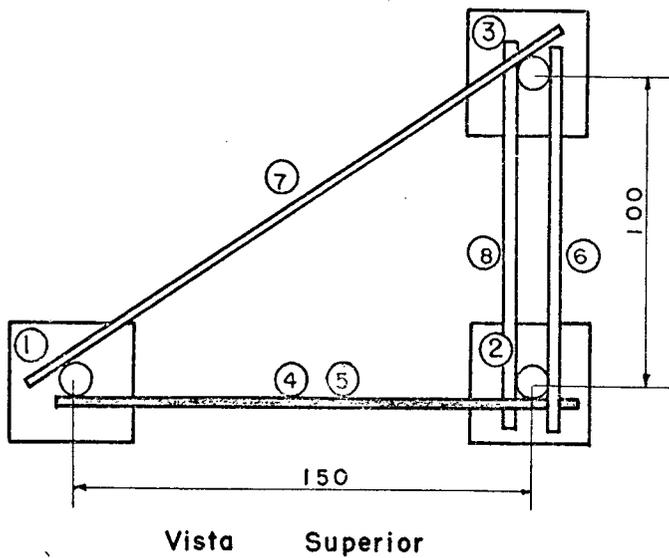
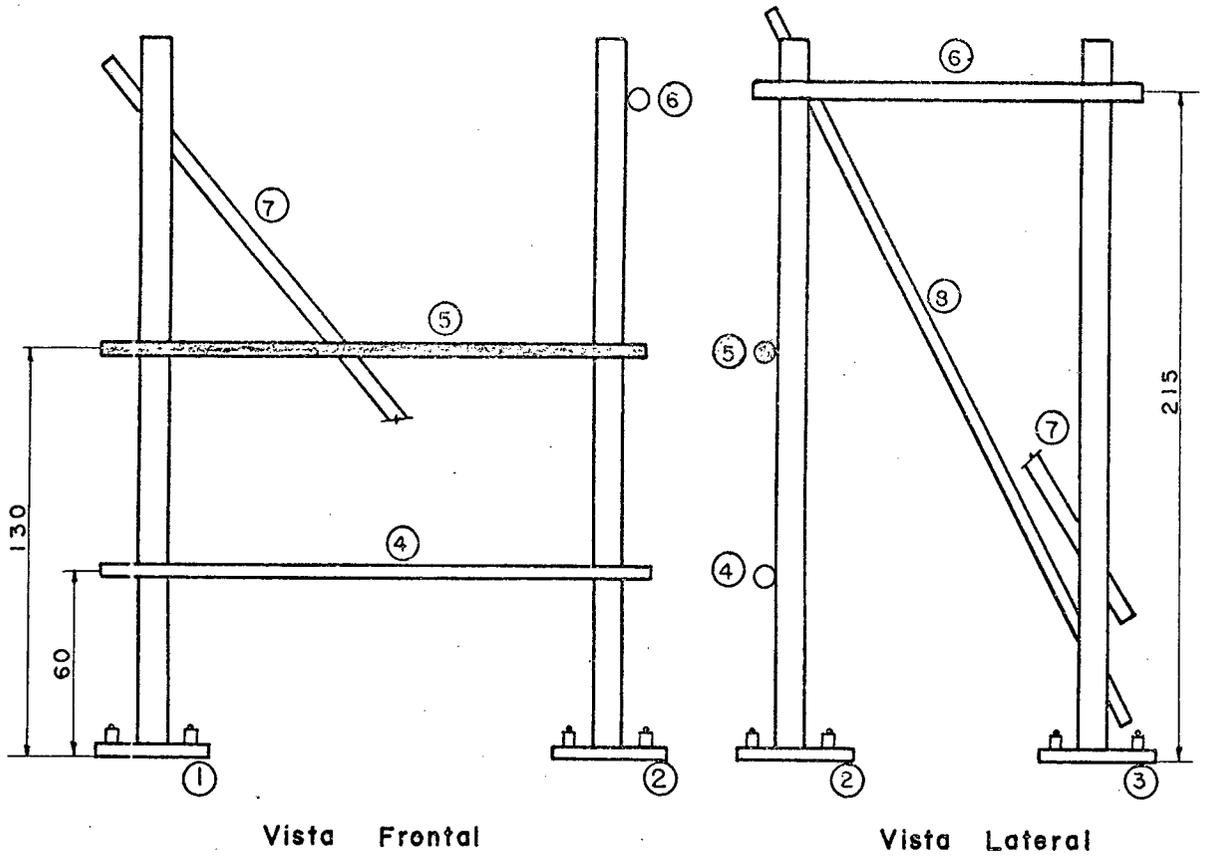


Fig. 18 - Tripé com barras de reforço em sua forma final. Cotas em "cm". Os parâmetros citados no texto referem-se a forças atuando na travessa nº 5 e normal ao plano das travessas 4 e 5.

analisar as formas geométricas mais adequadas foi especialmente construída uma banca de teste.

3.3.1 - BANCA DE TESTE

Para a execução das análises acima citadas, foi montada uma banca de testes (fig.19 e 20). O teste consistiu em aplicar força variável de zero a 4 Kg, com auxílio de um recipiente (2) alimentado de água, através de uma tubulação com registro globo (1). A intensidade da força foi registrada pelo dinamômetro (3) de anel, especialmente projetado para este fim. A descrição do projeto e fabricação deste, encontra-se descrito no Apêndice II. A direção e o ponto de aplicação da força foram obtidos com auxílio de um cordão de nylon e roldanas (4). O uso de um apalpador indutivo, marca TESA, modelo GT-10, montado no dinamômetro, permitiu transportar o valor da carga aplicada para o eixo dos "x" do traçador de gráfico (7). Simultaneamente, as deformações correspondentes, da estrutura em teste, foram medidas por outro apalpador (6) também indutivo, modelo GT-10, montado sobre um suporte considerado absolutamente rígido. A figura 20, mostra, em segundo plano, este suporte que tem como corpo principal uma das prensas existentes no laboratório do Centro Tecnológico. O sinal captado pelo apalpador, amplificado, foi ligado no eixo dos "y" do traçador de gráficos (7).

A banca assim construída permitiu registrar em gráficos a rigidez, a linearidade da relação força-deformação, forças máximas admissíveis, histerese do sistema, além de apontar imperfeições construtivas das conexões dos elementos da estrutura.

3.3.2 - RIGIDEZ DE UMA COLUNA

Procurando atender os objetivos a que se destina a estrutura, fez-se ensaios diversos com a coluna simples-

- 1 — Registro globo
- 2 — Acumulado d'água
- 3 — Dinamômetro anel
- 4 — Sistema de roldanas
- 5 — Estrutura em teste
- 6 — Medidor de deformações
- 7 — Traçador de graficos

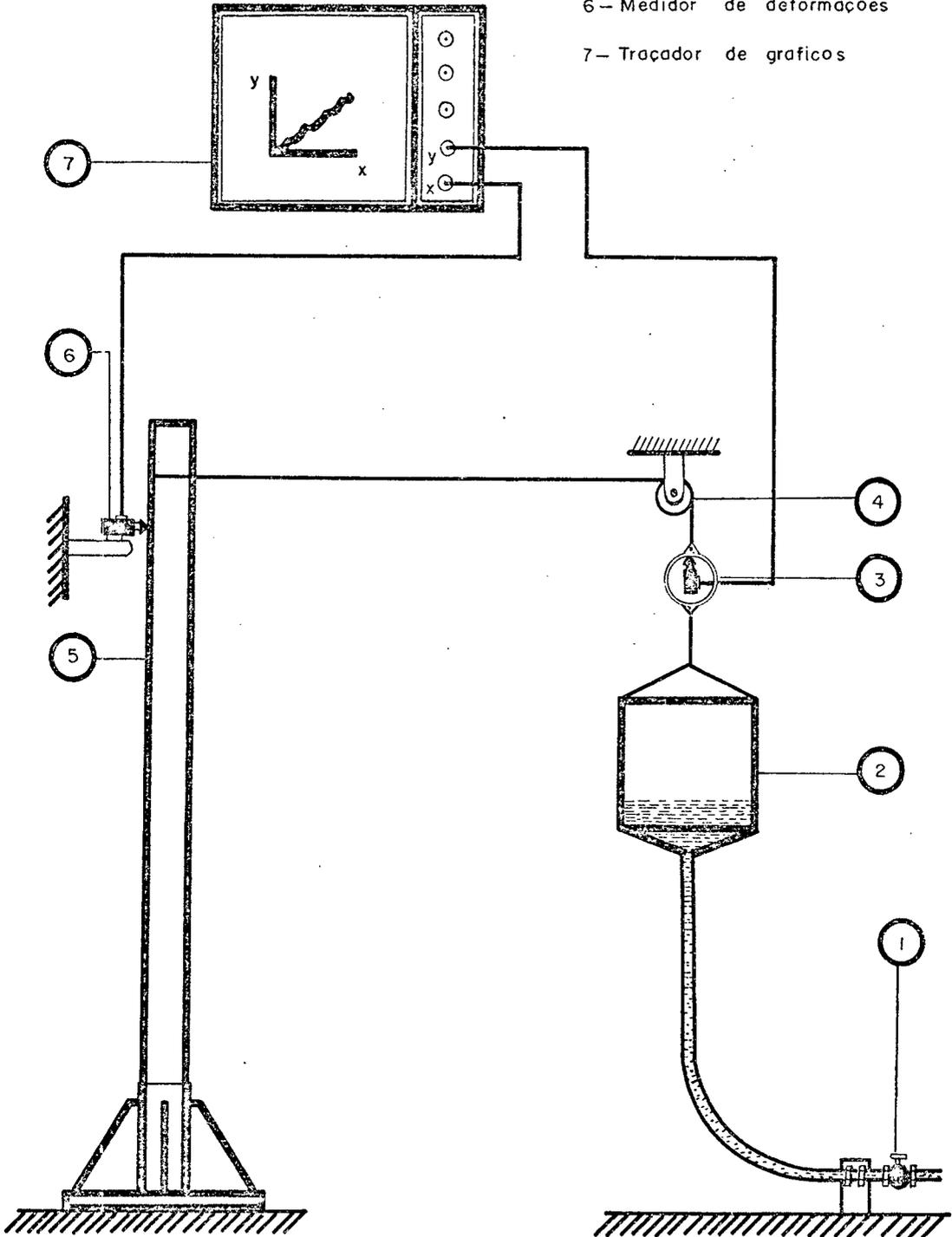


FIG. 19 — Esquema da banca de testes de deformação estática da estrutura de referência.

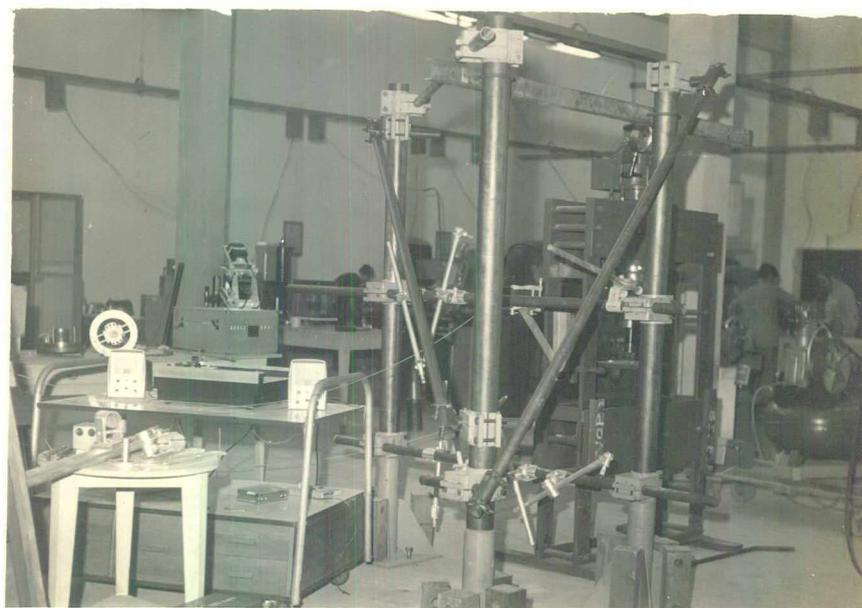


FIG.20 - VISTA PARCIAL DA BANCA DE TESTE DE RIGIDEZ
ESTÁTICA DA ESTRUTURA DE REFERÊNCIA.

ente apoiada no piso, apoiada sobre 3 pontos, com e sem contra-pe
s (fig.21 e 22), além de variar a direção da força com relação a
se.

Com auxílio da banca de testes, anteriormente descri
, foi possível registrar, qualitativa e quantitativamente, o com
rtamento estático de cada uma das disposições pretendidas. A Fig.
5 mostra o gráfico obtido no traçador de gráfico para uma coluna-
poiada em três pontos com massas na base. A flexibilidade obtida-
a micron por 100 gramas é de :

$$C_{\text{exp}} = 5,5 \mu\text{m}/100\text{g} \quad (16)$$

quanto que considerando a coluna com uma viga engastada (Fig.23)
eterminou-se teoricamente⁶ a flexibilidade da coluna, pela expres
são:

$$C = \frac{y}{P} = \frac{1}{EI} \left[\frac{a^2}{2} \left(x - \frac{a}{3} \right) - \frac{(x-a)^3}{6} \right] \quad (17)$$

onde: $a = 180 \text{ cm}$ e $x = 167 \text{ cm}$ (Fig.24)

$E = 2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ (Módulo de Elasticidade)

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} (10,2^4 - 9,3^4) = 164 \text{ cm}^4 \text{ (Momento de Inércia).}$$

que substituídos na expressão 17, obteve-se :

$$C_{\text{teor}} = 5,1 \mu\text{m}/100\text{g} \quad (18)$$

Comparando as expressões (16) e (18) tem-se :

$$\frac{C_{\text{exp}} - C_{\text{teor}}}{C_{\text{teor}}} = \frac{5,5 - 5,1}{5,1} = 0,08$$

sendo-se observar que a flexibilidade da coluna medida experimentalmente é 8 % maior que aquela calculada teoricamente considerando a coluna sujeita a um engaste perfeito. Valor considerado aceitável qualitativa e quantitativamente.

3.3.3 - RIGIDEZ DE DUAS COLUNAS INTERLIGADAS

Os ensaios realizados mostram que para forças atuando na direção perpendicular ao plano formado pelas colunas, a conexão da segunda coluna não aumenta a rigidez da primeira (Fig. 6). A posição da transversal que serviria de suporte para os instrumentos também não influi na rigidez do sistema para forças do tipo acima descrito.

Para pequenas cargas, até 5 Kgf, o gráfico obtido da estrutura de duas colunas (Fig.26) é praticamente igual àquela da Fig.25, para uma coluna. Na Fig.26 observa-se marcações de carregamentos com pesos conhecidos e o registro de suas correspondentes deformações. Esta técnica permitiu, a todo momento, a comprovação da relação força-deformação obtido por carregamento contínuo.

3.3.4 - RIGIDEZ DE TRÊS COLUNAS INTERLIGADAS

Entre as diversas configurações testadas, a disposição esquematizada na Fig.18 atende as finalidades funcionais pretendidas e possui boas características de rigidez. O gráfico da Fig.27 mostra a elevada rigidez apresentada nas condições mais desfavoráveis entre as previstas nos ensaios, i.é, força atuando perpendicular aos eixos das colunas e aplicada num ponto distante de



FIG.21— Coluna simplesmente apoiada com pesos na base.



FIG.22— Coluna simplesmente apoiada sobre três pontos.

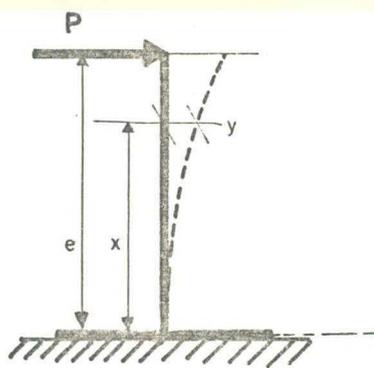


FIG.23— Coluna considerada teoricamente como uma viga engastada.

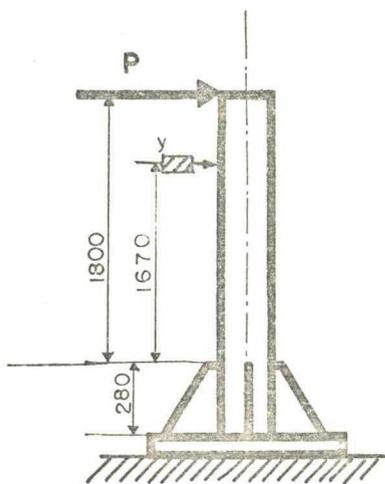


FIG.24— Condições em que foram realizados os testes de rigidez das colunas.

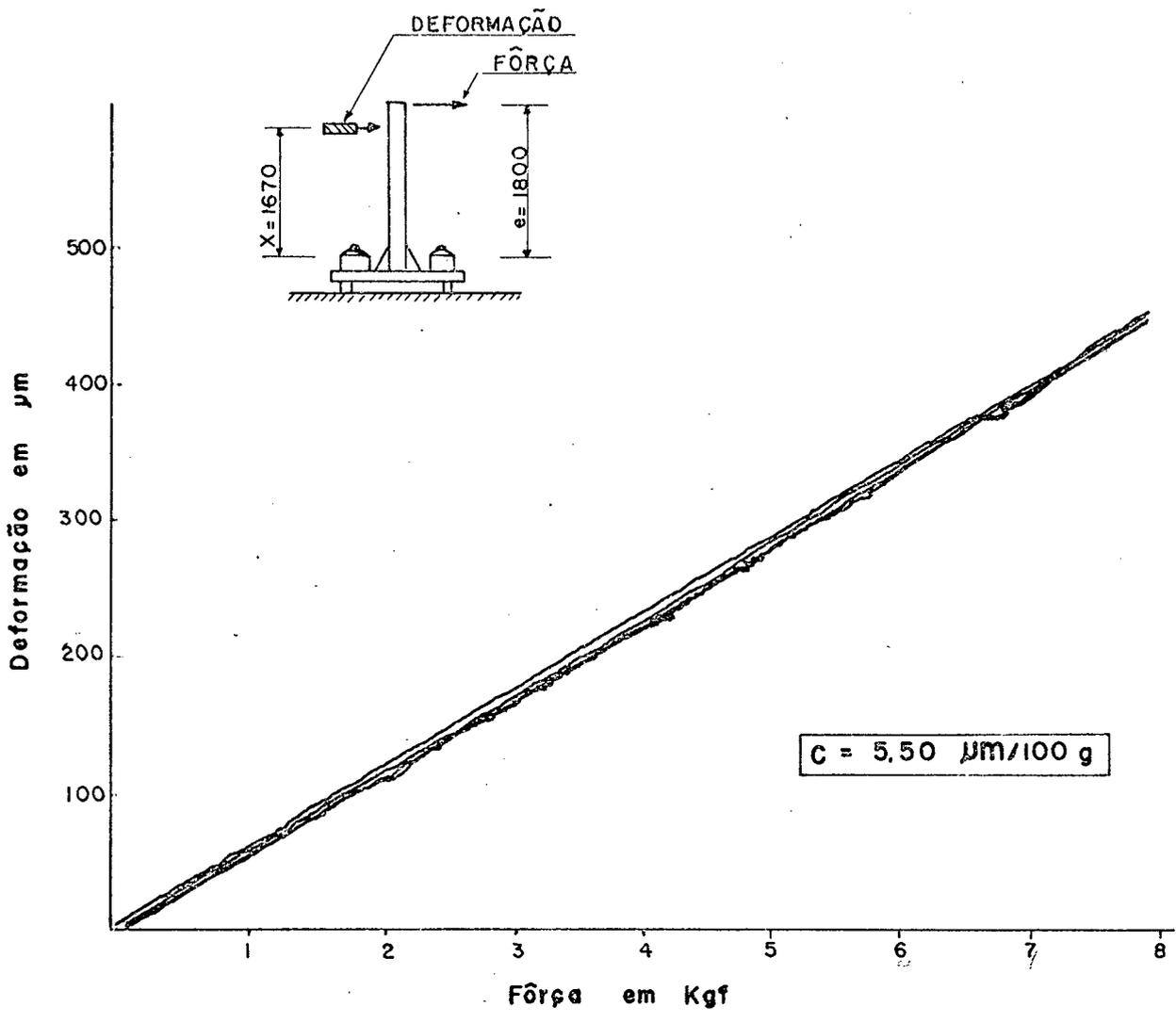


Fig. 25 — Rigidez de uma coluna simplesmente apoiada com massas na base. Escalas: eixo das deformações 1,9 mm: 10 μm ; eixo das forças 1,9 mm: 1 Kg. Flexibilidade: 5,50 $\mu\text{m}/100 \text{ g}$.

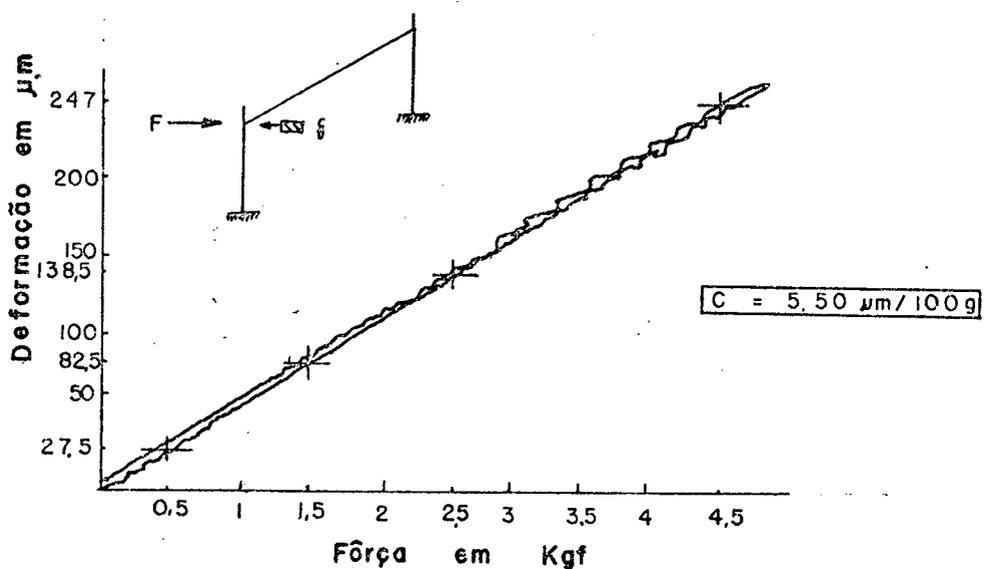


Fig. 26 - Rigidez de duas colunas interligadas, simplesmente apoiada com massas nas bases e força atuando numa delas perpendicular ao plano por elas formado.

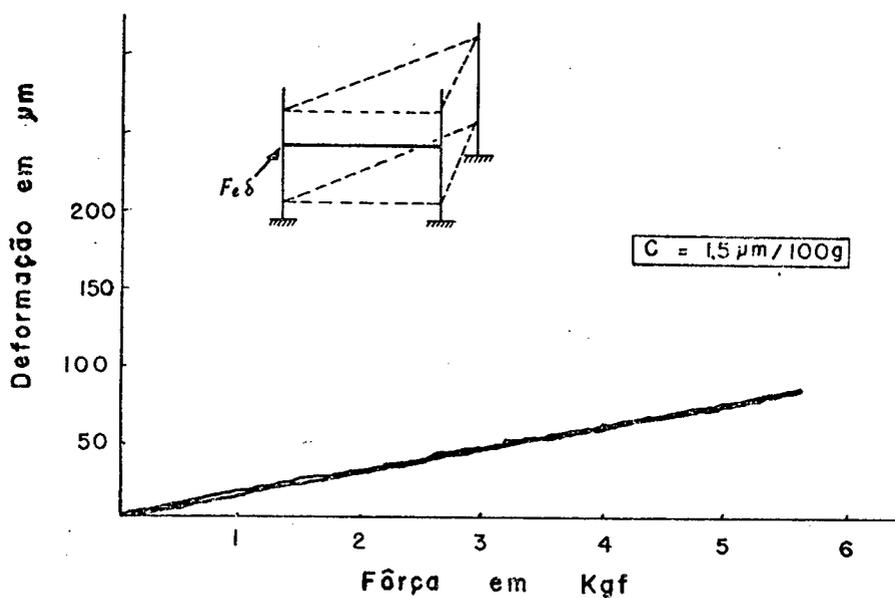


Fig. 27 - Rigidez da estrutura formada por três colunas interligadas com travessas de reforço, conforme esquema da fig. 18. Escalas: Eixo das deformações - $2\text{mm} = 10\mu\text{m}$; Eixo das forças - $16\text{mm} = 1\text{Kgf}$; Flexibilidade = $1,5\mu\text{m}/100\text{g}$.

0 cm da base. Observa-se ainda o comportamento linear da relação força-deformação. As deformações foram medidas no ponto de aplicação da força, tanto na coluna 1, como na coluna 2(Fig.18).

As forças verticais não foram consideradas tendo em vista a pouca intensidade destas, menor que 100 gramas por apalpar (ver Apêndice IV), e a elevada resistência das colunas para carregamentos axiais de compressão.

Nas condições acima descritas obteve-se experimentalmente para o tripé, um coeficiente de flexibilidade de :

$$c = 1,5 \mu\text{m} / 100 \text{ g} \quad (19)$$

A foto da Fig.14 mostra uma vista geral da estrutura, destacando as três colunas interligadas.

3.4 - TRAVESSA DE SUSTENTAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Consiste num tubo de aço sem costura de diâmetro externo 46 mm e espessura de parede de 2,5 mm, fixo em duas colunas da estrutura por junções especiais(Fig.28).

A travessa em sua posição de trabalho funciona como uma viga engastada nos extremos, sob ação de várias cargas (mastes de fixação) concentradas em pontos diversos, ao longo do seu eixo (Fig.29).

Por ser um sistema que em cada ensaio vai receber cargas distintas, aplicadas em pontos distintos, não se fixou um coeficiente de flexibilidade para a travessa, mas um método rápido de determinar as deformações nos pontos desejados.

No caso do tripé foi possível definir uma forma geométrica padrão e fixar uma altura (130 cm) para aplicar as forças, a função da posição da travessa de sustentação. Dentro destas limitações é que se fixou o coeficiente de flexibilidade do tripé. - No caso da travessa de sustentação não é recomendável fazer muitas restrições sob pena de perder a versatilidade do conjunto, indispensável na realização da análise da rigidez de uma máquina.

Conhecido o modelo matemático, as deformações que ocorrem em cada ponto da travessa, podem ser determinadas teoricamente pelo método dos "coeficientes de influência"⁸. Considerando que o engaste pode não ser perfeito e que o comportamento estrutural do material de que é feito o tubo é indeterminado, necessário foi carregar a travessa com cargas conhecidas, em pontos definidos, anotar as deformações e compará-las com as obtidas teoricamente. Esta comparação permite estabelecer parâmetros para determinar as deformações efetivas da travessa uma vez conhecidos as deformações teóricas.

3.4.1 - CONDIÇÕES DE TESTE

A travessa de sustentação dos instrumentos foi montada sobre uma base considerada rígida para as forças, às quais seria submetida (Fig.32). A base de apoio para o teste consistiu no barramento da fresa marca MECKERT modelo FSS 400-VI de propriedade do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. As forças máximas usadas no teste foram de 4 kgf (fig.33). A figura 30 mostra a posição dos carregamentos feitos no teste de rigidez.

Pela teoria dos coeficientes de influência, as deformações (y_i) da travessa nos pontos de aplicação das forças

de ser determinada pela expressão (fig.31) :

$$y_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \cdot P_j \quad (20)$$

onde: $i = 1, 2, 3, 4$ - pontos onde se quer conhecer as deformações.

$j = 1, 2, 3, 4$ - contador das cargas que compõem o carregamento.

α_{ij} = deformações no ponto "i", na direção P_i , devido à carga unitária P_j , aplicada no ponto "j" - Coeficiente de influência.

A determinação das deformações " y_i " em função dos coeficientes foi feita teórica e experimentalmente.

3.4.2 - DETERMINAÇÃO TEÓRICA DAS DEFORMAÇÕES " y_i "

Considerando que a travessa como uma viga engastada nos extremos, pode-se determinar os coeficientes α_{ij} pelo formulário de resistência dos materiais^(2,3) que particularizado ao caso específico assume a forma:

$$\alpha_{ij} = \frac{P}{EI} \left[\frac{(L-a)^2 \cdot (2a+L)}{L^3} \cdot \frac{x^3}{6} - \frac{a(L-a)^2}{L^2} \cdot \frac{x^2}{2} \right] \quad (21)$$

para $x = a$, e

$$\alpha_{ij} = \frac{P}{EI} \left[\frac{(L-a)^2 \cdot (2a+L) - L^3}{L^3} \cdot \frac{x^3}{6} - \frac{(L-a)^2 - L^2}{L^2} \cdot \frac{ax^2}{2} - \frac{a^2 x}{2} - \frac{a^3}{6} \right] \quad (22)$$

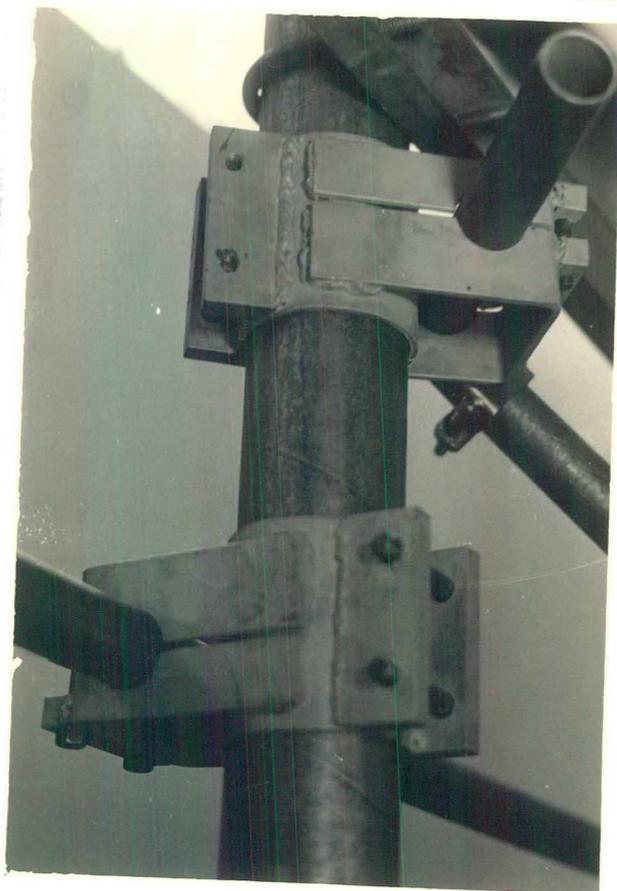


FIG. 28 — Junção das travessas de sustentação com as colunas.

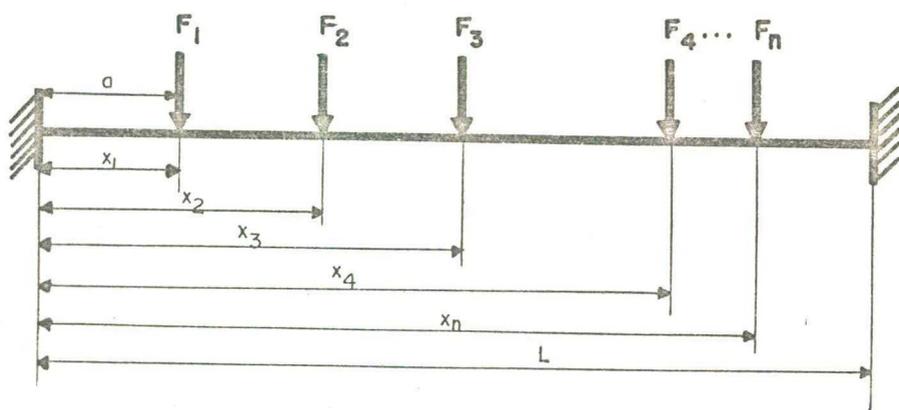


FIG. 29 — Modelo matemático da travessa de sustentação.

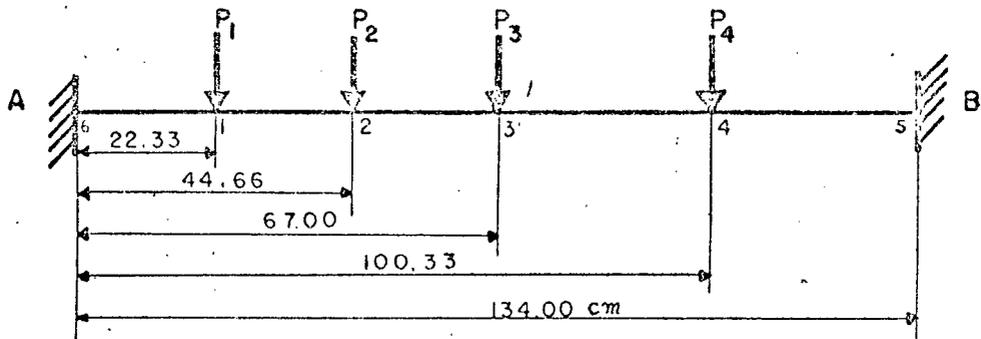


FIG. 30 — Posição das 4 forças iguais (4 kgf) usados no teste de rigidez da travessa de sustentação dos instrumentos.

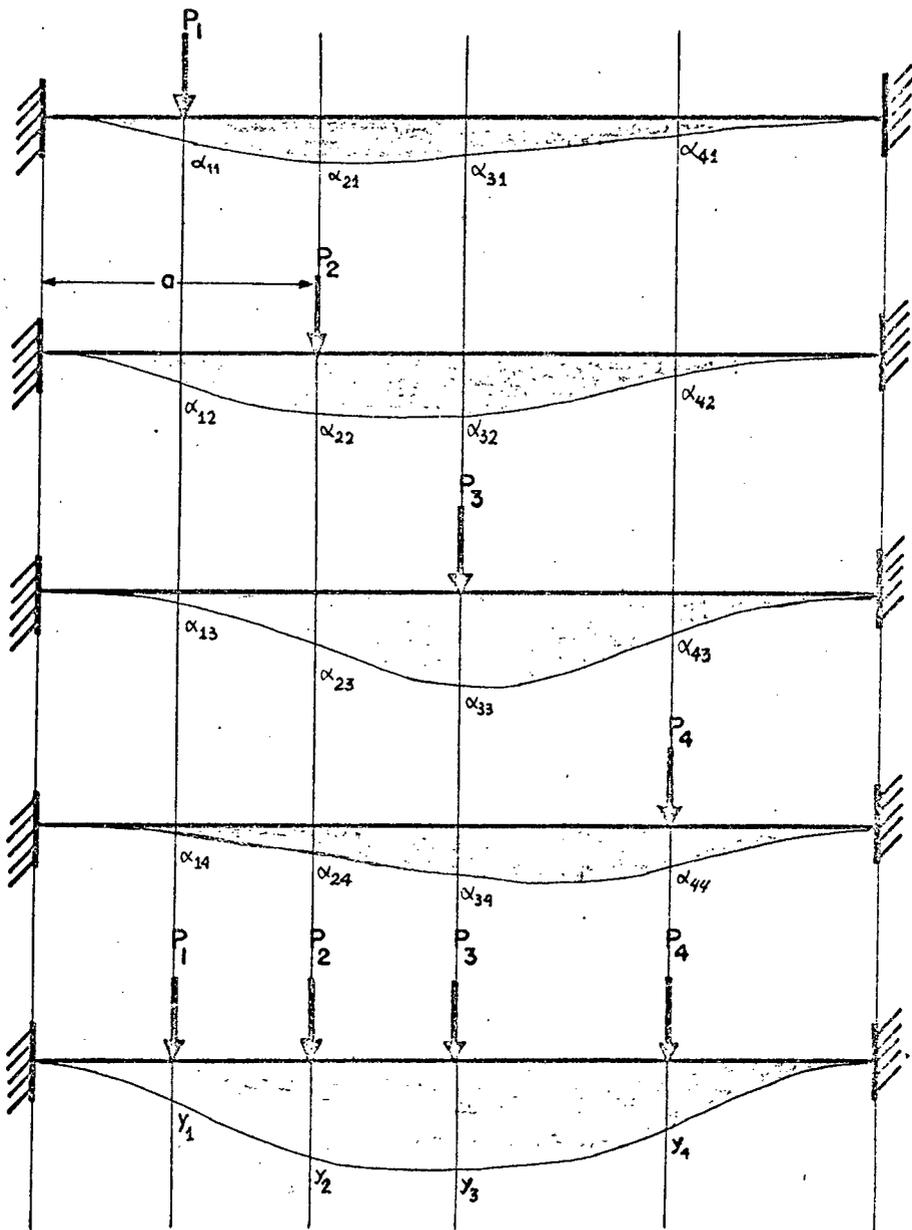


FIG. 31 — Decomposição do carregamento para aplicação do método dos coeficientes de influência.

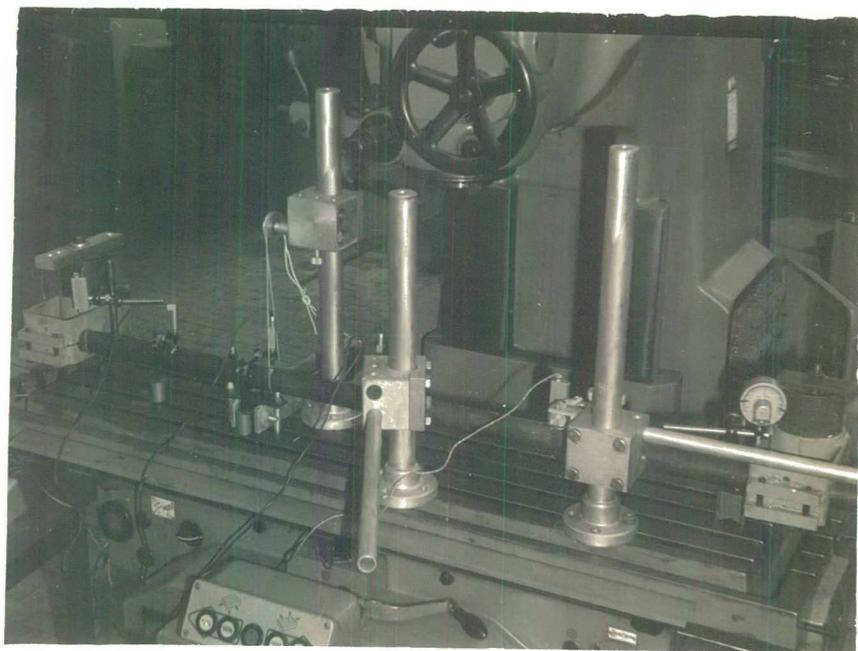


FIG.32 - TRAVESSA DE SUSTENTAÇÃO DOS INSTRUMENTOS SUBMETIDA A ENSAIOS DE RIGIDEZ ESTÁTICA.

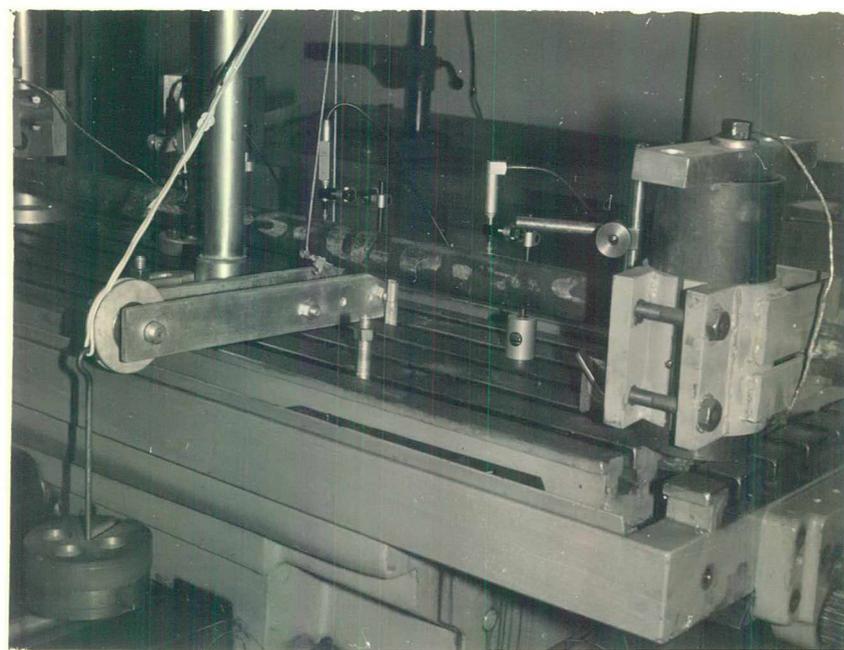


FIG.33 - DETALHE DO SISTEMA DO CARREGAMENTO DA TRAVESSA NOS ENSAIOS DE RIGIDEZ.

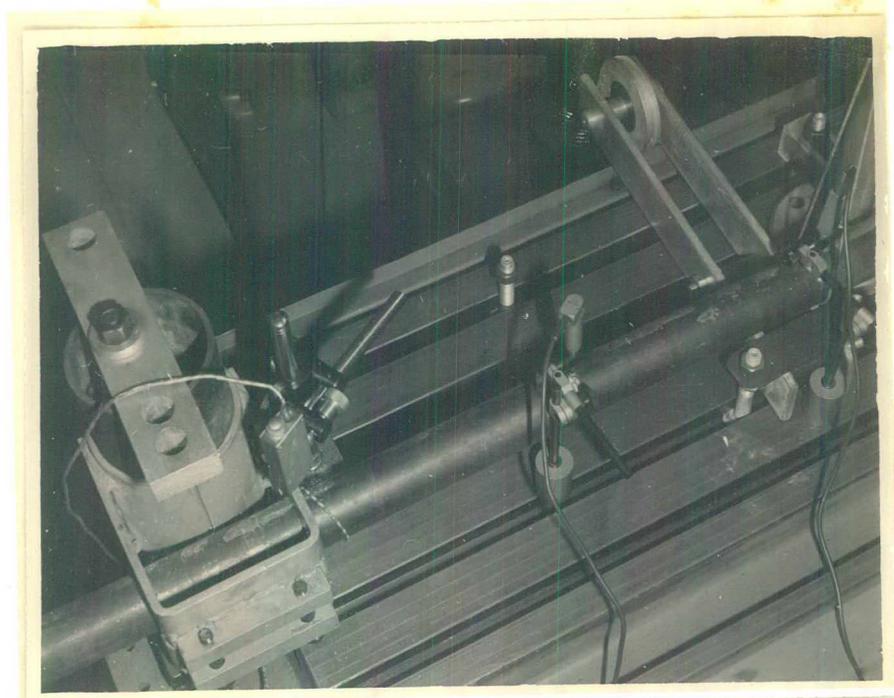


FIG. 34 - DETALHE DA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DA TRAVESSA DURANTE OS ENSAIOS DE RIGIDEZ.



FIG. 35 - VISTA PARCIAL DO INSTRUMENTAL USADO NOS TESTES DA TRAVESSA DE SUSTENTAÇÃO.

CARREGAMENTO		DEFORMAÇÃO EM μm DOS PONTOS					
PONTO PLICAÇÃO	INTENSI- DADE	6	1	2	3	4	5
1	4 kgf	0,00	6,06	10,08	9,16	3,60	0,00
2	4 kgf	0,00	10,08	24,77	26,14	11,10	0,00
3	4 kgf	0,00	9,16	26,14	35,35	17,67	0,00
4	4 kgf	0,00	3,60	11,11	17,68	14,91	0,00
CARREGAMENTO SIMULTÂNEO		0,00	28,90	72,10	88,33	47,30	0,00

FIG.36 - QUADRO DOS RESULTADOS TEÓRICOS DO CÁLCULO DAS DEFORMAÇÕES DA TRAVESSA NOS PONTOS CORRESPONDENTES A FIGURA 30.

ra $x > a$, onde "x" posiciona o ponto onde se quer conhecer as deformações; a' posiciona o ponto de aplicação da carga P, enquanto que L' é o comprimento total da viga. O módulo de elasticidade (E) da travessa é $2,1 \times 10^6$ kgf/cm² e o momento de inércia (I) - foi calculado em $6,75$ cm⁴.

Fixando uma carga de 1 kgf, i.é, $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 1$ kgf definido os pontos de aplicação da mesma (Fig.30) foi possível - determinar α_{ij} pelas expressões 21 e 22. Conhecidos estes coeficientes calculou-se as deformações devido ao carregamento total pela expressão 20, onde $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 4$ kgf. Estas etapas foram realizadas com auxílio do computador, cujo programa está no Apêndice I e os resultados estão resumidos no quadro da Fig.36, e representados em gráfico na Fig.38.

O quadro apresenta também as deformações teóricas, considerando a viga simplesmente apoiada.

3.4.3 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS DEFORMAÇÕES

"y_i"

Montada a travessa (Fig.32), segundo o esquema da figura 29, fez-se a sequência de testes com cargas concentradas e individualmente (Fig.33). Os resultados dos testes - estão tabelados no quadro da Fig.37 e representados graficamente - na Fig.38.

Nos pontos 5 e 6 (extremos) da travessa - foram registrados, com auxílio de apalpadores (Fig.34) pequenas - deformações angulares e deslocamento dos engastes. Isto tornou - possível corrigir os valores observados para os coeficientes de

fluência (α_{ij}). A Fig. 39 mostra a determinação gráfica dos erros dos coeficientes α_{ij} . O quadro da Fig.37 apresenta os valores de α_{ij} corrigidos.

3.4.4 - RIGIDEZ DA TRAVESSA DE SUSTENTAÇÃO

Analisando os resultados obtidos de forma experimental e comparando com os resultados teóricos calculados, (Fig.38) conclui-se que os engastes não podem ser considerados como perfeitos.

Através da análise dos resultados obtidos pode-se afirmar que nos carregamentos isolados (apenas um apalpador) as deformações experimentais são em média 50% maiores que as deformações teóricas do modelo engastado (quadro da Fig.37). Nas medições de rigidez das máquinas usam-se normalmente vários apalpadores sustentados numa mesma travessa de sustentação (carregamento simultâneo) e que para esta forma de carregamento obtém-se do mesmo quadro da Fig.37 valores das deformações experimentais, também em média 50% maiores que os teóricos.

As afirmações acima permitem concluir que as deformações que ocorrem normalmente na travessa estão em torno de 1,5 vezes maiores que as calculadas teoricamente considerando a travessa como uma viga engastada nos extremos sujeita a cargas concentradas (apalpadores).

$$y_{\text{exp}} = 1,5 \cdot y_{\text{teor}} \quad (23)$$

Efetivamente o uso generalizado do fator médio - 1,5 da margem a erros, conforme pode-se verificar nas planilhas da figura 44 . As planilhas apresentam o cálculo dos desvios padrões-

CARGA DE 4 Kg		DEFORMAÇÃO DA TRAVESSA (EM MICRONS) NOS PONTOS...					
		6	1	2	3	4	5
APLICADA NO PTO 1	OBSERVADA	1.27	7.50	17.37	17.30	10.75	0.50
	CORRIGIDA (REAL)	0.00	6.40	16.37	16.53	10.05	0.00
	TEORICA	0.00	6.06	10.08	9.16	3.60	0.00
	REAL/TEORICA	-	1.06	1.62	1.80	2.79	-
APLICADA NO PTO 2	OBSERVADA	1.50	15.25	35.33	41.43	28.00	3.00
	CORRIGIDA (REAL)	0.00	13.50	33.33	39.18	25.40	0.00
	TEORICA	0.00	10.08	24.77	26.14	11.10	0.00
	REAL/TEORICA	-	1.34	1.34	1.50	2.28	-
APLICADA NO PTO 3	OBSERVADA	2.07	14.90	41.35	55.42	31.68	5.30
	CORRIGIDA	0.00	12.30	38.25	51.77	27.18	0.00
	TEORICA	0.00	9.16	26.14	35.35	17.67	0.00
	REAL/TEORICA	-	1.34	1.46	1.46	1.53	-
APLICADA NO PTO 4	OBSERVADA	1.15	10.20	29.82	45.22	40.25	10.6
	CORRIGIDA	0.00	7.50	25.52	40.42	32.00	0.00
	TEORICA	0.00	3.60	11.11	17.68	14.91	0.00
	REAL/TEORICA	-	2.08	2.29	2.29	2.15	-
CARGA MENOR MILIMETRO	Y_1 (REAL)	0.00	39.70	113.80	145.12	65.15	0.00
	Y_1 (TEORICO)	0.00	28.90	72.10	88.33	47.30	0.00

FIG. 37 - Quadro das deformações teórica e experimental da travessa, sob o carregamento da fig. 30.

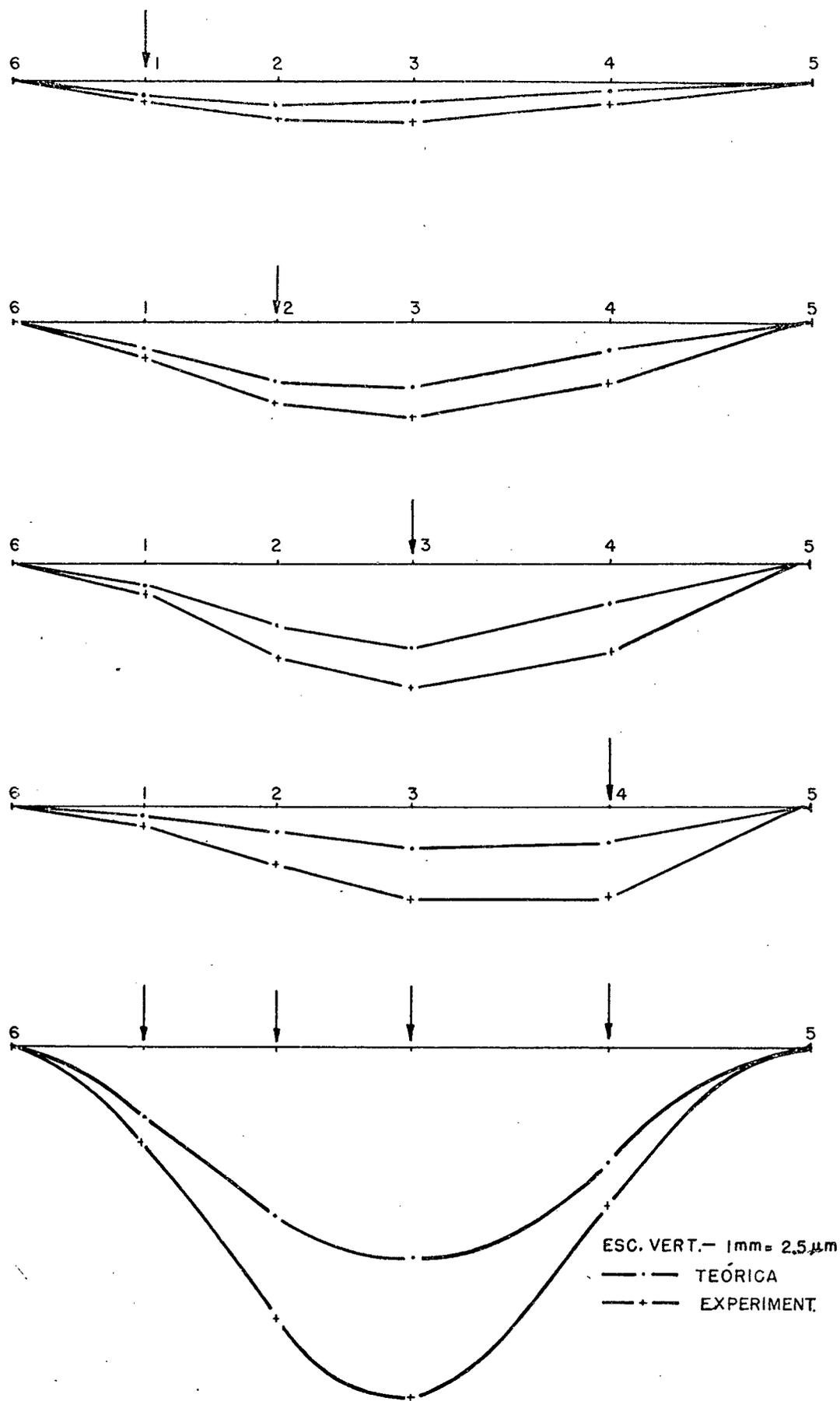


Fig. 38 - Gráficos representativos das deformações da travessa para cargas concentradas de 4 Kgf.

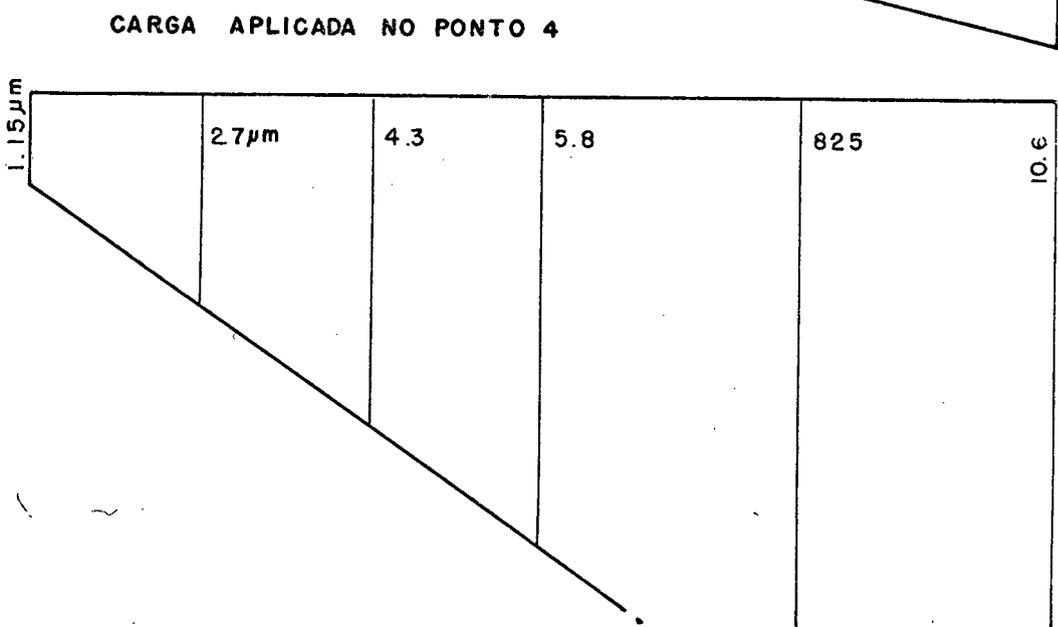
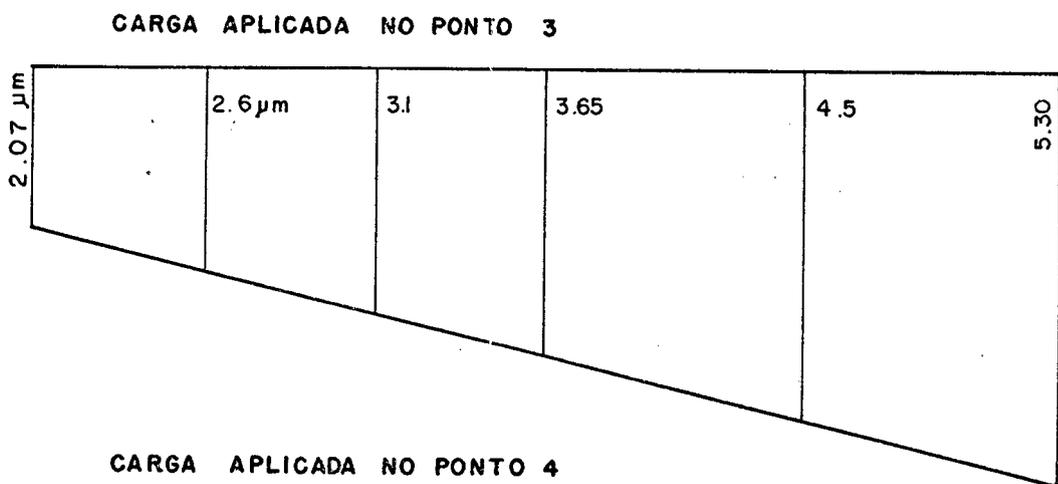
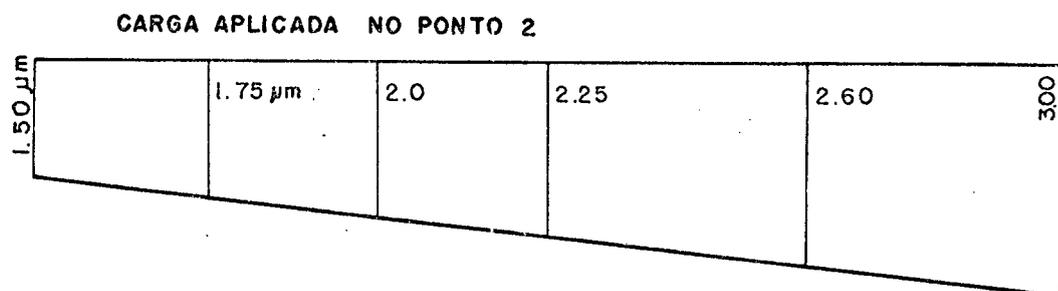
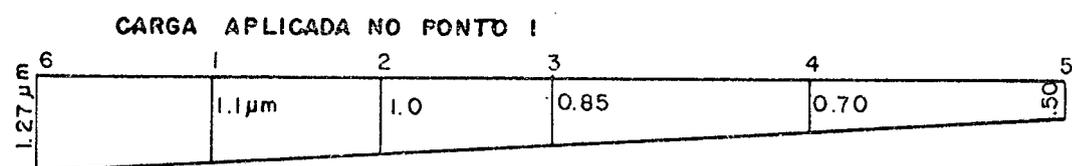


Fig. 39 - Ensaio da travessa. Correção das deformações devido ao deslocamento irregular dos engastes

para o caso de carregamentos isolados e para o caso de carregamentos simultâneos (vários apalpadores atuando simultaneamente). O formulário de cálculo está descrito no Apêndice V. Como os tamanhos das amostras são pequenos, admitiu-se a distribuição de Student¹² - para 95% de confiança e $n-1 = 15$ graus de liberdade, tem-se $t_p = 2,131$ e para $n-1=3$ graus de liberdade, tem-se $t_p = 3,182$. Observa-se que no caso mais geral, i.é, carregamento simultâneo e para um nível de confiança de 95%, o erro, ao considerar o fator 1,5 como o real, é de no máximo 30%. Considerou-se aceitável a aproximação descrita tendo em vista a pouca influência que este fator tem no valor final da deformação da estrutura como um todo.

A fim de facilitar a imediata obtenção dos valores de y_{exp} é proposto um programa FORTRAN para o computador 1130 IBM, incluído no Apêndice VI, que apresenta diretamente os valores de y_{exp} em função dos tipos de apalpadores usados e suas posições relativas na travessa de sustentação.

As conclusões acima são válidas para carregamento perpendicular ao eixo da travessa, i.é, apalpadores com deslocamentos da ponteira perpendicular ao eixo da travessa. Caso contrário deve-se considerar nos cálculos apenas a componente normal da força de mola, e admitir um erro no valor da deformação lida no mostrador devido ao ângulo do apalpador com relação a normal ao eixo da haste.

3.5 - HASTE DE FIXAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Consiste num tubo de diâmetro externo de 25 mm e espessura de parede de 2,5 mm, com terminal especial para fixar o apalpador na posição de teste (Fig.40 e 41). Assim, como os demais

mentos da estrutura, as hastes foram construídas no Centro Tecnológico da UFSC. Foram usados, também, para fixar os instrumentos, suportes de base magnética (Fig.42 e 43).

A haste funciona como uma viga em balanço sujeita a carga concentrada (Fig.45). Esta corresponde a força de mola do medidor de deformação (apalpador) quando em operação. Através deste modelo matemático foi possível calcular teoricamente² a relação força x deformação ao longo da haste. A comparação destes valores com os obtidos experimentalmente permitiu conhecer o fator de correção necessário ao se considerar os cálculos teóricos como efetivos.

3.5.1 - CONDIÇÕES DE TESTE

A haste foi montada sobre uma base considerada rígida para as cargas que seriam aplicadas. A base foi o barramento da fresa marca MECKERT, modelo FSS-400 VI, existente no laboratório de máquinas operatrizes do Centro Tecnológico. As cargas aplicadas foram de no máximo 0,5 kgf além dos pesos próprios dos elementos em teste e dos instrumentos de medição. A Fig.45 mostra os principais pontos de carga e medição das deformações da haste, nos testes de rigidez própria.

As forças foram aplicadas com auxílio de pesos aferidos suspensos por fios de nylon. Como as hastes foram montadas em nível, as forças aplicadas foram consideradas normais aos eixos das hastes.

As deformações das hastes foram registradas por apalpadores indutivos fixos no barramento da fresa através de suportes magnéticos.

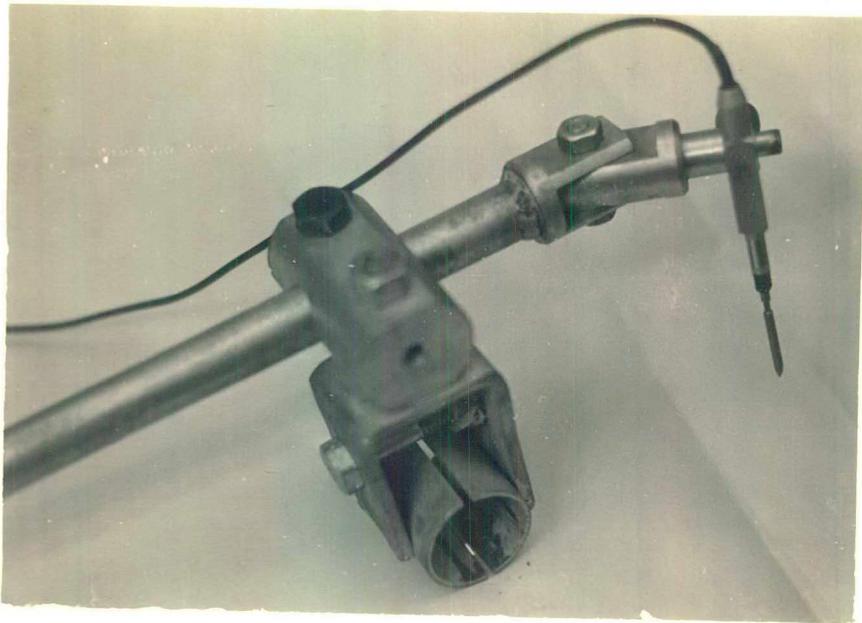


FIG. 40 - HASTE DE FIXAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.

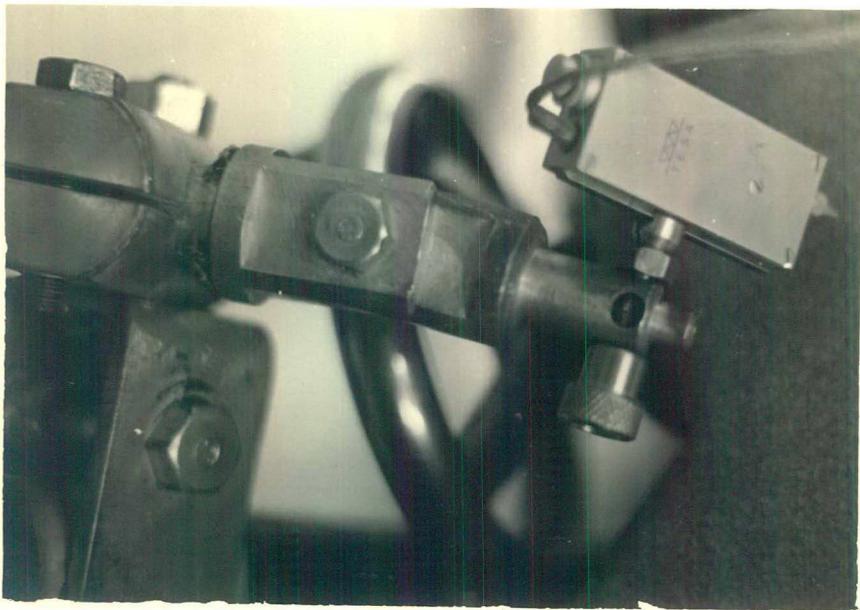


FIG. 41 - HASTE DE FIXAÇÃO DOS INSTRUMENTOS EM POSIÇÃO DE TR
BALHO NA MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DA CONTRAPONTA.

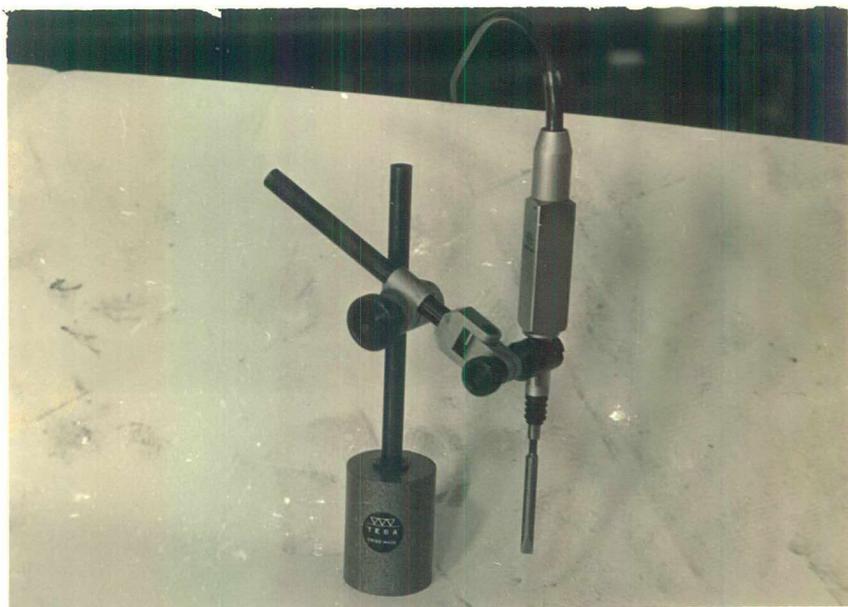


FIG.42 - SUPORTE PARA FIXAÇÃO DE INSTRUMENTOS COM BASE MAGNÉTICA.

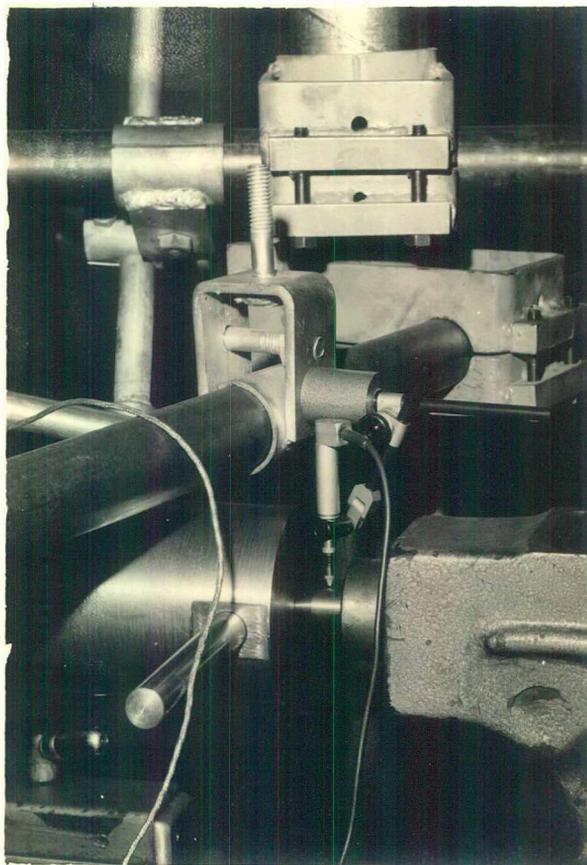


FIG.43 - SUPORTE COM BASE MAGNÉTICA EM POSIÇÃO DE TRABALHO NA MEDIÇÃO DA RIGIDEZ ESTÁTICA DO TORNO NARDINI.

CARREGAMENTO ISOLADO $r_m = 1,5$			CARREGAMENTO SIMULTÂNEO $r_m = 1,5$		
r_i	$(r_m - r_i)$	$(r_m - r_i)^2$	r_i	$(r_m - r_i)$	$(r_m - r_i)^2$
1,06	0,44	0,1936	1,374	0,126	0,0159
1,62	0,12	0,0144	1,578	0,078	0,0061
1,80	0,30	0,0900	1,650	0,15	0,0225
2,79	1,29	1,6641	1,377	0,123	0,0151
1,34	0,16	0,0256	$\sum (r_m - r_i)^2 = 0,0596$ $s_p = \sqrt{\frac{0,0596}{4-1}} = 0,141$ $s_{ps} = 3,18 \cdot \frac{0,141}{4} = 0,224$ <p>p/95% de confiabilidade:</p> $1,052 < r_i < 1,948$		
1,34	0,16	0,0256			
1,50	0,00	0,0000			
2,28	0,78	0,6084			
1,34	0,16	0,0256			
1,46	0,04	0,0016			
1,46	0,04	0,0016			
1,53	0,03	0,0009			
2,08	0,58	0,3364			
2,29	0,79	0,6241			
2,29	0,79	0,6241			
2,15	0,65	0,4225			

$\sum (r_m - r_i)^2 = 4,6585$ $s_p = \sqrt{\frac{4,6585}{16-1}} = 0,5568$ $s_{ps} = 2,131 \cdot \frac{0,5568}{16} = 0,297$ <p>p/95% de confiabilidade: $0,91 < r_i < 2,09$</p>

FIG.44 - PLANILHA DE CÁLCULO DO DESVIO PADRÃO (ERRO PADRÃO) DAS DEFORMAÇÕES DA TRAVESSA.

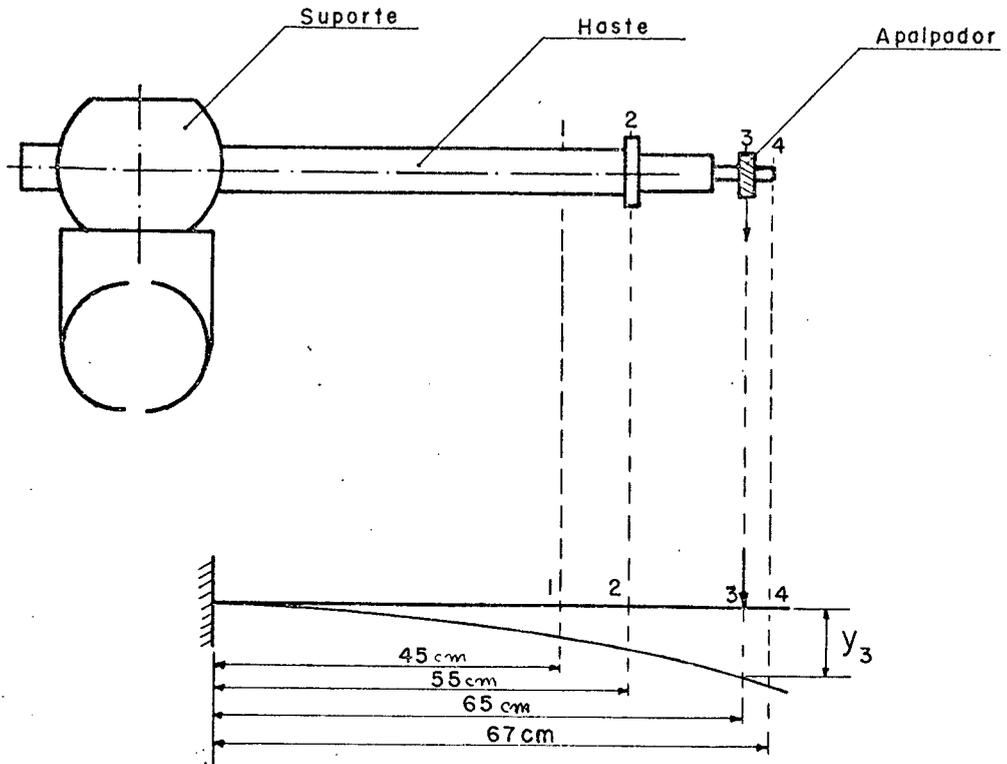


Fig. 45 - Modelo matemático da haste de fixação dos instrumentos - Viga em balanço.

FORÇA 0,5025 Kgf		DEFORMAÇÕES (EM MICRONS) NOS PONTOS		
		1	2	3
APLICADA NO PONTO 3	EXPERIM.	185	244	342
	TEORICA	107	149	193
	$y_{EXP.}/y_{TEOR.}$	1,73	1,64	1,77
APLICADA NO PONTO 4	EXPERIM.	195	250	308
	TEORICA	110	156	202
	$y_{EXP.}/y_{TEOR.}$	1,77	1,60	1,52

Fig. 46 - Quadro das deformações teórica e experimental da haste, sob o carregamento da fig. 45. Força de ≈ 0.5 Kgf.

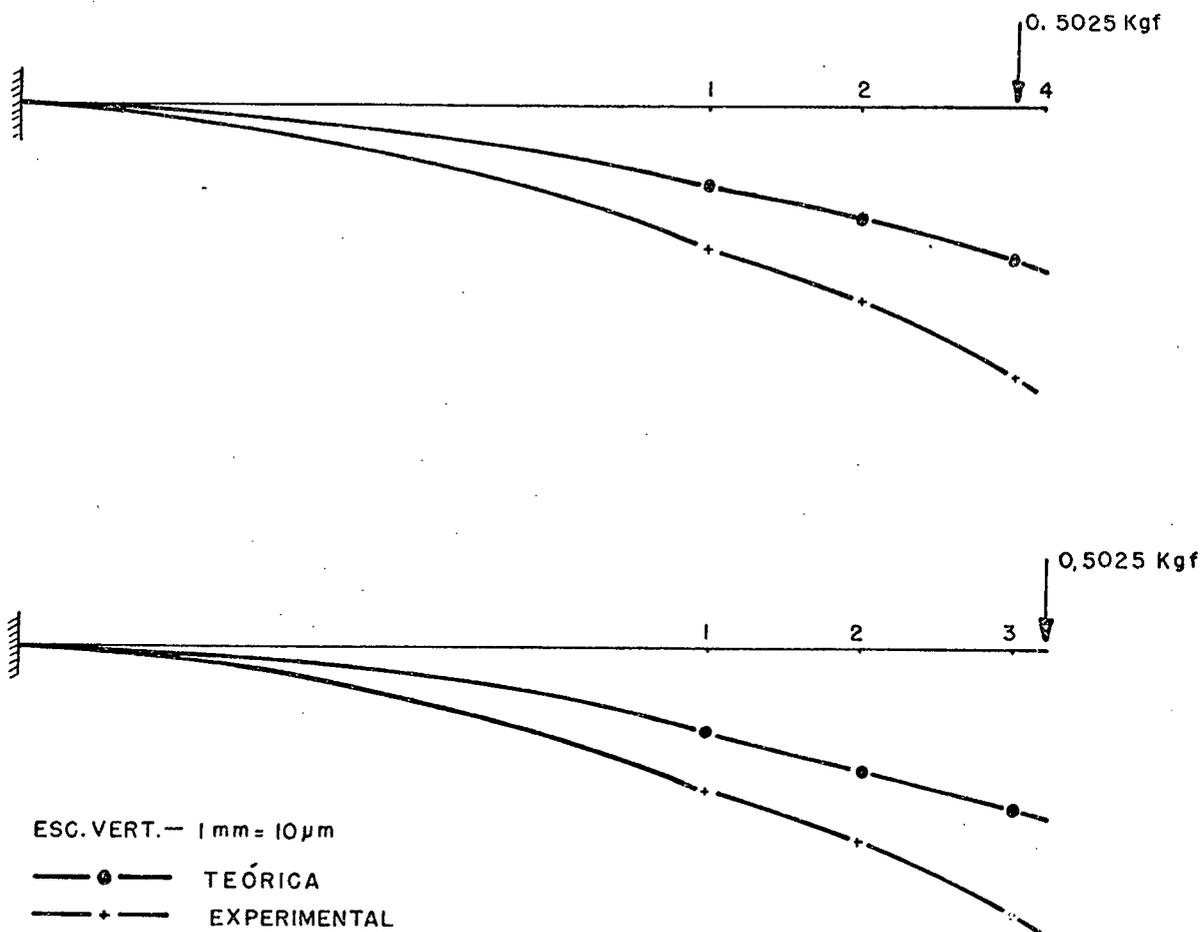
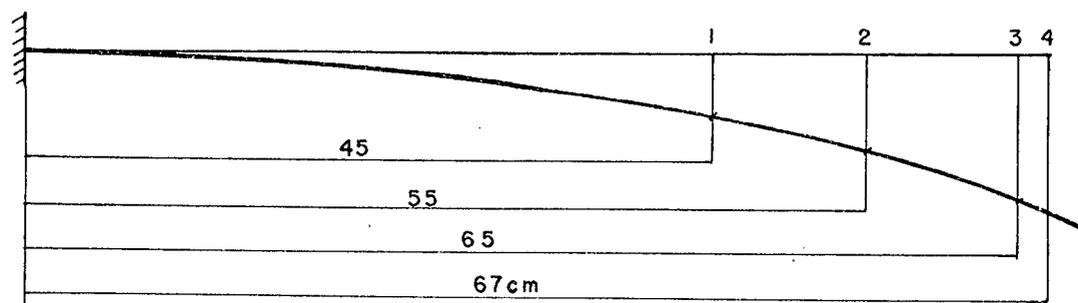


Fig. 47 — Gráficos representativos das deformações da haste para cargas concentradas de ≈ 0.5 Kgf.

3.5.2 - DETERMINAÇÃO TEÓRICA DAS DEFORMAÇÕES DA HASTE

Tendo em vista o modelo matemático da haste - Fig.45) pode-se calcular as deformações da mesma através do formulário da Resistência dos Materiais² que, particularizado ao caso específico assumiu a forma:

$$Y_i = \frac{10^4}{EI} \left[-\frac{F}{6} (x - a)^3 + \frac{Fa^2}{2} \left(x - \frac{a}{3} \right) \right] \quad (24)$$

onde :

Y_i = deslocamento em microns, do ponto i da haste sob ação de uma carga F (em kgf) distante a centímetros do engaste.

F = distância do ponto i ao engaste (em cm).

E = módulo de elasticidade da haste. Para o caso do aço :

$$E = 2,1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

I = momento de inércia da haste, calculado em $1,132 \text{ cm}^4$.

Nos ensaios de rigidez das máquinas, cada haste vai fixar apenas um apalpador; sendo neste caso $x = a$, já que interessa conhecer a deformação (erro) da haste no ponto onde está atuando o apalpador. A fórmula 24 assume então a forma simplificada:

$$Y = \frac{F \cdot 10^4}{EI} \cdot \frac{a^3}{3} \quad (25)$$

onde o deslocamento " Y " é dado em microns.

O quadro da Fig.46 apresenta os valores das defor-

ações da haste ao lado dos valores experimentais, enquanto que na Fig.47, tem-se a representação gráfica destes resultados.

3.5.3 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS DEFORMAÇÕES DA HASTE

A haste foi montada na banca de teste segundo descrição (item 3.5.1) e após uma sequência de 3 testes com cargas , concentradas, registrou-se os valores médios dos resultados na quadro da Fig.46. A representação gráfica destes valores está na Fig. 47.

	r_i	$(r_i - r_m)$	$(r_i - r_m)^2$	DESVIO PADRÃO
PUNTO 3	1,73	0,03	0,0009	$S_p = \sqrt{\frac{0,0567}{6-1}} = 0,107$ $S_{ps} = 2,57 \frac{0,107}{6} = 0,1127$ <p>p/95% de probabilidade:</p> $1,47 < r_i < 1,93$
	1,64	-0,06	0,0036	
	1,77	0,07	0,0049	
PUNTO 4	1,77	0,07	0,0049	
	1,60	-0,10	0,0100	
	1,52	-0,18	0,0324	
$r_m = 1,7$	---	$\sum = 0,0567$		

FIG.48 - PLANILHA DE CÁLCULO DO DESVIO PADRÃO DAS DEFORMAÇÕES DA HASTE.

3.5.4 - RIGIDEZ DA HASTE DE FIXAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Pelo quadro das médias das deformações teóricas e experimentais da haste (Fig.45) pode-se afirmar que as deformações da haste são 70% maiores que as calculadas teoricamente, i.é,

$$Y_{\text{exp}} = 1,7 \times Y_{\text{teor}} \quad (26)$$

O fator 1,7 é a media aritmética das deformações no ponto de aplicação da carga. Este valor foi considerado aceitável, tendo em vista o desvio padrão (erro padrão) apurado na planilha da Fig.48 e pela simplicidade do método de correção das deformações da haste.

3.6 - APLICAÇÃO DO MÉTODO INDIRETO

O método da medição da rigidez estática absoluta exposto neste capítulo, simplesmente denominado de método indireto, foi aplicado nos testes de rigidez de um torno de fabricação nacional, de propriedade do Centro Tecnológico da UFSC, cujas características estão expostas no item 3.6.1 .

O principal objetivo da aplicação do método, descrito neste subcapítulo é comparar os valores da rigidez assim obtidos com aqueles obtidos pela aplicação do método direto descrito no capítulo 4.

3.6.1 - A máquina ferramenta escolhida para aplicar o método indireto de medição de rigidez absoluta foi um torno:

TORNO NARDINI -MODELO TDN - 300

Distância entre pontos	1.000 mm
Altura dos pontos	200 mm
Diâmetro tornável sobre o carro	245 mm
Comprimento do barramento	1.500 mm
Velocidade da árvore principal : 31,5 - 45 - 63 - 90 - 125 - 180 - 250 - 355 - 500 - 710 - 1000 - - 1.400	rpm
Potência de acionamento	4Hp/1750 rpm
Ano de aquisição	1966

Tendo em vista o instrumental disponível e o cuidado para evitar influência de fatores estranhos na comparação dos métodos em estudo, fez-se análise da rigidez ao longo da árvore principal do torno (Fig.49).

3.6.2. - CONDIÇÕES DE TESTE

O teste de rigidez absoluta e estática do torno consistiu em aplicar uma série de cargas estáticas que simulassem forças de corte ou suas componentes e para cada uma delas foram medidas as deformações em pontos convenientes do eixo do torno (Fig. 49).

A escolha de pontos ao longo do eixo do torno - foi arbitrário já que o principal objetivo dos testes era analisar os métodos de medição de rigidez.

As forças aplicadas com o dispositivo descrito - no capítulo II, tiveram seus pontos de aplicação nos pontos A, B, e C da peça (Fig.49) . Em cada ponto destes foram aplicadas forças

verticais, $\alpha = 90^\circ$ e $\gamma = 90^\circ$, e forças inclinadas, $\alpha = 68^\circ 29'$ e $\gamma = 76^\circ 49'$ (Fig.6). A intensidade das forças, fixadas em 200, 300, 500, 600, e 650 kgf, foram carregadas estáticamente.

As deformações foram medidas com os dispositivos descritos no capítulo II. O tripé com barras de reforço foi montado junto ao torno de modo que a travessa de sustentação dos instrumentos estivesse próximo e paralelo a árvore principal daquele. Sobre a travessa foram colocadas as hastes de fixação dos apalpadores. Os apalpadores, em número de dez, foram posicionados conforme esquema da Fig.49. Realizou-se medições no plano vertical e no plano horizontal, sendo que em ambos os casos, a direção foi normal ao eixo da árvore principal.

Antes de cada série de medições realizou-se carregamento sucessivos até que a posição dos ponteiros indicadores de força e deformações permanecessem inalteradas. Com este procedimento, procurou-se acomodar os instrumentos, aliviando as tensões de instabilidade, e acomodar as partes do torno, eliminando os deslocamentos residuais. Em seguida, aplicou-se, no torno, carregamentos sucessivos e para cada um deles fez-se a leitura das deformações (Y_m) registradas pelos apalpadores.

Tendo em vista a flexibilidade da estrutura de apoio dos instrumentos, ao final de cada série de medições, corrigiu-se os valores das deformações medidas (Y_m) junto a máquina. A deformação total (E) da estrutura em cada ponto de medição é a soma das deformações da haste (E_h), da travessa (E_t) e do tripé (E_e)

$$E = E_h + E_t + E_e \quad (27)$$

Conhecidos o Y_m e o E , determinou-se a deformação real Y nos diversos pontos do torno pela expressão (Fig.57):

$$Y = Y_m + E$$

Afim de melhor discernir no texto, a deformação da máquina testada e a deformação da estrutura de referência, esta última, necessária para corrigir os valores das deformações medidas, foi denominada de "erro".

3.6.3 - DEFORMAÇÕES MEDIDAS (Y_m)

Para cada carregamento descrito no item anterior, fez-se a leitura das deformações nos diversos apalpadores distribuídos conforme esquema da Fig.49. Estas deformações registradas pelos apalpadores, denominadas de Y_m , foram transcritas em planilhas do tipo a que está mostrada na Fig.50. No Apêndice I estão relacionadas as planilhas das deformações correspondentes a todos os carregamentos a que o torno foi submetido. Os valores das deformações ali registrados, são média aritmética de três ensaios consecutivos.

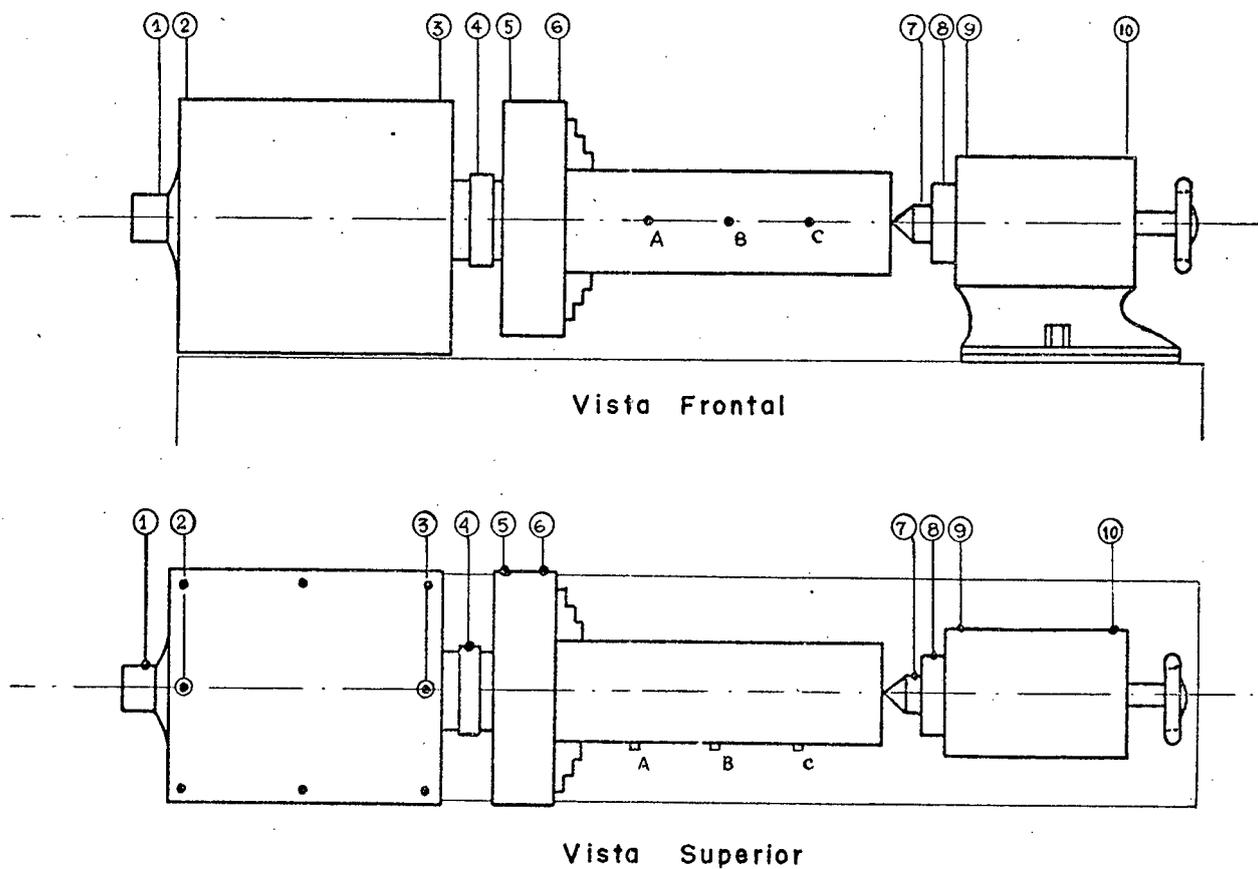


Fig. 49 - Vista geral da árvore principal do torno, destacando-se os pontos de aplicação da força (A.B.C) e os pontos de medição das deformações (1 a 10). Na vista frontal os pontos de medições verticais e na vista superior os pontos de medições horizontais.

Força m Kgf	Deformação em μm , no plano vertical									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
200	0	0	3	5	8	12	48	32	9	1
400	0	0	4	5	12	24	85	54	18	4
500	0	0	4	6	15	30	106	65	25	6
600	0	0	4	7	16	34	128	80	32	7
650	1	0	4	7	16	36	138	86	35	8

FIG.50 - PLANILHA DAS DEFORMAÇÕES DO TORNO NO PLANO VERTICAL PARA FORÇAS DE 200 a 650 KGF APLICADAS NO PONTO C DA FIG. 49 E NA DIREÇÃO DA FORÇA DE CORTE , $\alpha = 68^{\circ}29'$ e $\beta = 76^{\circ}49'$

3.6.4 - ERRO DEVIDO A DEFORMAÇÃO NA HASTE (E_h)

Após uma série de leituras das deformações do torno foi possível determinar o erro devido a deformação da haste. A fórmula 25 foi aqui usada na forma particular :

$$Y_{teor} = 1,587 \times 10^{-6} \times (E_h \times a^3) \quad (28)$$

então, pela expressão (26), tem-se :

$$E_h = 1,7 \times Y_{teor} = 2,698 \times 10^{-6} \times (E_h \times a^3) \quad (29)$$

nde o erro E_h é dado em Micrometros, a força F_h em gramas e a em centímetros. Por facilidade de cálculo foram usadas 120 planilhas que foram codificadas e anexadas no Apêndice I. A figura 50a mostra uma delas, a planilha E_h - AI - VO6, que registra o erro devido a haste (E_h), no ponto 06, plano vertical (V), devido a forças inclinadas aplicadas no ponto A.

ERRO NA DEFORMAÇÃO MEDIDA EM MICROMETROS					QUADRO	
PONTO Nº 6 - DIREÇÃO VERTICAL					E_h - AI - VO6	
FORÇA NO PONTO A-I EM kgf	DEFORMAÇÃO MEDIDA EM m	FORÇA DE MOLAS EM g	FORÇA NA HASTE EM g	DISTÂNCIA DO		ERRO E m
	Y_m	F_m	F_h	a	a^3	E_h
200	28	3,08	3,08			0,101
400	61	6,70	6,70			0,220
500	77	8,47	8,47	23	12167	0,278
600	98	10,56	10,56			0,347
650	108	11,88	11,88			0,390

FIG.50a - PLANILHA DE CÁLCULO DO ERRO DE MEDIÇÕES DEVIDO DEFORMAÇÕES DA HASTE (E_h).

A determinação real da força de mola exigiu o conhecimento prévio da deformação que esta sofreu na medição; por isso as deformações (Y_m) foram medidas previamente. Conhecida a relação

força-deformação da mola (Apêndice IV) foi possível calcular a força de mola (F_m) que realmente atua no apalpador.

Nos cálculos teóricos da haste considerou-se a força atuando normalmente ao eixo da mesma. Nas experiências verificou-se que esta hipótese nem sempre ocorre. Na Fig.51 está esquematizado um caso em que a força de mola atua com um ângulo \hat{A} , diferente de 90° , com relação ao eixo da haste. Neste caso a força a ser considerada nos cálculos é :

$$F_h = F_m \cdot \cos \hat{A} \quad (30)$$

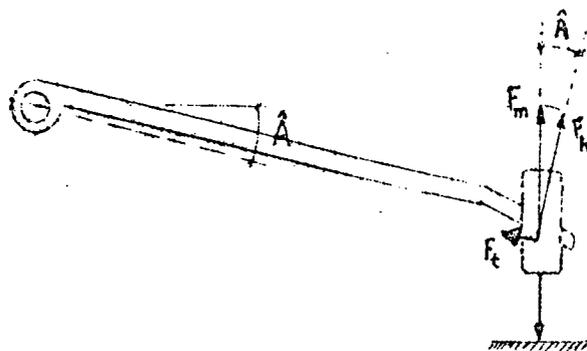


FIG.51 - DECOMPOSIÇÃO DA FORÇA DA MOLA (F_m) DO APALPADOR INCLINADO COM RELAÇÃO AO EIXO DA HASTE.

Nos testes de rigidez do torno o posicionamento dos apalpadores com relação as respectivas hastes não apresentam ângulos maiores que 23° ($\cos 23^\circ = 0,92$) permitindo que se considerasse $F_m \cong F_h$, com um erro menor que 8%.

3.6.5 - ERRO DA TRAVESSA DE SUSTENTAÇÃO DOS INSTRUMENTOS (E_t)

O erro devido a deformação da travessa foi determinado seguindo o formulário apresentado no ítem 3.4 .

Uma vez posicionados os instrumentos de medição das deformações do torno, determinou-se a posição do ponto de aplicação e a intensidade das forças que realmente atuam na haste . Estes dados foram adicionados ao programa FORTRAM (APêndice VI) , que calculou diretamente as deformações (E_t) que ocorrem em cada ponto de engaste das hastes na travessa.

Tendo em vista o porte do torno, a quantidade e características dos instrumentos disponíveis, os testes foram realizados em duas etapas. Na primeira foram medidas as deformações nos pontos 1 a 7 enquanto que na segunda etapa mediu-se as deformações nos pontos 8, 9 e 10. As figuras 52 e 53 mostram as posições dos pontos de aplicação das forças de mola dos apalpadores sobre a travessa na 1ª, e 2ª etapa, respectivamente.

A intensidade da força que atua na travessa é função da deformação da mola (Y_m) e da sua direção com relação ao eixo da travessa. Tendo em vista que para cada carregamento tem-se uma série de deformações (Y_m) medidas pelos apalpadores, as deformações da travessa são distintas para cada carregamento. Registrar o erro, (E_t) para cada carregamento tornaria o método muito trabalhoso. O uso do valor médio das deformações que ocorrem em cada ponto é uma simplificação a considerar. Quando se pretende conhecer a rigidez média do torno para cargas aplicadas ao longo do barramento pode-se admitir esta simplificação com aceitável aproxima-

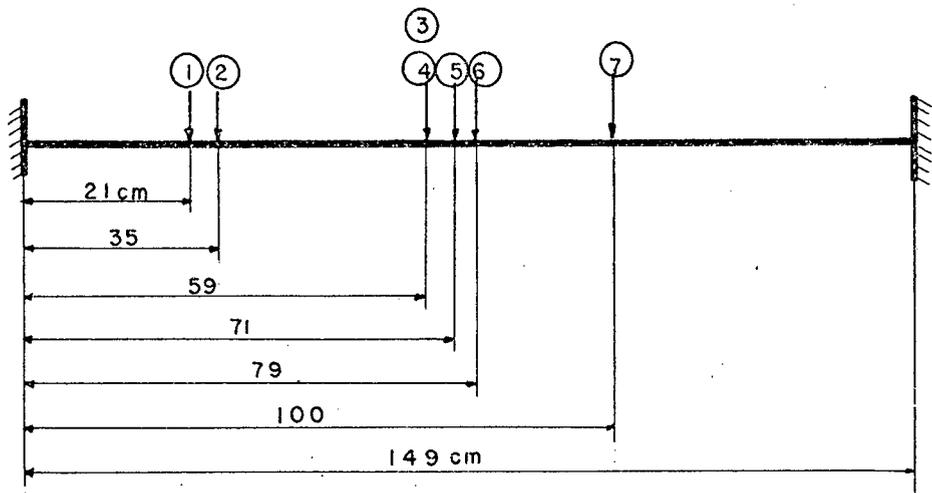


Fig. 52 - Posição dos pontos de aplicação das forças de mola dos apalpadores (1 a 7) sobre a travessa.

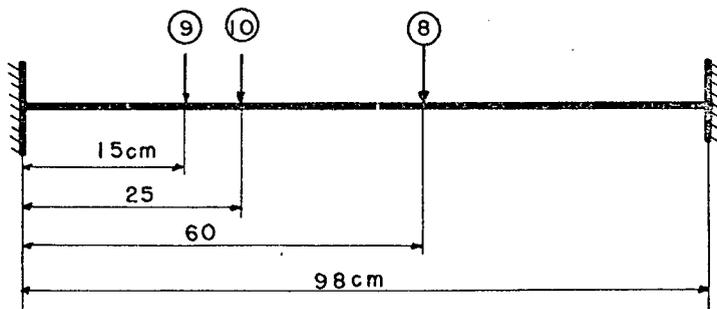


Fig. 53 - Posição dos pontos de aplicação das forças de mola dos apalpadores (8, 9 e 10) sobre a travessa.

ão (dados no Apêndice I). No caso de se querer conhecer os valores máximos da flexibilidade em determinados pontos do torno é mais correto adotar como forças que atuam na haste, aquelas correspondentes as deformações (Y_m) máximas medidas nos testes.

No presente trabalho usou-se como forças que atuam na travessa os valores médios obtidos em cada série de ensaios (IG.54).

FORÇA DE MOLA MÉDIA EM g. P/CARGAS DE 200 550 Kgf.	PONTOS DA TRAVESSA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,20	0,07	0,92	1,96	4,03	8,14	2,90	0,60	0,0	0,07	
0,22	0,0	0,75	1,43	2,62	5,32	6,96	2,75	0,95	0,48	
0,0	0,0	0,42	0,66	1,47	2,99	11,11	6,98	2,62	0,57	
2,42	0,0	1,70	1,34	2,62	4,64	0,53	0,68	0,88	1,52	
2,07	0,0	1,42	1,08	2,29	3,94	0,55	0,50	0,55	2,02	
1,56	0,0	0,88	0,62	1,34	2,55	3,74	2,13	0,86	2,40	
MÉDIA GERAL em gramas	1,08	0,00	1,02	1,18	2,40	4,60	4,30	2,27	0,98	1,18

IG. 54 - Quadro dos valores médios das forças de mola para cada ponto de apoio dos palpadores na travessa.

CARREGAMENTOS ISOLADOS	DEFORMAÇÕES EM MICROMETROS					
	1	2	3 e 4	5	6	7
PONTO 1	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3 e 4	0,005	0,013	0,023	0,024	0,022	0,015
6	0,010	0,024	0,047	0,054	0,055	0,041
7	0,006	0,014	0,030	0,036	0,039	0,035
DEFORMAÇÃO P/ENGASTE	0,029	0,068	0,131	0,147	0,148	0,115
DEFORMAÇÃO REAL	0,044	0,102	0,197	0,221	0,222	0,174

FIG. 55 - Planilha de cálculo do erro (E_t) devido a deformação da travessa, nos pontos correspondentes a fig.52

CARREGAMENTOS ISOLADOS	DEFORMAÇÕES EM MICROMETROS		
	PONTO 8	PONTO 9	PONTO 10
Ponto 8	0,003468	0,000582	0,001616
Ponto 9	0,001316	0,001100	0,001742
Ponto 10	0,001363	0,000762	0,001507
DEFORMAÇÃO P/ENGASTE	0,006147	0,002444	0,004865
DEFORMAÇÃO REAL	0,009221	0,003666	0,007297

FIG. 55a - Planilha de cálculo do erro (E_t) devido a deformação da travessa, nos pontos correspondentes a figura 53.

Admitidos os valores das forças relacionadas no quadro da figura 54, com pontos de aplicação na travessa conforme as figuras 52 e 53, calculou-se através de computação o erro (E_t) devido a deformação da travessa (figuras 55 e 55a).

3.6.6 - ERRO DEVIDO A DEFORMAÇÃO DO TRIPE (E_e)

O tripé usado foi aquele descrito no item 3.3 , cujo coeficiente de flexibilidade em cada coluna de apoio da travessa é de :

$$C = 1,5 \mu\text{m}/100 \text{ g} \quad (31)$$

No esquema da figura 53 pode-se observar as cargas distribuídas ao longo da travessa. O cálculo da reação dos engastes permite conhecer as forças que atuam efetivamente em cada coluna.

Da Resistência dos Materiais, tem-se (Fig.56) :

$$R_1 + R_2 = \sum_{i=1}^n F_i \quad (32)$$

e ainda

$$R = \frac{1}{L} (F_1 x a_1 + F_2 x a_2 + \dots + F_n x a_n) \quad (33)$$

onde :

R_1 e R_2 = são as forças que atuam nas colunas 1 e 2, respectivamente.

F_i = força de mola do apalpador i que atua na travessa - horizontalmente, i.é, perpendicular ao plano das colunas 1 e 2.

n = número de forças que atuam na travessa.

L = comprimento livre da travessa.

a_i = distância de F_i até R_1

Baseado neste formulário e tendo em vista os dados apresentados nas Figs. 52 e 54, calculou-se :

$$R_1 + R_2 = 14,58 \text{ gramas}$$

$$R_2 = \frac{1}{149} \left[1,08 \times 21 + 1,02 \times 59 + 1,18 \times 59 + 2,40 \times 71 + 60 \times 79 + 4,30 \times 100 \right] = 7,492 \text{ gramas.}$$

$$R_1 = 14,58 - 7,492 = 7,088 \text{ gramas.}$$

Pelo resultado pode-se usar a aproximação : $R_1 = R_2 =$

7,30 g , uma vez que isso acarreta um erro de menos que um milésimo de micron no valor da deformação de cada coluna. Esta aproximação simplifica a determinação da influência da deformação do tripé (E_e) na correção final (E) em cada apalpador. Sem esta simplificação o E_e é diferente para cada apalpador, uma vez que os extremos da travessa deslocam-se de maneira desigual. No caso de haver uma

concentração de instrumentos num dos extremos da travessa deve-se fazer a correção correspondente de maneira análoga a descrita no item 3.4.3 .

Aceitando as considerações acima, pode-se afirmar - que uma coluna se deforma $1,5 \mu\text{m}/100$ gramas. A travessa de sustentação dos instrumentos apoiado em duas colunas se desloca de $1,5 \mu\text{m}/200$ gramas e para uma carga de $R_1 + R_2 = 14,58$ gramas tem-se um deslocamento paralelo da travessa de $0,11$ micrometros.

$$E_e = 0,109 \mu\text{m} \cong 0,11 \mu\text{m} \quad (34)$$

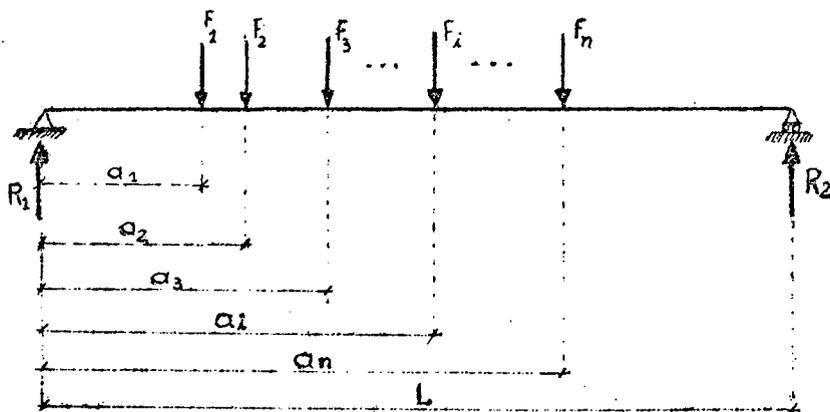


FIG.56 - DIAGRAMAS PARA O CÁLCULO DAS FORÇAS QUE ATUAM NO TRIPE.

3.6.7 - CORREÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MEDIDAS

A Fig.57 esquematiza as deformações que ocorrem no torno e o deslocamento do apalpador quando aquele é carregado . Chamando de Y a deformação real do torno, E o deslocamento do

o palpador devido a ação da força da própria mola e de $(Y_{m_1} - Y_{m_2})$

o valor da deformação registrada pelo palpador, pode-se estabelecer a relação :

$$Y_{m_1} + E = Y_{m_2} + Y$$

$$Y = (Y_{m_1} - Y_{m_2}) + E \quad (35)$$

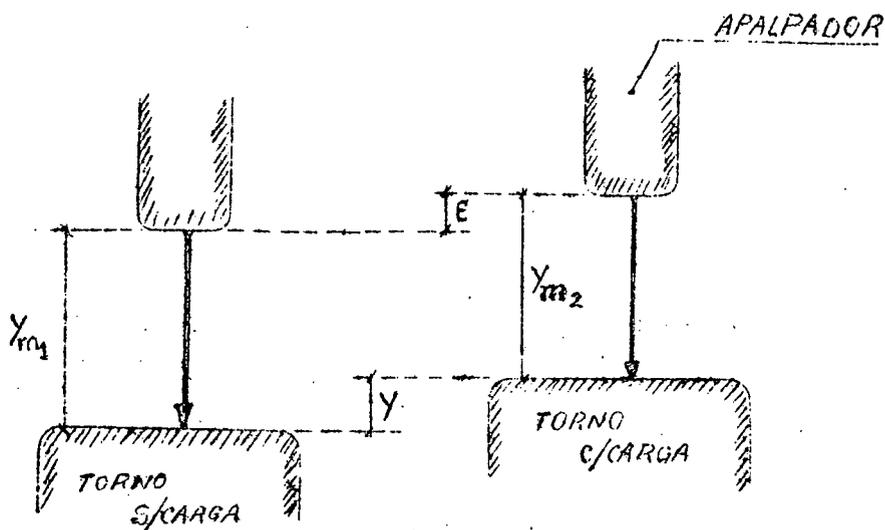


FIG.57 - ESQUEMA DAS DEFORMAÇÕES DO TORNO E DO APALPADOR APÓS O CARREGAMENTO.

Fazendo $Y_{m_1} - Y_{m_2} = Y_m$, tem-se :

$$Y = Y_m + E \quad (36)$$

Sendo Y_m os valores das deformações registradas - nos ensaios e relacionados em planilhas no Apêndice I.0. Os valores de E são obtidos pela expressão 27 e estão relacionados em planilhas do Apêndice I.3 .

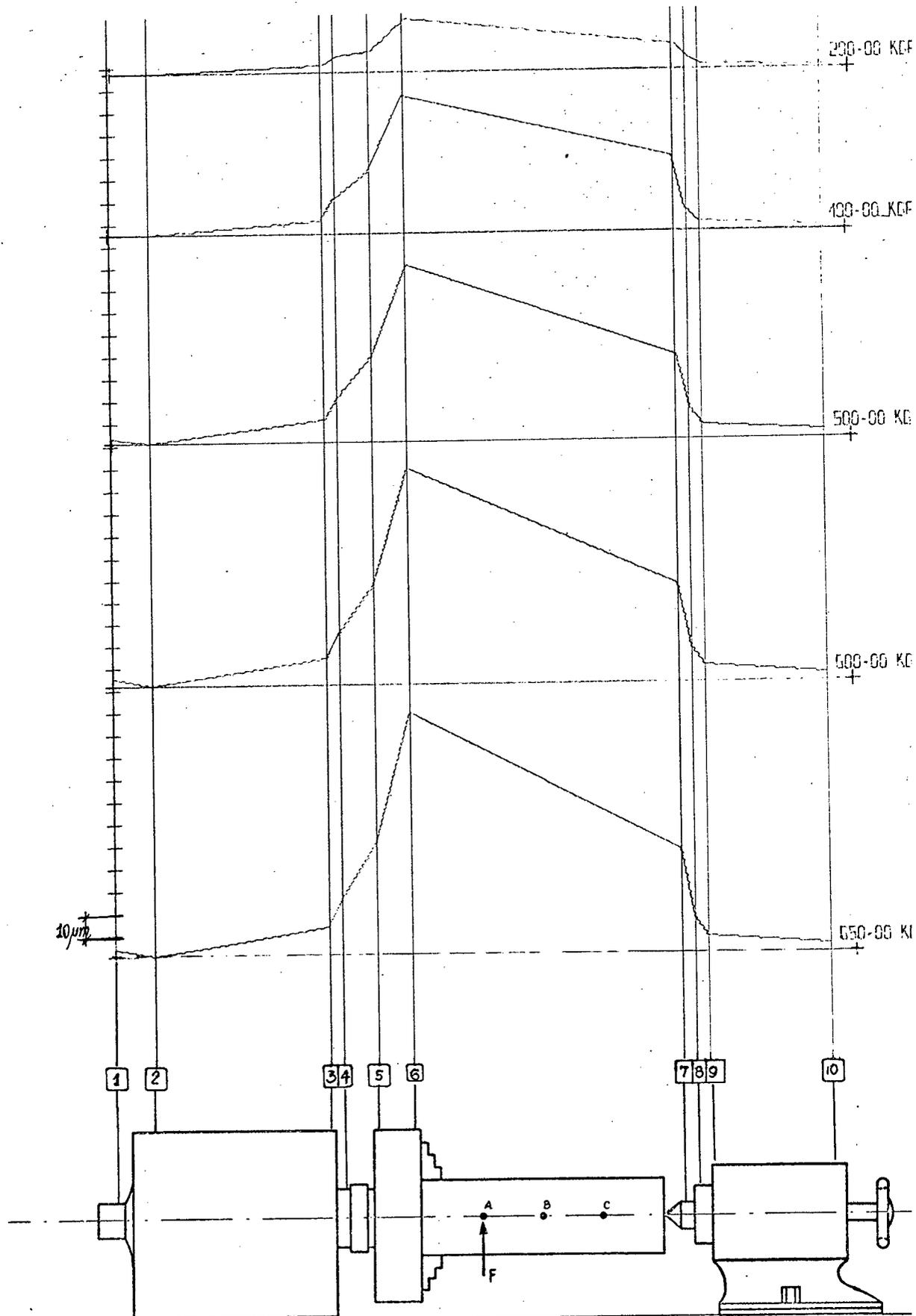
Conhecidos Y_m e E , foi possível determinar Y pela expressão 36. Os valores de Y estão relacionados em planilhas, também no Apêndice I, (I.4).

3.6.8 - RIGIDEZ DA MÁQUINA FERRAMENTA TESTADA

A rigidez, para cada ponto do torno é a relação da força aplicada pela deformação correspondente, conforme o capítulo I. Como a direção da deformação não coincide com a direção da força e ainda como a deformação medida não é no ponto de aplicação da força, tem-se um caso geral de rigidez transversal.

Para se ter uma visão ao longo de sua árvore principal, foram traçados gráficos como o que está representado na Fig. 58 . Método este comumente usado na literatura especializada ^{1,2}. No Apêndice I estão os gráficos das deformações do torno ao longo da árvore principal, para os diversos carregamentos realizados.

FIG.58- Curvas representativas das deformações ao longo do eixo principal do torno sob cargas estáticas.



Rigidez Estática Absoluta do eixo principal do torno
 - Metodo Indireto - Deformações e Carregamentos
 correspondentes à planilha Y-AV-V04.

C A P Í T U L O I V

MÉTOD O D I R E T O

4.1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Este método de medição absoluta da rigidez difere fundamentalmente do anterior com relação a técnica de medição das deformações nos ensaios de rigidez das máquinas. O sistema de aplicação de forças é o mesmo.

Consiste em montar uma estrutura, junto à máquina a ser testada, para apoiar os instrumentos de medição das deformações. Montar o dispositivo de aplicação de forças. Carregar, i.é, aplicar forças estáticas conhecidas; Medir as deformações (Y_m) nos pontos da máquina que se quer conhecer a rigidez (Fig.59).

$$Y_m = Y_{m_1} - Y_{m_2} \quad (37)$$

A esta deformação, Y_m , corresponde uma força de mola do apalpador que desloca a estrutura de referência com relação a máquina em teste. Medido Y_m , descarrega-se a máquina e em seguida aplica-se uma força no apalpador, no mesmo sentido de Y_m e com intensidade igual a força de mola gerada por Y_m . Mede-se o deslocamento do apalpador que é o deslocamento (E) da estrutura naquele ponto. A soma da deformação medida (Y_m) e o deslocamento (E) da estrutura no ponto é a deformação real (Y) da máquina .(Fig.59).

$$Y = Y_m + E \quad (38)$$

A relação entre a força (F) aplicada na máquina e a de-
formação (Y) correspondente é a rigidez estática e absoluta (K) da
máquina naquele ponto (i) para o carregamento F .

$$K_i = \frac{F}{y_i} \quad (39)$$

Conseqüentemente a relação inversa define o valor da fle-
xibilidade da máquina, no ponto onde se mediu a deformação, para o
carregamento F .

$$C = \frac{y_i}{F} \quad (40)$$

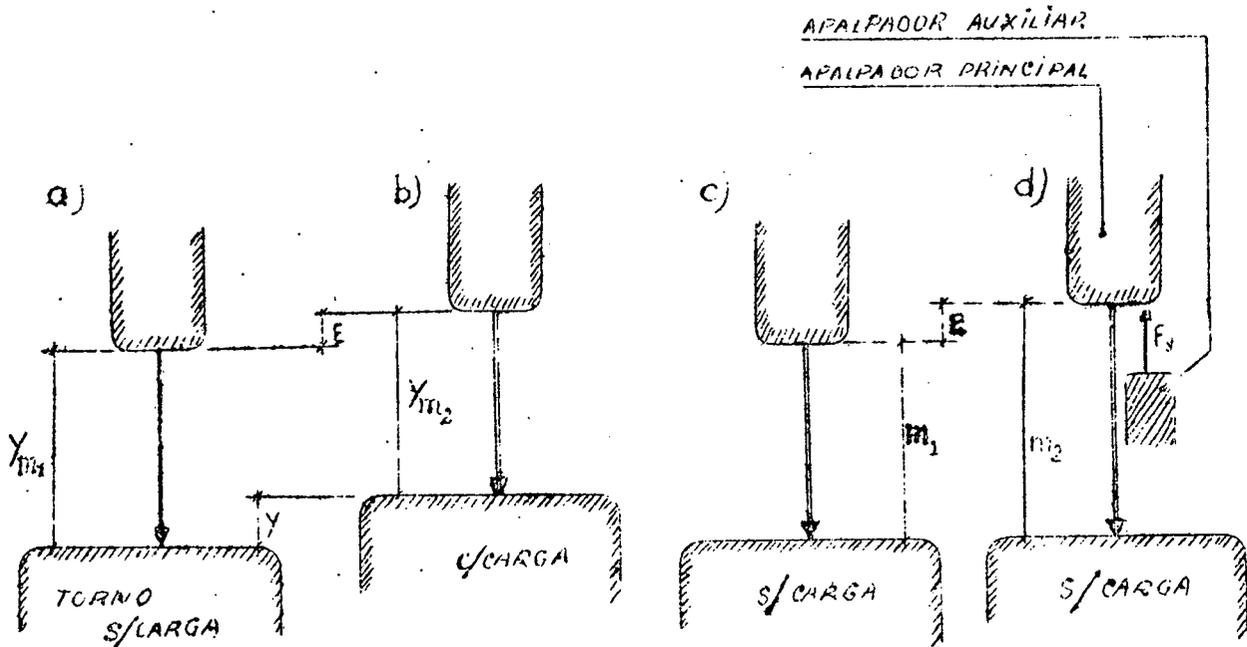


FIG. 59 - Sequência de medições na determinação da rigidez absoluta pelo método direto.

4.2 - MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de conhecer a rigidez da máquina, foram aplicados carregamentos conhecidos e medidas as deformações em pontos desejados.

O método e os materiais empregados para aplicar as forças e a medição de sua intensidade e direção, foram os mesmos do capítulo III e descritos no capítulo II.

Quanto a medição das deformações usou-se os mesmos equipamentos que aqueles usados no Método Indireto, descrito no capítulo II. Interessante observar que a estrutura de referência, quando usada neste método, não precisa ter sua rigidez previamente determinada. É recomendável que sua rigidez seja relativamente alta de modo que suas deformações, durante as medições sejam de ordem inferior as da máquina em teste. Esta recomendação é para diminuir a influência dos erros que ocorrem na determinação da deformação da estrutura sobre o valor da deformação real da máquina. Assim, se a deformação medida da máquina (Y_m) é de $90 \mu\text{m}$ e a deformação da estrutura (E) é de $10 \mu\text{m}$, a deformação real (Y) da máquina é de $100 \mu\text{m}$. No caso de ocorrer um erro de 10% no valor de E , este proporciona um erro de apenas 1% no valor da deformação real (Y) da máquina. A estrutura de referência além de ter rigidez alta, deve ser versátil para permitir sua locomoção até junto às máquinas a serem testadas, possuir recursos para a fixação do instrumental necessário junto a pontos diversos e ter uma base adaptável aos pisos dos laboratórios sem danificá-los.

4.2.1 - MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO E

A deformação que experimenta o medidor de deformações, apalpador, devido a ação de sua própria mola, é denominada de E. Sua determinação pelo método aqui descrito é a característica dominante no "Método Direto".

Conforme descrito no item 4.1, após a leitura de Y_m , tem-se conhecimento da deformação da mola do apalpador e consequentemente a força de mola nele aplicada (Apêndice IV). Nos apalpadores empregados neste trabalho, esta força é menor que 100-gramas. Para forças desta ordem, pode-se considerar o torno com rigidez infinita, i.é, praticamente não se deforma devido as forças de mola dos apalpadores. Estas considerações permitiram concluir - que se for aplicada uma força F_y (Fig.59 d) sobre o apalpador na direção e sentido da deformação Y_m e de intensidade igual a força de mola correspondente a Y_m , ele vai deslocar-se de uma distância E (deformação da estrutura de referência) igual ao deslocamento E devido ao carregamento no torno (Fig.59 b).

Resta considerar a forma prática de aplicar a força F_y no apalpador. A intensidade desta deve ser igual a da força de mola que este apalpador experimentou na medição do Y_m . A solução apresentada foi o uso de outro apalpador igual aquele instalado e um aparelho de medição do tipo descrito no item 2.2.1. Com o apalpador auxiliar, pressiona-se o corpo do apalpador principal na direção paralela ao seu eixo (Fig.59 d). O registro de uma deformação " Y_m " no aparelho de medição do apalpador auxiliar equivale dizer que o apalpador principal está submetido a uma força $F_y = K \cdot Y_m$, sendo K a constante de mola dos apalpadores (Apêndice -

IV). Observa-se que a reação de F_y pode estar agindo em qualquer a poio estranho a estrutura de referência, inclusive o próprio torno que tem rigidez infinita para carretamento desta ordem. O essencial é que o apalpador auxiliar desloque-se de Y_m .

O método de determinação do E, deformação do apalpador devido a elasticidade da estrutura, é aplicável com precisão - quando se tem apenas um apalpador em ação. A estrutura está submetida apenas a uma força de mola. No caso mais geral a estrutura estará suportando vários apalpadores que serão solicitados simultaneamente. Neste caso, admitindo-se o princípio da superposição dos efeitos, determina-se a deformação E em cada apalpador pelo método dos coeficientes de influência, já descrito no item 3.4.1 . A Fig. 60 mostra uma planilha para a determinação da deformação E, pelo método dos coeficientes de influência.

Mesmo no caso de a estrutura estar submetida a ação de forças de molas de vários apalpadores é possível o uso do método aproximado para determinar o E. Consiste em considerar a deformação da estrutura no ponto de aplicação do apalpador devido a força de mola do próprio apalpador, como sendo a deformação final da estrutura naquele ponto; despreza-se o efeito das forças de mola - dos outros apalpadores que estão atuando simultaneamente.

4.3 - APLICAÇÃO DO MÉTODO

Neste subcapítulo, procurou-se mostrar através de um exemplo a simplicidade de aplicação do método de medição de rigidez estática absoluta das máquinas, pelo método direto.

PLANILHA P/CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO "E" NA DIREÇÃO VERTICAL FORÇA DE 600 KGF APLICADA EM C NA DIREÇÃO INCLINADA		E _d - CI - V							
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
PONTO	Y _m	F _j K.Y _m	∞ _{1j} F _j	∞ _{2j} F _j	∞ _{3j} F _j	∞ _{4j} F _j	∞ _{5j} F _j	∞ _{6j} F _j	∞ _{7j} F _j
1	0		0,0						
2	0		0,0	0,0					
3	4		0,0	0,0	0,0				
4	7		0,0	0,0	0,0	1,2			
5	16		0,0	0,0	0,0	0,5	0,0		
6	34		0,0	0,3	0,0	0,5	0,3	2,0	0,3
7	128		0,1	0,3	0,0	0,0	1,0	0,8	1,2
VALORES DO E		E ₁ = 0,0	E ₂ = 0,6	E ₃ = 0,0	E ₄ = 2,2	E ₅ = 2,1	E ₆ = 2,8	E ₇ = 1,5	

FIG. 60 - PLANILHA DE CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO E PELO MÉTODO DOS COEFICIENTES DE INFLUÊNCIA.

4.3.1 - MÁQUINA TESTADA

A máquina escolhida foi o mesmo torno descrito no item 3.6.1, e que serviu para a análise do método indireto de medição de rigidez estática absoluta.

4.3.2 - O Método Direto de determinação da rigidez estática absoluta das máquinas usa praticamente os mesmos equipamentos que aqueles usados no Método Indireto, descrito nos capítulos anteriores.

Aproveitando a montagem da estrutura usada na aplicação do Método Indireto, fez-se simultaneamente as leituras das deformações e dados necessários para o Método Direto. Isto possibilitou também a comparação final dos resultados.

As forças, de intensidade 200, 400, 500, 600 e 650 kgf, obtidas com o dispositivo descrito no capítulo 2, item 2.1.1, tiveram seus pontos de aplicação no ponto A e B da Fig. 49 e na direção vertical, enquanto que as deformações medidas foram nos pontos 3,4,5,6 e 7, no plano vertical, mostrados também na Fig. 49. As deformações foram medidas com apalpadores do tipo descrito no capítulo 2, item 2.2.2. O reduzido número de pontos de medição das deformações foi motivado pela quantidade limitada de apalpadores indutivos disponíveis no momento. Porém, foram considerados válidos os testes de rigidez assim realizados como análise de aplicabilidade do Método. Como análise de rigidez da máquina, naturalmente, seriam necessários um maior número de pontos da máquina.

Da mesma forma como no Método Indireto, antes -

de cada série de medições, realizou-se carregamentos sucessivos - até que a posição dos ponteiros indicadores de forças e deformações permanecessem inalterados para um mesmo carregamento e carregamento nulo. Nesta etapa preliminar dos ensaios também eram aferidos os apalpadores, com auxílio de lâminas calibradas, evitando erros-devido a ajustagem dos mesmos, quando aplicados em outros ensaios estranhos ao presente trabalho. Em seguida, aplicou-se no torno, carregamentos sucessivos e para cada um deles, fez-se as leituras das deformações (Y_m) registradas nos aparelhos de medição. Realizou-se três leituras para cada ponto. Conhecido o valor médio de Y_m em cada ponto, passou-se a determinação do E através do Método dos Coeficientes de Influência.

Conhecidas as deformações Y_m e E , determinou-se a deformação real (Y) do torno nos pontos considerados, pela expressão 38.

4.3.3 - DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES Y_m

Para cada carregamento descrito no item anterior, fez-se a leitura das deformações (Y_m) nos diversos apalpadores posicionados junto ao torno. Os valores médios obtidos em planilhas do tipo aquela mostrada na Fig.50 e relacionados no Apêndice I. São os mesmos valores obtidos nos testes do Método Indireto de Medição de Rigidez.

4.3.4 - DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES E

Logo após a determinação experimental das deformações Y_m , as planilhas da Fig.50 foram preenchidas e os valores - assim obtidos foram anotados na coluna 2 (dois) das planilhas cujo

modelo está na Fig.60.

Conhecidas as deformações, Y_m , fez-se o carregamento de cada apalpador com uma força F_y , sendo :

$$F_y = K \cdot Y_{my} \quad (41)$$

onde: y = indica o ponto onde é aplicada a força F .

K = constante de mola dos apalpadores =

$$K = \frac{100}{11} \frac{g}{\mu m} \quad (\text{Apêndice 4})$$

y_{my} = deformação Y_m do torno, medida no ponto y .

A aplicação da força F_y fez-se pressionando o apalpador principal com auxílio de outro apalpador de igual característica de mola, conforme descrição no item 4.2.1 . O posicionamento e sustentação do apalpador auxiliar foi com suporte magnético, tendo como apoio principal, o próprio torno. Em alguns casos, no lugar do suporte magnético, fez-se a sustentação manual do apalpador auxiliar com relativo sucesso. Neste caso houve a necessidade da ajuda de um operador para a leitura das deformações nos diversos apalpadores.

A força F_y foi aplicada isoladamente em cada um dos apalpadores principais e as deformações correspondentes dos mesmos, foram registradas no corpo principal das planilhas (ver Apêndice I5) cujo modelo está na figura 60. Como a sequência de operações permi

tiu obter diretamente os fatores $\alpha_{ij} F_j$ da planilha, os valores das deformações E_i (ver última linha da planilha) foram obtidas pela expressão :

$$E = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \cdot F_j$$

e de acordo com as considerações feitas no item 3.4.1 .

O quadro da Fig.61 relaciona a deformação medida (Y_m) com a deformação correspondente (E) da estrutura. Nas colunas 1 e 2 os valores de Y_m foram extraídos de ensaios de rigidez do torno-enquanto que as colunas 3 e 4 os valores dos Y_m são arbitrários . Pode-se observar que a influência da deformação (E) da estrutura - de referência nas medições simultâneas de rigidez estática em vári os pontos de uma máquina é mais significativa na correção das pequenas deformações desta.

O valor de E com relação aos valores de Y_m para cada apalpador corresponde a um percentual normalmente menor que 30% e para os apalpadores com Y_m maior que 120 micrometros tiveram seus valores corrigidos em percentual nunca maior que 3%.

4.3.5 - CORREÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MEDIDAS

Após a determinação das deformações Y_m e E , o Método Direto é idêntico ao Indireto descrito no Capítulo 3. A correção das deformações medidas no torno faz-se da forma já descrita no item 3.6.7, onde (Fig.57) :

$$Y = Y_m + E$$

4.3.6 - RIGIDEZ DA MÁQUINA TESTADA

Também neste método a representação da rigidez da máquina pode ser através de planilhas ou em gráficos característicos a cada tipo de máquina.

1		2		3		4	
Y _m	E	Y _m	E	Y _m	E	Y _m	E
	%		%		%		%
0	0,1	5	0,5	200	17	500	3,4
	-		10		0,8		0,7
0	0,6	0	1,0	200	3,0	500	3,7
	-		-		1,5		0,7
4	0,0	8	1,8	200	2,3	500	3,7
	0,0		22,5		1,2		0,7
7	2,2	13	24	200	2,1	500	4,5
	31,4		18,5		1,0		0,9
16	2,1	29	3,3	200	3,5	500	4,2
	13,1		11,4		1,7		0,8
34	2,8	117	3,6	200	3,0	500	6,7
	8,2		3,1		1,5		1,3
128	1,5	238	3,8	200	3,2	500	4,6
	1,2		1,6		1,6		0,9

FIG. 61 - Relação em percentagem entre a deformação E da estrutura e a deformação (Y_m) medida no teste de rigidez.

C A P Í T U L O V

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

5.1 - COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Pelo exposto nos capítulos anteriores, pode-se constatar que a diferença entre os métodos Direto e Indireto está na maneira de determinar o valor das deformações (E) da estrutura de apoio dos apalpadores. O conhecimento dos valores destas deformações permitirá corrigir os valores das deformações medidas nos ensaios de rigidez absoluta da máquina testada.

A estrutura de referência usada no método Indireto, tem suas características de rigidez definidas previamente; são os parâmetros da estrutura. A haste e a travessa de sustentação dos instrumentos têm seus modelos matemáticos simples, permitindo a determinação dos seus parâmetros. O mesmo não ocorre com a estrutura (tripé) que também deve ser elástica e possuir uma relação força - deformação linear. Elástica para que as medições possam ser repetidas e a relação deve ser linear porque normalmente tem-se conhecimento somente do acréscimo dado na força de mola que age na estrutura; diferença entre a força correspondente a deformação inicial e final da mola do apalpador. Para que o tripé adquirisse as características acima e tivesse uma rigidez relativamente alta, foi necessário o uso de várias travessas auxiliares que transformaram o tripé numa estrutura hiperestática de difícil análise matemática.

A solução apontada foi determinar a rigidez do tripé para pequenas forças aplicadas em pontos e direção definidos.

Esta solução simplista tirou a versatilidade do método que dificilmente pode ser aplicado em outras máquinas cujos pontos de medição das deformações estejam afastados dos pontos da estrutura cuja rigidez é conhecida.

No Método Direto não há necessidade de conhecimento prévio da rigidez da estrutura, já que as deformações correspondentes a cada teste são medidas logo após o mesmo. Isto faz com que a versatilidade da estrutura, formada por perfis interligados por juntas desmontáveis, permita medições de rigidez absoluta e deformações estáticas em máquinas diversas.

A determinação prévia dos parâmetros da estrutura (Método Indireto), implica na boa qualidade de fabricação dos seus componentes (suportes, uniões, hastes, etc), para que o comportamento destes seja sempre o mesmo. Uniões iguais devem ser fabricadas com igual precisão sob pena de se ter diferente comportamento da estrutura em montagens sucessivas. Os cuidados na montagem da estrutura devem proporcionar às uniões, as mesmas características elásticas que, aquelas que haviam na determinação dos parâmetros da mesma. Os parafusos devem ter um aperto igual nas sucessivas montagens. Quanto aos componentes da estrutura usada no Método Indireto, deve-se observar ainda a influência dos desgastes naturais dos mesmos por corrosão, oxidação e uso, além da mudança das características elásticas com o envelhecimento do material, nos parâmetros de rigidez previamente definidos. No Método Direto todas estas modificações nas características elásticas dos componentes da estrutura, ocorrem antes da determinação da rigidez própria, podendo portanto serem ignorados nos testes.

Tendo em vista que as ligações dos elementos da estrutura são por atrito pode ocorrer que as deformações sofridas - por esta no teste de uma máquina não estejam no mesmo campo elástico para o qual os parâmetros são válidos (Fig.62). Por exemplo, o campo OA é aquele para o qual a relação força-deformação foi determinado previamente e o trecho BC é o campo em que ocorrem as deformações devido ao teste da máquina. A variação angular no trecho AB seria devido a escorregamentos nas uniões, permitindo à estrutura assumir distinto parâmetro de rigidez. No Método Direto as deformações da estrutura são medidas com carregamento igual aquele - devido ao teste da máquina, conseqüentemente no mesmo campo elástico.

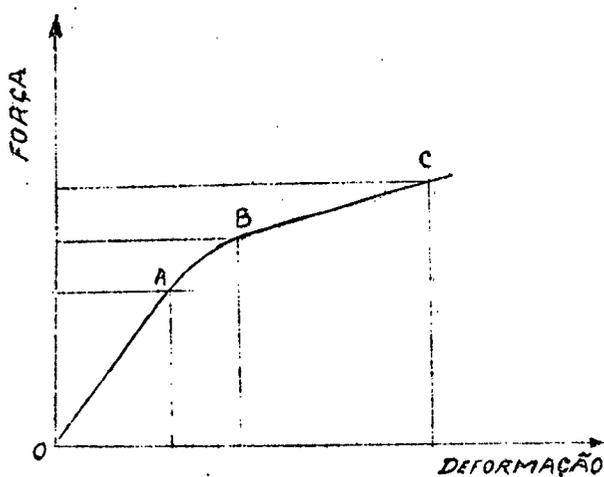


FIG.62 - MODIFICAÇÕES DA ELASTICIDADE DA ESTRUTURA

Quanto ao número de operadores dos instrumentos durante os testes, o Método Indireto apresenta-se mais favorável por exigir normalmente um operador enquanto o Direto exige um dispositivo adicional para suportar o apalpador auxiliar e não raras vezes

a presença de um operador auxiliar para carregar e manter carregado este apalpador. O outro operador faz as leituras das deformações nos diversos medidores. No Método Direto é possível dispensar o segundo operador, sendo necessário sofisticar o dispositivo de fixação do apalpador auxiliar.

O uso de apalpadores iguais simplifica os cálculos das deformações da estrutura em ambos os métodos, mas é mais significativo no Método Direto, pois para cada tipo de apalpador em uso no teste de rigidez, deve-se ter um auxiliar.

Em linhas de produção, onde o controle da qualidade pode ser feito em banca de testes fixas, enquanto que as máquinas seguem o fluxo, o Método Indireto se apresenta como mais rápido na obtenção dos resultados. Nestas condições, a estrutura permanece imutável, exceto alguns elementos terminais. A característica da estrutura determinada previamente pode ser admitida imutável - nos testes sucessivos de linha de produção.

5.2 - C O N C L U S ã O

Tendo em vista o exposto no item 5.1, além das considerações desenvolvidas ao longo do texto, pode-se concluir - que ambos os métodos são perfeitamente aplicáveis nos testes de rigidez estática absoluta de máquinas. A precisão dos resultados ficou indefinida em ambos os métodos admitindo-se que o Método Direto desenvolvido no Centro Tecnológico seja mais preciso que o Método Indireto convencional.

Para atender os interesses internos do Centro Tecnológico, no desenvolvimento de outras pesquisas que venham necessitar de um sistema absoluto de referência, o Método Direto é o mais recomendável. Esta afirmação fundamenta-se nas considerações-

expostas no ítem 5.1, além de inspirar maior confiança no pesquisador que desconhece o tratamento e cuidados dedicados a estrutura durante o período entre a data de determinação de seus parâmetros (1972) e data de uso nas experiências. A possibilidade de determinar novamente a rigidez da mesma, pelo Método Indireto, na época que se quer dela fazer uso, é totalmente desaconselhável, tendo em vista a grande quantidade de horas de trabalho que se deve dispor.

5.3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTRUTURA DE REFERÊNCIA

Os ensaios realizados para determinar a rigidez de cada um dos elementos da estrutura e os resultados dos testes de rigidez do torno, executado pelos dois métodos descritos nos capítulos 3 e 4, permitiram colher informações técnicas a respeito do comportamento elástico da estrutura. Tais informações poderão ser úteis em trabalhos posteriores executados no Centro Tecnológico.

A estrutura constituída de elementos elásticos apresenta-se bastante versátil. Permite a montagem dos apalpadores em qualquer direção. Nas máquinas de pequeno e médio porte (exemplo : as máquinas operatrizes de um modo geral) o acesso a pontos diversos das mesmas é possível com facilidade. Seus elementos de união suportam carregamento relativamente altos sem apresentarem deformações permanentes ou escorregamentos. Cada haste, terminal de fixação dos instrumentos, admite um momento fletor máximo de 35 kgf.cm, sem escorregamento, o que corresponde a uma força aproximada de 500-gramasforça aplicada trasversalmente no extremo livre da mesma ; a força de mola dos apalpadores TESA é de 80 gramasforça no máximo, e cada haste normalmente suporta apenas um apalpador. Os demais e

Elementos suportam cargas bem mais elevadas, tendo em vista a robustez dos elementos de união (vide desenhos no Apêndice 2). Por outro lado a elevada rigidez destes elementos de união dificulta o posicionamento dos instrumentos nos pontos desejados. O ajuste final é difícil exigindo muita paciência e treinamento.

Quanto a sua rigidez, pode-se concluir que é elevada; carregando-se um apalpador fixo a um terminal qualquer da estrutura com cargas de 11 gramas (corresponde a uma medição de 100 micrometros num apalpador TESA), a deformação total da estrutura no ponto não chega a ser superior a um micrômetro, i.é, 1% da deformação medida (ver planilhas da Fig.60 e 61). Para cargas de 55 gramas (medição de $Y_m = 500 \mu m$) os valores de E estão em torno de 2% dos valores de Y_m medido.

B I B L I O G R A F I A

- (1) KOENIGSBERGER AND TLUSTY, " MACHINE TOOL STRUCTURES ",
PERGAMON PRESS, LONDRES, 1970.
- (2) TIMOSHENKO, " RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS", AO LIVRO TÉCNICO
S.A., RIO DE JANEIRO, 1971.
- (3) SEELY SMITH, " ADVANCED MECHANICS OF MATERIAIS", WILWY TOPAN,
NEW YORK, 1952.
- (4) JAROSLAY KOZEL, " RIGIDEZ ESTÁTICA", CENTRO TECNOLÓGICO DA
UFSC, FLORIANÓPOLIS, 1971.
- (5) ADEMAR FONSECA, " CURSO DE MECÂNICA I E II ", AO LIVRO TÉCNI
CO, RIO DE JANEIRO, 1958.
- (6) F. PREVENZA, " PROJETISTA DE MÁQUINAS", ESCOLA PROTEC, SÃO -
PAULO, 1966.
- (7) HELIO HARTSTEIS, " CONTRIBUIÇÃO A ANÁLISE DA RIGIDEZ ESTÁTI-
CA DA ESTRUTURA DE TORNOS UNIVERSAIS", 1973.
- (8) PANLILIO, " ELEMENTARY THEORY OF STRUCTURAL STRENGHT", JOHN-
WILLEY E SONS, NEW YORK.
- (9) TLUSTY, J., " PRUFUNG DER PROTOTYPE UND FORSCHUNG IN
WERKZENGMASCHINENBOU, SCHWERINDUSTRIE DER CSR, HEFT 1, 1955.
- (10) ENGENHEIRO MODERNO - FEV-72 - ARTIGO " PESQUISA TRABALHA PARA
RESOLVER PROBLEMAS PRÁTICOS DA ENGENHARIA BRASILEIRA".
- (11) AUREO CAMPOS FERREIRA, " DETERMINAÇÃO DE UM ÍNDICE DE USINABI
LIDADE", CENTRO TECNOLÓGICO - UFSC - FPOLIS - 1971.
- (12) RUI AGUIAR DA SILVA LEME, " CURSO DE ESTATÍSTICA-ELEMENTOS",
AO LIVRO TÉCNICO S.A., 1963.