

11786

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS MA-
TERIAIS - PPGEMM

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE
CÉLULAS DE CARGA DE PLACA E DE ANEL

POR

JOÃO CARLOS PINHEIRO BECK
ENGENHEIRO METALÚRGICO

TRABALHO REALIZADO NO DEPARTAMENTO DE METALURGIA
DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFRGS, DENTRO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGEMM.

JANEIRO DE 1983

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE
CÉLULAS DE CARGA DE PLACA E DE ANEL

T E S E

APRESENTADA NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGE-
NHARIA METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGEMM, COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA METALÚRGICA

por

JOÃO CARLOS PINHEIRO BECK
ENGENHEIRO METALÚRGICO

1983

Esta TESE foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador

Prof. Dr. Ildon G. Borchardt

Banca Examinadora:

João A.H. da Jornada

Doutor em Física - Universidade Federal do RS,
Brasil

Dari A. Antonioli

Engenheiro Civil - Universidade Federal do RS,
Brasil

Lirio Schaeffer

Doutor em Engenharia - Universidade de Aachen,
Alemanha

Ildon G. Borchardt

Doutor em Ciências - Instituto Tecnológico de
Aeronáutica - Brasil

Coordenador do PPGEMM

Prof. Dr. Anildo Bristoti

Dedico este trabalho à minha
filha Beatriz

O maravilhoso na liberdade
é o encanto de possuí-la.

R E S U M O

Iniciamos o presente trabalho fazendo um estudo comparativo entre duas células de carga de compressão, ambas em formato cilíndrico, possuindo internamente, à meia altura do corpo, uma placa engastada. Estas duas células de carga são de aço SAE 1045; para uma delas adaptamos um modelo matemático teórico, através do qual foram pré-determinadas as suas dimensões, objetivando um comportamento ótimo no que se refere às distribuições de tensões e deformações, esta denominamos de Célula de Carga I. Na outra, denominada de Célula de Carga II, alteramos algumas dimensões, com a finalidade de comparar seu comportamento em relação à primeira. Também, no transcorrer do trabalho analisamos e comparamos os resultados matemáticos com os valores práticos encontrados. Frente aos resultados obtidos neste estudo prévio, projetamos, construímos e analisamos cinco outras células de carga (Células de Carga III, IV, V, VI e VII), em termos de geometria, material e tratamento térmico, visando o aperfeiçoamento de tais transdutores de força no que concerne a usinagem, resposta de sinal elétrico, limitações e aplicações industriais.

A B S T R A C T

We begin the present research with a comparative study of two cylindrical compression load cells with an internally placed plate at half of the full height of the cell body. The two load cells are built in SAE 1045 steel: For one of them we have adapted a theoretical mathematical model, through which, we have pre established its dimensions in function of an optimum behavior regarding the distribution of tensions and output: We called this one load cell I. In the other one, called load cell II, we have altered some dimensions, so as to compare its behavior in relation to the first cell. During the work we have also compared the mathematical results with the practical values found. Based on the results as obtained in this previous study, we have designed, built and analysed five other load cells (Load cells III, IV, V, VI and VII), concerning their geometry, material and thermal treatment, aiming at the perfectioning of such force transducers, regarding the casting, electrical signal response, industrial limitations and utilizations.

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

Ao prof. Dr. Ildon G. Borchardt pela paciência, dedicação e interesse mostrado na orientação deste trabalho.

Ao M.C. Milton A. Zaro pelas sugestões e colaborações prestadas na elaboração deste trabalho.

Ao Eng^o Dinarte Santos pelas sugestões e cooperação.

Ao Corpo Técnico, nas pessoas de Cristine Gr^unhäuser, Martin A. Behrens, Vilson J. Batista, Celso Alves e componentes dos laboratórios de Instrumentação e Conformação.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Pesquisa e à FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, pelo suporte financeiro deste trabalho.

Ao PPGEMM que possibilitou a execução deste trabalho.

Í N D I C E

RESUMO

SIMBOLOGIA E UNIDADES ADOTADAS

PRIMEIRA PARTE - CONSIDERAÇÕES GERAIS

1	INTRODUÇÃO	1-1
2	CONCEITUAÇÃO DOS TERMOS	2-1
2.1	Transdutor	2-1
2.2	Transdutor eletromecânico	2-1
2.3	Célula de Carga	2-1
2.4	Extensômetro de Resistência elétrica	2-2
2.5	Material estrutural	2-2
2.6	Características de operação dos extensômetros de Resistência elétrica	2-2
2.6.1	Fatores favoráveis	2-2
2.6.2	Fatores limitantes	2-3
3	CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DAS CÉLULAS DE CARGA ...	3-1
3.1	Determinação do desvio de linearidade	3-1
3.2	Determinação do desvio entre carregamento e des- carregamento (histerese).....	3-2
3.3	Determinação da repetitividade	3-2
3.4	Variação da tensão de saída com a temperatura ..	3-3
3.5	Sobrecarga	3-3
3.6	Sensibilidade das Células de Carga	3-4
3.7	Determinação analítica do desvio de linearidade	3-7
4	LIGAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	
	UTILIZADOS	4-1
4.1	Ligação e Colagem dos Extensômetros	4-1

4.1.1	Ligação dos extensômetros	4-1
4.1.2	Colagem dos extensômetros	4-1
4.2	Material e tratamento térmico empregados	4-2
4.2.1	Material empregado na confecção das células ...	4-2
4.2.2	Tratamento térmico utilizado	4-4
4.3	Relação e características técnicas do equipamento utilizado	4-5

SEGUNDA PARTE - CÉLULAS DE CARGA DE PLACA

5	SEQUÊNCIA DE PROJETO DE UMA CÉLULA DE CARGA DE PLACA.....	5-1
5.1	Dados necessários ao projeto	5-1
5.2	Cálculo do pino	5-1
5.3	Determinação dos momentos Radiais e Tangenciais próximos ao centro	5-2
5.4	Determinação da espessura da placa	5-3
5.5	Determinação da espessura do anel	5-3
5.6	Determinação da altura do anel	5-4
5.7	Determinação da sensibilidade da célula de carga ...	5-6
6	CÉLULAS DE CARGA I e II	6-1
6.1	Confecção das células de carga I e II	6-1
6.2	Valores numéricos utilizados na célula I	6-4
6.3	Procedimentos na tomada de dados	6-17
6.4	Condições em que foram realizados os testes	6-21
6.5	Adaptabilidade do modelo	6-23
6.6	Confronto entre valores calculados e medidos.....	6-24
6.7	Resultados obtidos	6-26
6.8	Considerações sobre os modelos matemáticos	6-28
7	CÉLULA DE CARGA PTI	7-1
7.1	Finalidade	7-1

7.2 Projeto	7-2
7.3 Ensaios	7-5
7.4 Alinearidade	7-6
7.5 Repetitividade	7-6
7.6 Calibração	7-7
8 CÉLULA DE CARGA IV	8-1
8.1 Finalidade	8-1
8.2 Projeto	8-2
8.3 Cálculo das deformações	8-8
8.4 Ensaios	8-10
8.5 Alinearidade	8-11
8.6 Repetitividade	8-11
8.7 Calibração	8-13
9 CÉLULA DE CARGA V	9-1
9.1 Finalidade	9-1
9.2 Projeto	9-1
9.3 Cálculo das deformações	9-4
9.4 Ensaios	9-5
9.5 Alinearidade	9-6
9.6 Repetitividade	9-6
9.7 Calibração	9-7

**TERCEIRA PARTE - CÉLULA DE CARGA TIPO ANEL,
APOIADO LATERALMENTE**

10 INTRODUÇÃO	10-1
11 CÉLULA DE CARGA VI	11-1
11.1 Finalidade	11-1
11.2 Projeto	11-2
11.3 Cálculo das deformações	11-10
11.4 Ensaios	11-11
11.5 Alinearidade	11-12
11.6 Repetitividade	11-13

11.7 Calibração	11-13
12 CÉLULA DE CARGA VI	12-1
12.1 Finalidade	12-1
12.2 Projeto	12-1
12.3 Cálculo das deformações	12-4
12.4 Ensaio	12-5
12.5 Alinearidade	12-6
12.6 Repetitividade	12-6
12.7 Calibração	12-6
12.8 Características fundamentais das sete células de carga construídas	12-9
13 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DE TRABALHO....	13-1
13.1 Conclusões	13-1
13.2 Sugestões para continuidade de trabalho	13-3

14 RELAÇÃO DAS FIGURAS

14.1	Determinação do desvio de linearidade, Fig, 3.1 ..	3-1
14.2	Determinação do desvio entre carregamento e descarregamento, Fig. 3.2	3-2
14.3	Determinação da repetitividade, Fig. 3.3	3-3
14.4	Posicionamento dos extensômetros, Fig. 4.1	4-3
14.5	Ligações elétricas dos extensômetros Fig. 4.2	4-3
14.6	Equipamento utilizado, Fig. 4.3	4-7
14.7	Máquina de ensaio à fadiga, Fig. 4.4	4-7
14.8	Vista externa da Célula I, Fig. 6.1	6-2
14.9	Vista externa da Célula II, Fig. 6.2	6-2
14.10	Vista posterior Célula I, Fig. 6.3	6-3
14.11	Vista posterior Célula II, Fig. 6.4	6-3
14.12	Corte Célula I, Fig. 6.5A	6-9
14.13	Vista superior Célula I, Fig. 6.5B	6-9
14.14	Tampa da Célula I, Fig. 6-5C	6-10
14.15	Vista superior da tampa da Célula I, Fig. 6.5D	6-10
14.16	Pino Pequeno, Fig. 6.5E	6-11
14.17	Célula I, Corte com dimensionamento, Fig. 6.5F ..	6-11
14.18	Célula I, vista superior sem a tampa, Fig. 6.5G ..	6-12
14.19	Célula II, Corte, Fig. 6.6A	6-13
14.20	Vista superior da Célula II, Fig. 6.6B	6-14
14.21	Tampa da Célula II, Fig. 6.6C	6-14
14.22	Vista superior da Célula II, Fig. 6.6D	6-15
14.23	Pino pequeno da Célula II, Fig. 6.6E	6-15
14.24	Célula II, Corte com dimensionamento, Fig. 6.6F ..	6-16
14.25	Célula II, vista superior sem a tampa, Fig. 6.6G ..	6-16

14.26	Calibração da célula constante na máquina RPU6, Fig. 6.7	6-20
14.27	Corpo, tampa e pino (pequeno) da Célula I, Fig. 6.8..	6-22
14.28	Pino II (grande) utilizado, Fig. 6.9	6-22
14.29	Distribuição das deformações na Célula I, Fig. 6.10.	6-25
14.30	Gráfico das Células I e II, Fig. 6.11	6-27
14.31	Célula de Carga III em corte; fig. 7.1	7-3
14.32	Vista externa da Célula de Carga III, Fig. 7.2	7-4
14.33	Vista externa das células I, II e III fig. 7.3.....	7-4
14.34	Calibração da Célula III, fig. 7.4	7-7
14.35	Célula de Carga IV, em corte, Fig. 8.1	8-3
14.36	Calibração da Célula IV, fig. 8.2	8-13
14.37	Célula de Carga V, em corte, Fig. 9.1	9-3
14.38	Calibração da Célula V, Fig. 9.2	9-7
14.39	Célula de Carga VI, em corte, Fig. 10.1	11-3
14.40	Calibração da Célula VI, Fig. 10.2	11-14
14.41	Célula de Carga VII, em corte, Fig. 12.1	12-3
14.42	Calibração da Célula VII, Fig. 12.2	12-7
14.43	Vista em conjunto das Células I, II, III, IV, V, VI e VII, Fig. 12.3	12-8
14.44	Outra vista do conjunto de células, Fig. 12.4.....	12-8
14.45	Diagrama do processamento da informação da excitação à resposta, Fig. A.1	A-1
14.46	Diagrama em bloco das unidades de um transdutor de força, Fig. A.2	A-2
14.47	Placa de espessura h, Fig. B.1	B-3
14.48	Momentos atuantes no engastamento da placa, Fig. B.2	B-3

14.49	Seção axial da placa, fig. B.3	B-5
14.50	Tensões atuantes no prisma elementar, fig. B.4	B-5
14.51	Condições de equilíbrio do prisma elementar, fig. B.5	B-10
14.52	Distribuição dos momentos para uma carga pontual aplicada no centro, fig. B.6	B-15
14.53	Distribuição dos momentos para uma carga distri- buída no centro, fig. B.7	B-15
14.54	Distribuição dos momentos para uma carga circun- ferencialmente distribuída, fig. B.8	B-19
14.55	Flexão de uma barra de grande curvatura, fig. C.1	C-2
14.56	Deformações ocorrentes numa barra, fig. C.2	C-2
14.57	Condições de equilíbrio do elementar AB, fig. C.3	C-2
14.58	Seção transversal de uma barra qualquer, em que $y'y$ é eixo de simetria, fig. C.4	C-6
14.59	Posição da linha neutra, fig. C.5	C-6
14.60	Seção transversal de um anel, fig. C.6	C-8
14.61	Diagrama das deformações para o caso de um anel fig. C.7	C-8

15 RELAÇÃO DAS TABELAS

15.1	Tabela I, Calibração da Célula padrão	6-18
15.2	Tabela II, resultados obtidos nas diferentes con- dições	6-26
15.3	Tabela III, calibração da célula III, valores tí- picos	7-5

15.4	Tabela IV, calibração da célula III, valores médios	7-6
15.5	Tabela V, calibração da célula IV, valores típicos	7-10
15.6	Tabela VI, calibração da célula IV, valores médios	8-12
15.7	Tabela VII, calibração da célula V, valores típicos	9-5
15.8	Tabela VIII, calibração da célula V, valores médios	9-6
15.9	Tabela IX, calibração da célula VI, valores médios	11-12
15.10	Tabela X, calibração da célula VII, valores médios	12-5
15.11	Tabela XI, características fundamentais das sete células de carga construídas	12-9

APÊNDICE A - Diagramas	A-1
APÊNDICE B - Flexão de placas circulares, submetidas a cargas simétricas	B-1
APÊNDICE C - Flexão de barras de grande curvatura	C-1
APÊNDICE D - Dados obtidos nos ensaios	D-1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	R-1

SIGNIFICADO DOS SÍMBOLOS UTILIZADOS

A		Desvio de linearidade
a	mm	Raio de apoio do pino
b	mm	Raio da placa
b'		Comprimento elástico do cilindro
C		Cosseno hiperbólico de ξ^*
c		Cosseno de ξ^*
d	mm	Largura da superfície de apoio do cilindro
D		Módulo de rigidez à flexão
E	N/mm ²	Módulo de elasticidade
e	mm	Distância da linha neutra ao centro
F	mm ²	Área
Fe		Momento estático da seção com respeito a linha neutra
H		Histerese
h	mm	Espessura da placa
h'	mm	Espessura da parede do cilindro
L	mm	Altura do cilindro
M _r	Nmm/mm	Momento radial
M _t	Nmm/mm	Momento tangencial
p	N/mm ²	Pressão
P	N	Força
R	mm	Raio da placa (apoio pontual)
R'		Repetitividade
r _i	mm	Raio interno
r _e	mm	Raio externo

s		Seno Hiperbólico de ξ^*
s'		Sensibilidade das células de carga
s		Seno de ξ^*
sg		Coefficiente de segurança
u	volt	Variação de tensão
v	Volt	Fundo de escala
v_i		Dados correspondentes a célula teste
w		Flecha
x_i		Dados correspondentes à célula padrão
y	mm	Ordenada a partir da linha neutra
ϵ_r	mm/mm	Deformação radial
ϵ_t	mm/mm	Deformação tangencial
θ	rad	Deformação angular
μ		Coefficiente de Poisson
σ_e	N/mm ²	Tensão de escoamento
σ_r	N/mm ²	Tensão radial
σ_t	N/mm	Tensão tangencial
$\psi_{(P/M=1)}$	rad/Nmm/mm	Ângulo de giro da placa para momento unitário
$\psi_{(a/M=1)}$	rad/Nmm/mm	Ângulo de giro do anel para momento unitário
ξ^*		Razão entre altura e comprimento elástico

Células de carga são dispositivos intensamente utilizados e com vasta aplicação em vários ramos da indústria. As principais razões de sua imensa utilização, estão intimamente relacionadas à alta fidelidade de resposta, custo baixo, dimensões reduzidas (mesmo para aplicações de grandes cargas) e também porque permitem medições dinâmicas. O objetivo precípuo de uma célula de carga é fornecer um sinal elétrico sempre que um esforço for aplicado sobre ela. Dois tipos de célula de carga muito utilizados são: as cilíndricas e as de placa. As chamadas de cilíndricas são constituídas de um anel cilíndrico (em geral de aço ou de alumínio) furado axialmente. Os elementos responsáveis pela emissão do sinal elétrico (os extensômetros) são colados na superfície lateral externa, ligados em circuito tipo ponte (1), com a finalidade de fornecer um desbalanço de tensão, proporcional a variação de resistência, conseqüente da deformação elástica submetida devido ao esforço aplicado. Este esforço é aplicado axialmente e de tal sorte que deforme o anel dentro da sua região elástica. Já as células de placa constituem-se de um disco plano (placa sensora), possuem na parte inferior os extensômetros e na parte superior (outra face) centralmente se apóia um pino, no qual o esforço é exercido e este é transmitido ao disco (2), (3), (4).

Um trabalho utilizando uma placa sensora plana suportada por duas capas unidade entre si foi realizado por SCHAEFFER, L. & BORCHARDT, I.G. & CARVALHO, L. (2).

No presente trabalho, inicia-se apresentando o projeto de uma célula de carga que possui a placa sensora engastada a meia altura nas paredes do cilindro, possuindo o pino deslizante na tampa. Construiu-se inicialmente duas células de carga (células I e II): na primeira efetuou-se adaptações teóricas prévias para o seu dimensionamento, na segunda alterou-se algumas dimensões, realizando-se comparações posteriores entre as duas. Com base nos resultados obtidos, projetou-se, construiu-se e analisou-se cinco outras células de carga (Células III, IV, V, VI e VII).

A célula de carga III diferencia-se das células de carga I e II, pelo fato de possuir o pino engastado na placa sensora e, devido à existência de roscas, servir para tração e compressão (5), (6), (7).

As células de carga IV e V foram executadas, utilizando-se um segundo modelo matemático para realizar o projeto. Fundamentalmente ambas possuem o pino engastado na placa sensora, que é a própria tampa superior da célula.

As células de carga VI e VII não são de placa, mas do tipo que se resolveu definir como:anel apoiado lateralmente. Esta geometria surgiu das limitações impostas às anteriores e utilizou-se um terceiro modelo matemático para realizar o projeto, segundo Feodosiev^{(5),(8)}.

O objetivo do projeto e construção destas células, foi o aperfeiçoamento de tais transdutores de força no que concerne à usinagem, resposta de sinal elétrico, limitações e aplicações industriais.

2 CONCEITUAÇÃO DOS TERMOS

2.1 TRANSDUTOR

É um dispositivo que transforma um tipo de energia em outro ^{(1), (10), (12)}.

2.2 TRANSDUTOR ELETRO-MECÂNICO

Dispositivo que transforma a energia mecânica de entrada no sistema, num sinal elétrico equivalente, medindo e/ou controlando o fenômeno de entrada ^{(1), (10)}.

2.3 CÉLULA DE CARGA ^{(9), (11), (18)}

Transdutores eletro-mecânicos são usados para medir pressão de fluidos, peso, aceleração, torque ... A palavra célula é freqüentemente utilizada para descrever um transdutor compacto (Ex. célula de pressão, célula de carga, célula de torque ...). Alguns transdutores possuem seu nome familiar de acordo com o fenômeno físico que descrevem, assim por exemplo: Vibrômetros, Extensômetros e Acelerômetros ^{(3), (12)}.

Transdutores podem ser fabricados com base em diferentes princípios de operação (resistivo, indutivo, piezoelétrico, capacitivo, etc.), a depender da natureza física da transformação de energia. ⁽¹³⁾

2.4 EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Elemento resistivo, afixado sobre um corpo sólido através de convenientes técnicas, de tal sorte que a resistência do elemento irá variar assim que a superfície ao qual está afixado, deformar^{(3), (14), (15)}.

2.5 MATERIAL ESTRUTURAL^{(18), (19), (20)}

O extensômetro, portanto, responde à deformação superficial exercida na estrutura, e em usos normais, uma conveniente estrutura elástica deve ser de material cuidadosamente escolhido e dimensionado na utilização de um transdutor. Este elemento elástico funciona como uma "mola", já que ele proverá a requerida resistência e força restauradora.⁽³⁾ Logo, a configuração e seleção do material elástico, representam a mais crítica decisão a ser tomada no projeto de um transdutor^{(3), (10)}.

2.6 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.6.1 Fatores Favoráveis^{(3), (10), (16)}

I. Pequenas dimensões e pouca massa aliadas a uma elevada rigidez do material utilizado na confecção da célula, proporcionam uma elevada frequência de ressonância, permitindo operação numa larga faixa de frequência.

II. Excelente linearidade sobre uma larga faixa de

tensão. Em geral a linearidade é limitada pelas características do material em que está aplicado e da geometria do transdutor, antes do que pelos "strain-gages" somente.

III. Altamente estável com o tempo. Desde que protegidos contra a agressividade do meio, sua calibração permanece inalterável por muito tempo.

IV. Custo relativamente baixo. Vem a ser um dos principais fatores de sua utilização.

V. Simplicidade do circuito de saída. Tais extensômetros podem ser utilizados em sistemas tanto de excitação c. a. quanto de excitação c.c., pois são insensíveis à frequência da voltagem de alimentação. Em geral operam na configuração de ponte de wheatstone.

VI. Medições Dinâmicas, podem ser facilmente executadas, sendo que a frequência máxima que pode ser medida geralmente é determinada antes pela aparelhagem utilizada que pela célula de carga.

2.6.2 Fatores Limitantes^{(3), (4), (10), (17)}

I. Degradação térmica. Ao empregar-se materiais orgânicos, tais como isolantes, adesivos e demais revestimentos de proteção, apesar da praticidade e embora facilmente utilizáveis, as aplicações em altas temperaturas ficam limitadas. Pelas próprias características destes materiais empregados, a máxima

temperatura de operação é em torno de 260°C, isto a depender das especificações do material empregado, esquema de operação, tempo de exposição, etc..

II. Baixos sinais de saída. Devido aos baixos sinais de saída, as características de: amplificação de sinal estável, controle das voltagens de excitação, ausência de ruídos, compensação de efeitos térmicos na variação de resistência dos strain gages, são essenciais para uma precisa leitura de saída.

III. Cuidados na instalação e utilização. Os "strain gages" são materiais muito sensíveis; portanto, sua instalação, manuseio e uso devem ser cuidadosos, seguindo-se um rigoroso controle.

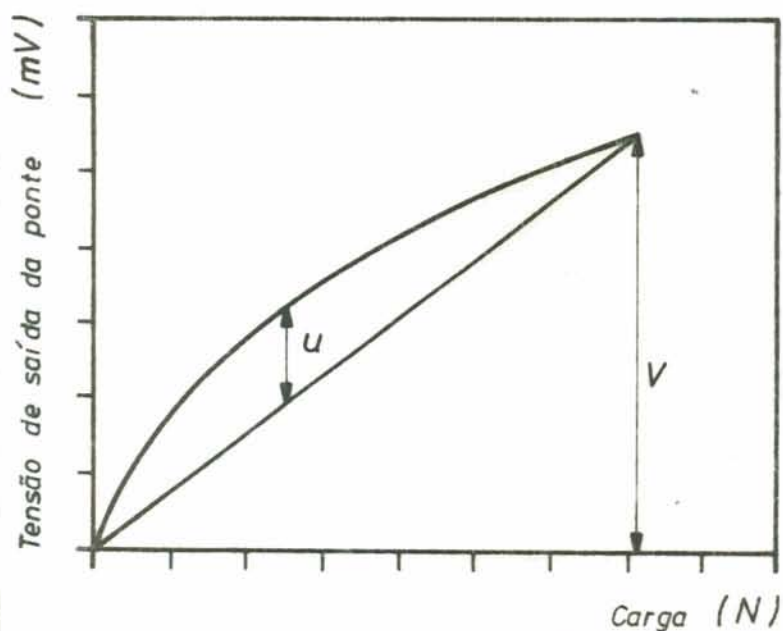
IV. Os strain gages devem ser bem protegidos, pois em caso contrário sua vida útil é tremendamente limitada. Sendo atingidos pela água são destruídos, oxidados ou degradados na sua performance, por esta razão o transdutor deve ser hermeticamente selado.

3 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DAS CÉLULAS DE CARGA^{(3), (4)}

3.1 DETERMINAÇÃO DO DESVIO DE LINEARIDADE (Alinearidade)

Para determinar o desvio de linearidade:

Efetua-se a média de 5 ensaios de carregamento e descarregamentos lentos, incluindo-se o valor máximo de carga para o qual a célula foi projetada. Com estes valores médios traçam-se as curvas força x tensão para os carregamentos e descarregamentos. A seguir traça-se uma reta passando pelo ponto (0,0) e pelo ponto de máxima carga e respectiva tensão encontrada. Através da maior diferença existente entre a curva de calibração e a reta, calcula-se o desvio de linearidade, dividindo-se esta diferença máxima (em mV) pelo máximo valor de tensão lido na saída da ponte, vezes cem. Veja-se figura 3.1.

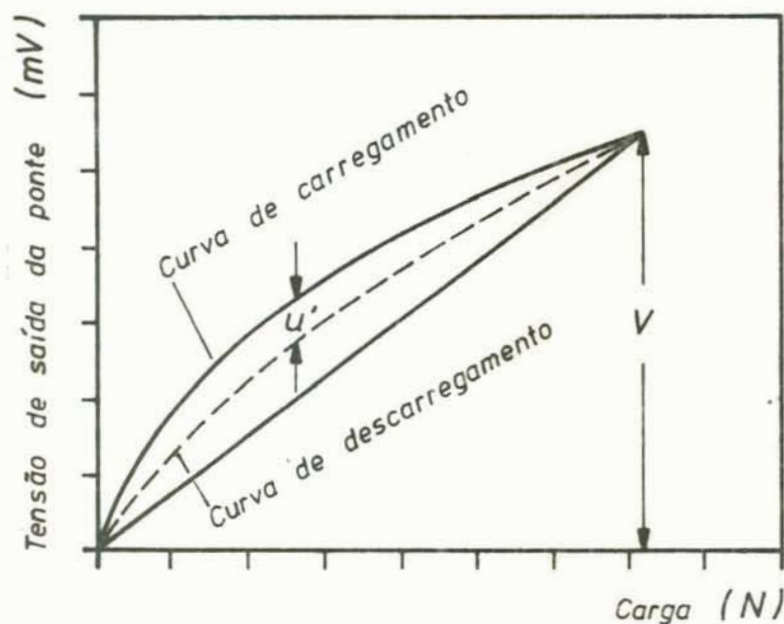


$$A = \frac{u}{V} \cdot 100 \text{ (mV/mV)}$$

Figura 3.1

3.2 DETERMINAÇÃO DO DESVIO ENTRE CARREGAMENTO E DESCARREGAMENTO (Histerese).^{(3), (4), (21), (31)}

Com os valores médios obtidos nos 5 ensaios e traçadas as correspondentes curvas de calibração dos carregamentos e descarregamentos, mede-se a maior abertura. Este valor dividido pela tensão máxima e multiplicado por cem, nos fornece o valor percentual do desvio entre carregamento e descarregamento H (Histerese). Veja-se figura 3.2.



$$H = \frac{u'}{V} \cdot 100 \text{ (mV/mV)}$$

Figura 3.2

3.3 DETERMINAÇÃO DA REPETITIVIDADE^{(3), (23), (24), (25)}

Efetuem-se cinco ensaios, em dias diferentes (nas mesmas condições) e toma-se a máxima diferença ocorrida no valor da tensão (mV). Este valor, dividido pela tensão máxima de fundo de escala vezes cem é a repetitividade. Veja-se figura 3.3.

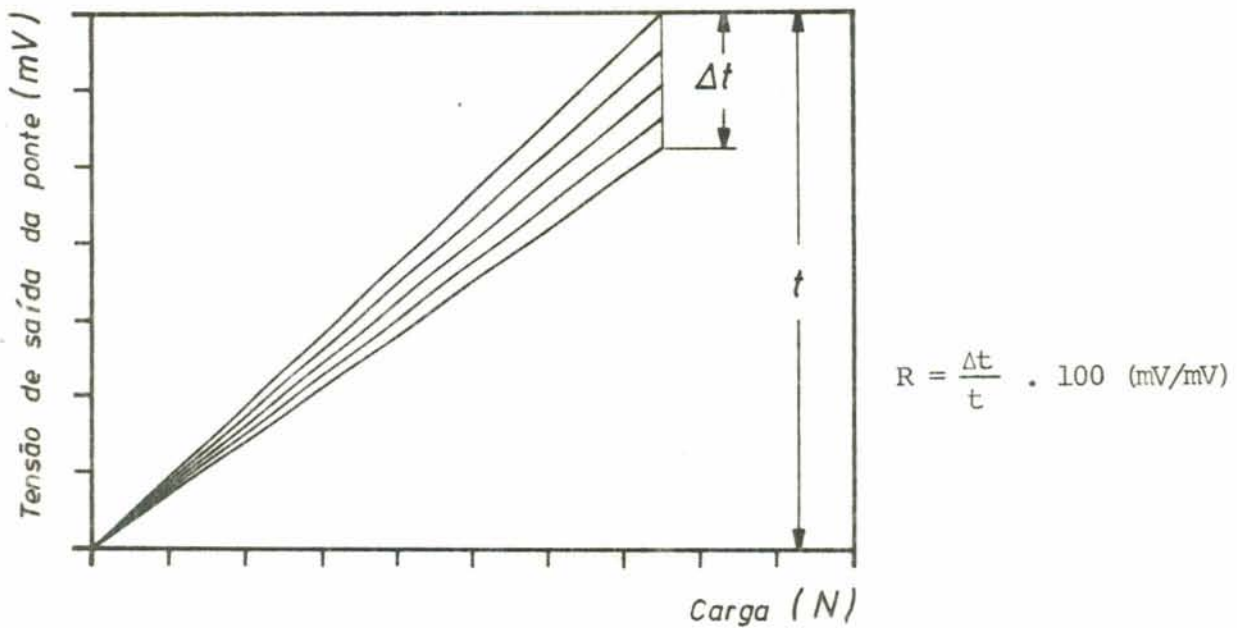


Figura 3.3

3.4 VARIAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA COM A TEMPERATURA (3), (4)

Efetua-se um carregamento até a metade da carga nominal (que é o valor de carga para o qual a célula foi projetada). Varia-se a temperatura da célula dentro dos limites desejados (por ex. 20 a 30°C) em estado de equilíbrio térmico. Verifica-se a variação do sinal de saída da célula com a temperatura, dividindo-se a variação máxima do sinal (em mV) pelo valor do fundo de escala multiplicado por cem. Esta variação será, portanto, para uma faixa determinada de temperatura.

3.5 SOBRECARGA (N) (3)

É o valor máximo de carga que pode ser aplicado acima da carga nominal sem que haja danos ou variações nas ca-

racterísticas da célula. É expressa em percentagem da carga nominal. Obtêm-se através de tentativas até a danificação da célula.

3.6 SENSIBILIDADE DAS CÉLULAS DE CARGA ^{(3), (25), (26)}

A sensibilidade é uma grandeza de fundamental importância a ser considerada no projeto das células de carga, já que a força a medir será traduzida em termos de sinal elétrico que deverá ser "lido", por meio do transdutor. Portanto, a sensibilidade nos informará o que poderá ser lido, em assim sendo, sua definição deve ser suficientemente abrangente, para que dela se possam extrair básicas e precisas informações.

Consideremos E = módulo de elasticidade

σ_e = tensão de escoamento

k = fator gage

ϵ = deformação relativa

P_m = força máxima

F = área

s_g = coeficiente de segurança

Presupondo-se que; o material constituinte da célula de carga é dútil, obedece a lei de Hooke, o campo de tensões é unidimensional e é válida a teoria de resistência de Guest, podemos escrever

$$\epsilon_m = \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g}, \text{ sendo } \frac{\sigma}{\sigma_e} = \frac{P/F}{P_m/F} = P/P_m,$$

$$\text{logo } \epsilon = \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g} \times \frac{P}{P_m}$$

Definindo-se como sensibilidade mecânica (para um strain gauge ativo):

$$S' = \frac{\epsilon}{P/P_m} = \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g}, \text{ assim } S' = \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g}$$

Tem-se a sensibilidade dependendo, portanto, do material empregado, tratamento térmico utilizado e coeficiente de segurança usado, quanto a uma deformação unidirecional.

Para um transdutor de força ao definir-se a sensibilidade, levou-se em consideração para tal, sua dependência inerente: ao material constitutivo, às distribuições das deformações e aos "strain gauges".

Portanto, são válidas as seguintes considerações a respeito da sensibilidade para quatro diferentes tipos de células de carga com quatro "Strain gauges" ativos e utilizando-se uma ligação do tipo "ponte inteira" (onde $S'_p, S'_l, S'_c, S'_{cl}$ são definidos como a sensibilidade mecânica e elétrica respectivamente das placas, lâminas, colunas e cilindros apoiados lateralmente):

a) Célula de carga de placa

Dois extensômetros na posição radial e dois na posição tangencial, portanto, dois indicando 70% da deformação máxima e os outros dois 30%.

$$S' = \frac{\epsilon}{P/P_m} \cdot \frac{k}{4} = \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g} (2 \times 0,7 + 2 \times 0,3) \cdot \frac{k}{4} = 2 \cdot \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g} \cdot \frac{k}{4}$$

Evidente que a deformação máxima é limitada pela tensão de escoamento do material.

b) Célula de carga em formato de lâmina

Dois extensômetros na parte superior e dois na parte inferior.

$$S'_c = \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g} (2x_1 + 2x_2) \cdot \frac{k}{4} = 4 \cdot \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g} \cdot \frac{k}{4}$$

c) Célula de carga em forma de coluna.

Dois extensômetros na posição longitudinal e dois em posição transversal.

$$S'_c = \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g} (2x_1 + 2x_2, 3) \cdot \frac{k}{4} = 2,6 \cdot \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g} \cdot \frac{k}{4}$$

Onde 0,3 é o coeficiente de Poisson.

d) Célula de carga em forma de cilindro apoiado lateralmente.

Quatro extensômetros colocados em posições diametralmente opostas.

$$S'_c = \frac{\sigma_e}{E \cdot s_g} (2x_1 + 2x_2, 57) \cdot \frac{k}{4}$$

Onde 0,57 representa uma razão entre as máximas deformações ocorrentes na geometria considerada.

Temos através do retro-exposto uma maneira simples de avaliar a sensibilidade de quatro tipos de células de carga.

3.7 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DO DESVIO LINEARIDADE

Utilizamos para as células de carga analisadas, o mesmo conceito de erro utilizado pela American Society for Testing Materials (ASTM) ⁽⁴⁾ para o caso dos strain gauges: "é o valor obtido pela subtração, do valor real da deformação determinada pelo aparelho da calibração, do valor indicado da deformação dada pelo "strain gauge". Erros atribuídos ao sistema de medida são excluídos.

Para o caso presente é fundamental que a curva traçadora da relação Força x Deformação passe pelo ponto zero. Para isso e objetivação dos cálculos, resolvemos adaptar um método simplificado de regressão linear para a determinação da linearidade, que seja mais identificado com nossa realidade. Força a passagem de características peso aplicado x sinal de saída, pelo zero. Consiste no seguinte:

Sejam x_i : dados correspondentes a célula de carga padrão (constante na RPU 6)

v_i : dados correspondentes à célula em teste

$$i = 1, \dots, n$$

Determina-se

$$k = \frac{\sum v_i}{\sum x_i}$$

Onde

$$P_i = \frac{1}{k} \times v_i$$

Toma-se a maior diferença em valor absoluto

$$\Delta m = \left[x_i - P_i \right]$$

$$A \text{ (Alinearidade)} = \frac{\Delta m \times 100}{x_m}$$

Onde x_m é o maior valor lido, correspondente à célula de referência (fundo de escala).

Este foi o método que empregamos para determinar a alinearidade das células, nos diferentes experimentos efetuados.

4 LIGAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.1 LIGAÇÃO E COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS ⁽³⁾, (11), (12), (26)

4.1.1 **Ligação dos Extensômetros**

Utilizou-se o circuito elétrico em configuração de Ponte de Wheatstone, montado com extensômetros elétricos colados na placa da célula (tipo ponte inteira). Estes extensômetros são convenientemente dispostos, de tal sorte que forneçam a leitura da deformação diferencial (produzida pela força aplicada) entre os pontos onde estão colados e o sinal elétrico recebido dependa da distribuição das deformações na placa. No caso presente, onde utilizamos um circuito tipo ponte inteira, dois dos citados extensômetros elétricos, sofrem compressão (indicados por 1 e 3, fig. 4.1) e os outros dois estão sujeitos à tração (indicados por 2 e 4, fig. 4.1). Com base nestes princípios é que foram colados os extensômetros em todas as sete células de carga construídas (fig. 4.2). Esta é uma distribuição em que o sinal elétrico na saída da ponte é proporcional à soma das deformações dos "strain-gauges".

4.1.2 **Colagem dos Extensômetros** ⁽³⁾

Utilizamos extensômetros com as seguintes características:

Marca: HBM

Tipo: 3/120 LY 11

Compensação de temperatura: $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Resistência: $120,0\Omega \pm 0,2\%$

Gage factor(k): $2,00 \pm 1,0\%$

Coefficiente de temperatura do gage factor:

$95 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Número de controle: V - 21711/4

Cola utilizada: à base de éster de cianoacrilato, marca "Super Bonder".

Revestimento de proteção: borracha de silicone

As superfícies das células nas quais os "strain gauges" foram colados, foram previamente polidas e lavadas com éter sulfúrico antes da colagem, para remover gorduras, poeiras e quaisquer outros corpos estranhos (figs. 6.3 e 6.4).

4.2 MATERIAL E TRATAMENTO TÉRMICO EMPREGADOS (13), (15)

4.2.1 Material empregado na confecção das células

As células da carga I, II e III foram executadas em aço SAE1045, possuindo a seguinte composição química aproximada (de acordo com o fornecedor):

Carbono	0,48%
Fósforo	0,017%
Silício	0,250%
Manganês	0,675%
Enxôfre	0,025%

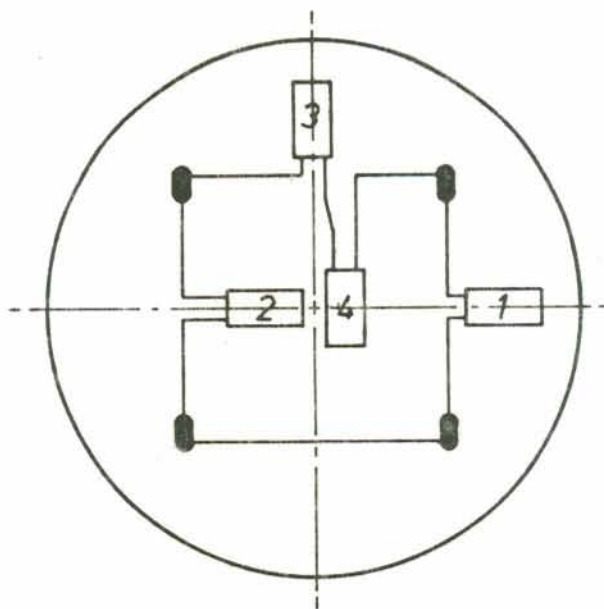


Fig. 4.1 - Mostra o posicionamento dos extensômetros na parte posterior da placa sensora. Três em posição radial e um em posição transversal (no caso das células I e II).

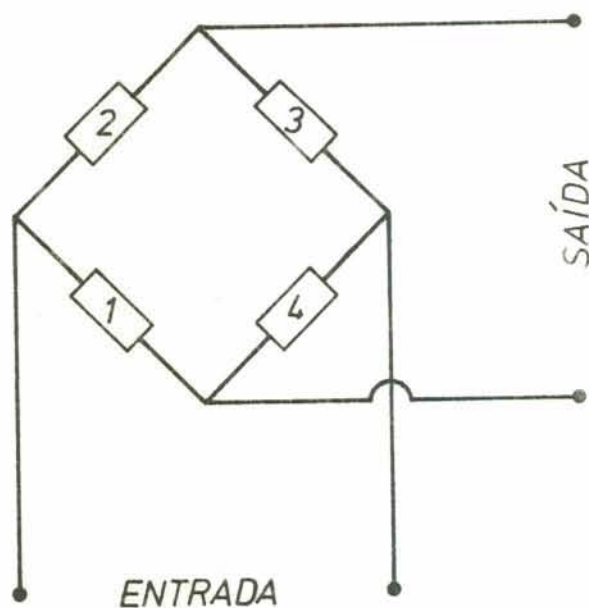


Fig. 4.2 - Esquematiza as ligações elétricas utilizadas com a finalidade de se obter sensibilidade ótima.

As células de carga V e VI foram executadas em aço SAE4340 possuindo a seguinte composição química aproximada (de acordo com o fornecedor):

Carbono	0,40%
Manganês	0,70%
Cromo	0,80%
Níquel	1,80%
Molibdnênio	0,25%

As células de carga IV e VII foram executadas em aço SAED6 possuindo a seguinte composição química aproximada (de acordo com o fornecedor):

Carbono	2,1%
Manganês	0,30%
Cromo	11,50%
Tungstênio	0,70%
Vanádio	0,20%

4.2.2 Tratamento térmico utilizado ⁽³⁸⁾

As células I, II, III, VI e VII não foram tratadas termicamente.

As células IV e V foram temperadas e revenidas para uma dureza de 48 R_C.

Têmpera: para efetuarmos a têmpera usamos 2 minutos por milímetro de espessura média a 830°C. Como espessura média tomamos a espessura da placa, altura do pino e espessura do anel dividindo-os por três.

Revenido: para o revenimento, deixamos as células 3 minutos por milímetro de espessura a 330°C num forno de revenimento.

4.3 RELAÇÃO E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO EQUIPAMENTO UTILIZADO

MULTIMETRO DIGITAL

Marca	: Philips
Modelo	: 2421
Tensão de alimentação	: 220V
Imprecisão	: 0,2%
Resistência interna	: > 10 M Ω
Quantidade	: dois aparelhos
Menor divisão	: 0,01 mV

PONTE AMPLIFICADORA DE FREQUÊNCIA PORTADORA

Marca	: HBM
Modelo	: KWS/T-5
Tensão de alimentação	: 220V
Imprecisão	: 0,5%
Quantidade	: dois aparelhos

MÁQUINA DE ENSAIO À FADIGA

Marca	: W P M
Modelo	: R P U 6
Tensão de alimentação	: 220V

Velocidade de aplicação de força: 1 mm/min

PRENSA PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO

Marca : W P M
Tensão de alimentação : 220V
Capacidade máxima : 600 kN

PRENSA HIDRÁULICA

Marca : SCHIESS FRORIEP
Acionamento : manual
Capacidade máxima : 3150 kN

FORNO DE AQUECIMENTO

Marca : W.C.HERAEUS HANAU
Tensão de alimentação : 220V
Temperatura máxima : 1000°C

FORNO DE REVENIMENTO

Marca : HEVY DUTY
Tensão de alimentação : 230V
Potência : 250W

ANÉIS DINAMOMÉTRICOS

Marca : Veb Kraftmessgerate
(SAALE)
Capacidade máxima : 6 kN, 40 kN e 600 kN

Imprecisão : 1%.
Certificado de calibração : fornecido pelo
fabricante.



Fig.4.3 - Mostra os dois multímetros digitais, as duas pontes e a máquina de ensaios utilizada (RPU 6).

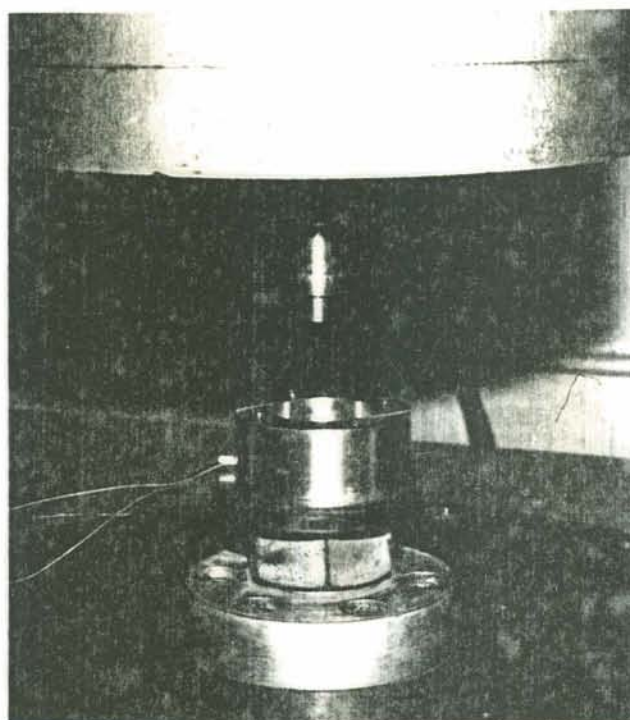


Fig. 4.4 - Mostra a máquina de ensaios (RPU 6).

5 SEQUÊNCIA DE PROJETO DE UMA CÉLULA DE CARGA DE PLACA

Foi utilizada uma formulação matemática segundo Feodosiev (5) a qual apresentamos no Apêndice B.

A seqüência utilizada no projeto de construção das células de carga I, III, IV e V foi a seguinte:

5.1 DADOS NECESSÁRIOS PARA O PROJETO (33)

- a) Carga nominal pretendida, P (N);
- b) Tensão de escoamento do material a ser utilizado, σ_e (N/mm²);
- c) coeficiente de Poisson, μ ;
- d) coeficiente de segurança empregado, sg;

Para os metais, em geral, o coeficiente de Poisson é aproximadamente 0,3.

O coeficiente de segurança adotado para células de carga normalmente é 2,5.

5.2 CÁLCULO DO PINO

$$F = \frac{P \cdot sg}{\sigma_e}$$

$$r = \sqrt{\frac{F}{\Pi}}$$

Onde F é a área de apoio do pino sobre a placa

e r é o raio de apoio do citado pino.

5.3 DETERMINAÇÃO DOS MOMENTOS RADIAIS E TANGENCIAIS PRÓXIMOS AO CENTRO

Para o caso de carregamento puntiforme aplicado no centro da célula (células I e III) são válidas as seguintes fórmulas (apêndice B, figura B-6, pág. B-15).

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \ln \frac{R}{r} - 1 \right] \quad (5.1)$$

$$M_t = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \ln \frac{R}{r} - \mu \right] \quad (5.2)$$

Onde: M_r é o momento radial

M_t é o momento tangencial

R , raio da placa

r , distância entre um ponto considerado e o centro da placa.

Para o caso de carregamento uniformemente distribuído ao longo de uma circunferência (células IV e V) são válidas as seguintes fórmulas (conforme Apêndice B).

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} \right) + \frac{a^2}{2r^2} (1 - \mu) - 1 \right] \quad (5.3)$$

$$M_t = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \cdot \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} \right) + \frac{a^2}{2r^2} (1 - \mu) - \mu \right] \quad (5.4)$$

isto para $r > a$.

Consegue-se a maior sensibilidade da célula quando os momentos radiais próximos ao centro e próximo à borda da placa são iguais. Neste caso as deformações dos "strain gages" colocadas nestas posições são da mesma magnitude.

Para que isso aconteça, a relação entre o raio da circunferência na qual está aplicada a carga e o raio da placa deve ser $\frac{a}{b} = 0,34$. Valor ao qual se chega igualando-se as expressões do momento radial M_r calculado para $r = a$ e $r = b$ (onde a é o raio da circunferência de aplicação da carga e b é o raio da placa).

Como $\frac{a}{b}$ não pode ser isolado na equação resultante, seu valor é determinado por tentativas.⁽³⁹⁾

5.4 CÁLCULO DA ESPESSURA DA PLACA

$$h = \sqrt{\frac{6 \cdot M_t \cdot sg}{\sigma_e}}$$

onde h = espessura da placa

M_t = é calculado tomando-se para r um valor igual ao raio de apoio do pino.

5.5 DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DO ANEL

a) Arbitra-se a relação entre a rigidez do anel e da placa. Geralmente escolhe-se para esta relação $\frac{\psi_{(P/M=1)}}{\psi_{(a/M=1)}}$ um valor alto, onde:

$\psi_{(p/M = 1)}$ = deformação angular na borda da placa (em rd), para um momento unitário uniformemente distribuído ao longo da borda da placa.

$\psi_{(a/M = 1)}$ = deformação angular da borda do anel (em rd) para um momento unitário uniformemente distribuído ao longo do anel.

b) Calcula-se a espessura do anel h'

$$h' = \left[\frac{4 \sqrt{b} [3(1 - \mu^2)]^{3/4}}{E \cdot \psi_{(a/M = 1)}} \right]^{2/5}$$

c) Caso a espessura do anel resulte, ou muito grande, ou muito pequena, pode arbitrar-se uma nova relação

$\frac{\psi_{(p/M=1)}}{\psi_{(a/M=1)}}$ e recalcula-se a espessura do anel.

Outro procedimento seria arbitrar-se uma nova espessura e recalcular a relação $\frac{\psi_{(p/M = 1)}}{\psi_{(a/M = 1)}}$.

5.6

DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO ANEL

A relação entre a rigidez do anel e da placa calculada no item anterior, é válida para um cilindro longo, isto é, um cilindro no qual a relação entre a altura L e o comprimento elástico b' seja, conforme "Bonilha" (7).

$$\frac{L}{b'} \geq 4$$

Um cilindro longo é conveniente para servir de anel de engastamento, porque em um cilindro longo as deformações produzidas na borda oposta, por esforços atuantes em uma borda são mínimas, e isto ajuda a eliminar os problemas causados pelo atrito entre o anel e a tampa da célula.⁽⁷⁾

Caso a altura L calculada pela relação L/b seja muito grande, pode-se usar para o anel de engastamento um cilindro curto, no qual a relação $L/b < 4$, onde a rigidez fica reduzida pelo seguinte fator

$$\frac{SC + sc}{S^2 - s^2} \quad \text{onde}$$

$$S = \text{sen } h \xi^*$$

$$C = \text{cos } h \xi^*$$

$$s = \text{sen } \xi^*$$

$$c = \text{cos } \xi^*$$

$\xi^* = L/b'$ é a relação entre a altura do cilindro e o comprimento elástico do cilindro.

Neste caso arbitra-se uma relação ξ^* para o anel e calcula-se a sua altura

$$L = \xi^* \cdot b' = \sqrt[4]{\frac{h'^2 b^2}{3(1 - \mu^2)}}$$

onde: b = raio da placa
 b' = comprimento elástico do cilindro
 h' = espessura do anel.

Convém salientar que, se a placa estiver engastada no centro do anel, o valor de L corresponderá à distância

entre a superfície da placa e a extremidade de cada metade do anel. A rigidez do conjunto formado pelos dois anéis será então a soma da rigidez de cada um atuando em separado.

5.7 CÁLCULO DA SENSIBILIDADE DA CÉLULA

Para os dois carregamentos indicados no item 5.3, são válidas as seguintes fórmulas (ver apêndice B, página B-6):

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_t)$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu \sigma_r)$$

onde

ϵ_r = deformação radial

ϵ_t = deformação tangencial

σ_r = tensão radial

σ_t = tensão tangencial

Conhecendo-se o valor dos momentos radiais e tangenciais em função do raio, pode-se determinar o valor das deformações e calcular a sensibilidade da célula. Lembrando que (página 3-5)

$$S' = \frac{\epsilon}{P/P_M} \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{6M}{h^2} \quad (\text{página B-12})$$

e que para $P/P_M = 1$ temos as deformações máximas na célula de carga, o valor de S' pode ser calculado determinando-se o somatório das deformações nos 4 "strain gauges" para uma carga $P=P_M$.

6 - CÉLULAS DE CARGA I e II

6.1 - Confecção das Células de Carga

Confeccionou-se duas células de carga (Célula I e Célula II) em formato cilíndrico possuindo à meia altura, a placa engastada no corpo. Cada uma das citadas células constam, portanto, de um corpo cilíndrico, uma tampa superior, um pino deslizante no centro da tampa e os respectivos parafusos de fixação da tampa ao corpo. As figuras 6.1 e 6.2 são fotografias das células I e II respectivamente.

Sob a placa de cada uma das células I e II colocou-se os quatro "strain gauges" conforme mostram as figuras 6.3 e 6.4. Tal configuração não é a mais sensível.

Construiu-se a célula de carga I de acordo com a seqüência de projetos retro-citada. Os critérios de adaptação e valores numéricos utilizados descreve-se no ítem a seguir.

Na célula de carga II, fez-se algumas alterações nas dimensões com a finalidade de comparar o seu comportamento com a primeira.

As duas células de carga I e II foram executadas em aço SAE 1045 e não foram tratadas termicamente.

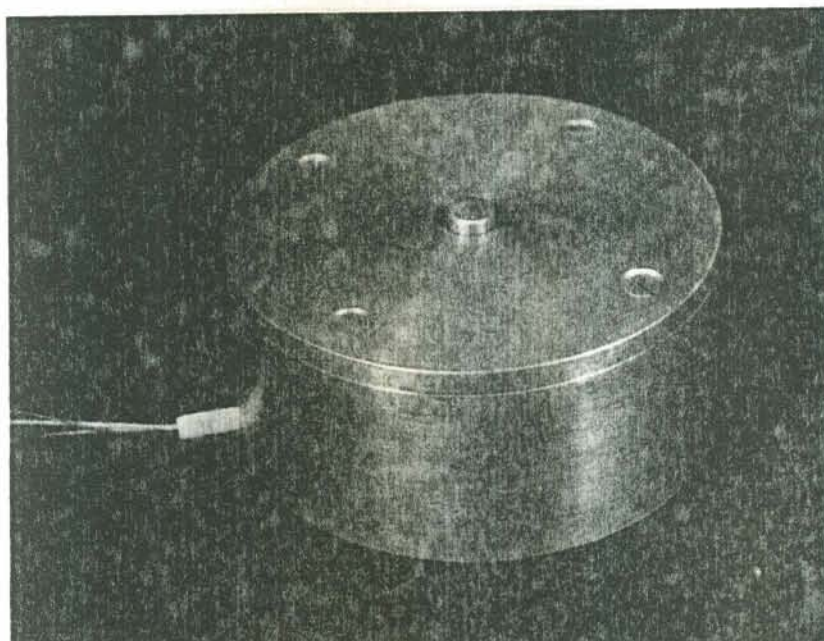


Fig. 6.1 - Vista externa da célula de carga I completa, pronta para ser testada.

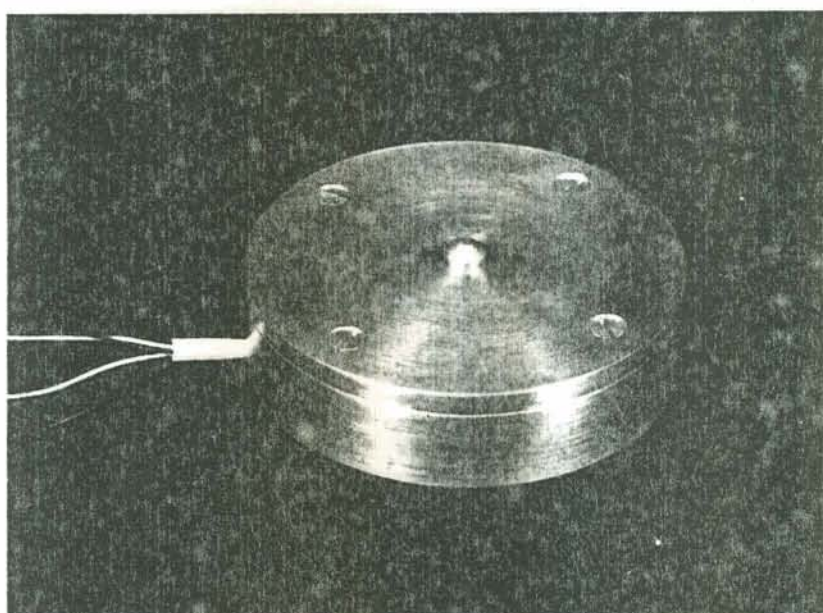


Fig. 6.2 - Vista externa da célula de carga II completa, pronta para ser testada.

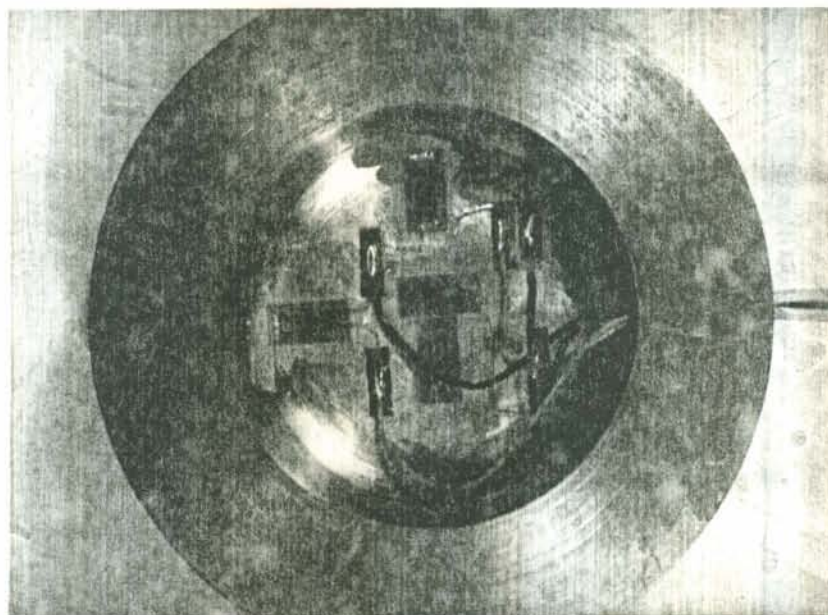


Fig. 6.3 - Mostra o posicionamento e ligações dos "strain gauges" na célula de carga I.

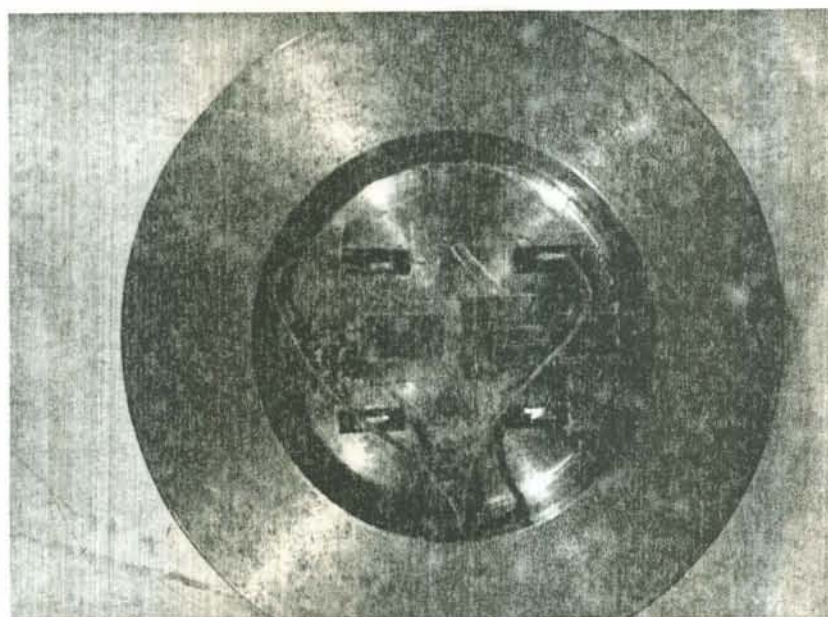


Fig. 6.4 - Mostra o posicionamento e ligações dos "strain gauges" na célula de carga II.

6.2 - Valores Numéricos Utilizados na Célula I ^{(5), (6), (7)}

$$P = 2500N, \sigma_e = 300N/mm^2, sg = 2,5$$

De acordo com a seqüência de projeto apresentada anteriormente, calcula-se inicialmente a área do pino.

$$A = 20,8mm^2$$

O raio de contato do pino será:

$$r = 2,6mm.$$

Determina-se a seguir os momentos radiais e tangenciais próximos ao centro da placa (equações 5.1 e 5.2):

$$\left. \begin{array}{l} M_r = 433,8 \text{ Nmm/mm} \\ M_t = 573,1 \text{ Nmm/mm} \end{array} \right\} R = 30mm$$

A partir do valor dos momentos fletores, determina-se a espessura da placa.

$$h = 5,3mm$$

Em função da espessura da placa h , calcula-se D_p e $\psi(p/M=1)$ (definidos no apêndice B), encontrando-se:

$$D_p = 2,9 \times 10^6 \text{ N.mm}$$

$$\psi(p/M=1) = 8,0 \times 10^{-6} \text{ rd/Nmm/mm}$$

Para que haja engastamento, a rigidez do anel que suporta a placa, deve ser bem maior que a rigidez da placa. Ou seja, a deformação angular do anel para um momento unitário deve ser bem menor que a respectiva deformação angular da placa.

Arbitra-se, pois, a seguinte relação

$$\frac{\psi(p/M=1)}{\psi(a/M=1)} = 10$$

Em função desta relação arbitrada e das dimensões da placa, determina-se a espessura do anel h' .

$$\text{Encontramos } h' = 9,5\text{mm}$$

Considerando que a espessura do anel resultou pequena para a colocação dos parafusos, para a fixação da tampa, arbitrou-se uma nova relação, com o propósito também de prover melhor rigidez.

$$\frac{\psi(p/M=1)}{\psi(a/M=1)} = 100$$

e recalculou-se a espessura do anel. Obteve-se $h' = 24\text{mm}$

- Considerou-se esta espessura excessiva e arbitrou-se uma nova espessura $h'=20\text{mm}$, verificando a seguir o novo valor da relação

$$\frac{\psi(p/M=1)}{\psi(a/M=1)} = 62,8$$

válida para um cilindro longo. Isto significa que o anel é 62,8 vezes mais rígido que a placa. Calculou-se a seguir a altura necessária para que o anel se comporte como um cilindro longo.

$$L \geq 4b' = 76 \text{ mm}$$

No entanto, considerou-se este valor muito grande para a altura do anel, tanto porque seria necessário retirar por usinagem, um volume de material excessivo para a confecção da célula, quanto porque em aplicações práticas, não é interessante transdutores volumosos. Para a altura do anel arbitrou-se um novo valor $L = 20\text{mm}$ e recalculou-se a relação entre a rigidez do anel e da placa, utilizando o formulário dos cilindros curtos, segundo "Bonilha", encontrando-se o seguinte valor:

$$\frac{\psi(p/M=1)}{\psi(a/M=1)} = 21,1$$

Isto significa que um cilindro curto com esta altura é 2,98 vezes menos rígido que um cilindro longo com o mesmo raio e espessura.

Como tem-se a placa engastada em dois cilindros curtos, a relação entre a rigidez dos dois atuando em conjunto e da placa será:

$$2 \times 21,1 = 42,2$$

As dimensões da célula I, são:

Altura total = 40mm

Raio da placa = 30mm

Raio interno do cilindro = 30mm (arbitrado)

Raio do pino = 2,6mm (contato)

Nas figuras de 6.5A a 6.5G, mostra-se o dimensionamento da célula I.

A título de curiosidade veja-se os resultados obtidos para célula II (não pré-calculada) onde foi arbitrado $L=10\text{mm}$, sendo as demais dimensões iguais a célula I. Com estas dimensões o anel é 20,9 vezes menos rígido que um cilindro longo de mesmo raio e espessura. Como a placa está engastada em dois cilindros, a relação entre a rigidez dos dois atuando em conjunto e da placa será:

$$\frac{62,8 \times 2}{20,9} = 6,0$$

Portanto, a célula II é aproximadamente 7 vezes menos rígida que a célula I. Nas figuras de 6.6A a 6.6G, mostra-se o dimensionamento da célula II.

Cálculo da sensibilidade da célula:

Na parte central, temos (pág. 6-4)

$$M_r = 433,8 \text{ N.mm/mm}$$

$$M_t = 573,1 \text{ N.mm/mm}$$

$$h = 5,3 \text{ mm} \quad , \quad P = 2500 \text{ N} \quad , \quad E = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

Conforme item 5.7, as deformações serão (pág. B-12)

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_t), \text{ mas } \sigma_r = \pm 6 \frac{M_r}{h^2} \quad \text{e} \quad \sigma_t = \pm 6 \frac{M_t}{h^2}$$

$$\epsilon_r = \frac{6}{h^2 \cdot E} \cdot (M_r - \mu M_t) = 266,4 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu \sigma_r)$$

$$\epsilon_t = \frac{6}{h^2 \cdot E} \cdot (M_t - \mu M_r) = 450,6 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Próximo ao engastamento, os momentos são (apêndice B, página B-14):

$$M_r = - \frac{P}{4\pi} = - 198,9 \text{ N. mm/mm}$$

$$M_t = - \frac{\mu P}{4\pi} = - 59,68 \text{ N. mm/mm}$$

e a deformação radial será

$$\epsilon_r = - \frac{6}{h^2 \cdot E} \cdot (M_r - \mu M_t) = 184,1 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Na região central tem-se um "strain gauge" sensível às deformações radiais e um sensível às deformações tangenciais. Próximo ao engastamento temos dois "strain gauges" sensíveis às deformações radiais. O somatório das deformações nos quatro "strain gauges" ativos será:

$$266,4 + 450,6 + 2(184,1) = 1085,2 \text{ } \mu\text{m/m}$$

De acordo com a página 6-24 o valor da deformação para a carga nominal (2500N), medido para a célula I, com pino pequeno deslizante na tampa, foi o seguinte: $886 \pm 9 \mu\text{m/m}$. Isto dá uma diferença entre o valor calculado e o medido da ordem de 20%. Tal diferença se deve ao fato de que no cálculo das deformações tomou-se os seus valores próximo ao centro e ao engastamento da placa, enquanto que na realidade os strain gauges são sensíveis à média das deformações na área em que estão colados. Este percentual pode ser reduzido a menos da metade do seu valor tomando-se para a posição de colagem dos "strain gauges" próximos ao engastamento, valores do raio correspondente ao centro das grades dos strain gauges (regiões sensíveis às deformações).

A seguir apresentamos vários cortes das células de carga I e II.

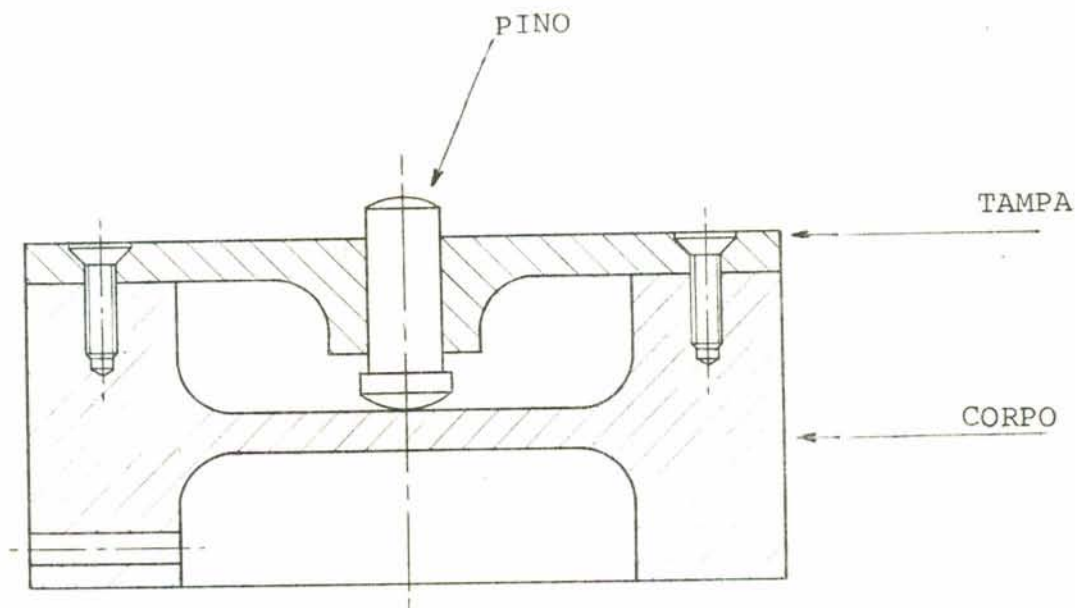


Fig. 6.5A - Célula de Carga I: Corte Geral

A placa sensora e o anel constituem um todo, é o corpo da célula. A tampa circular é parafusada sobre o corpo e o pino desliza num guia central, fazendo esforço sobre a placa que o transmite a todo o conjunto. Os "strain gauges" estão colados conforme a figura 6,3

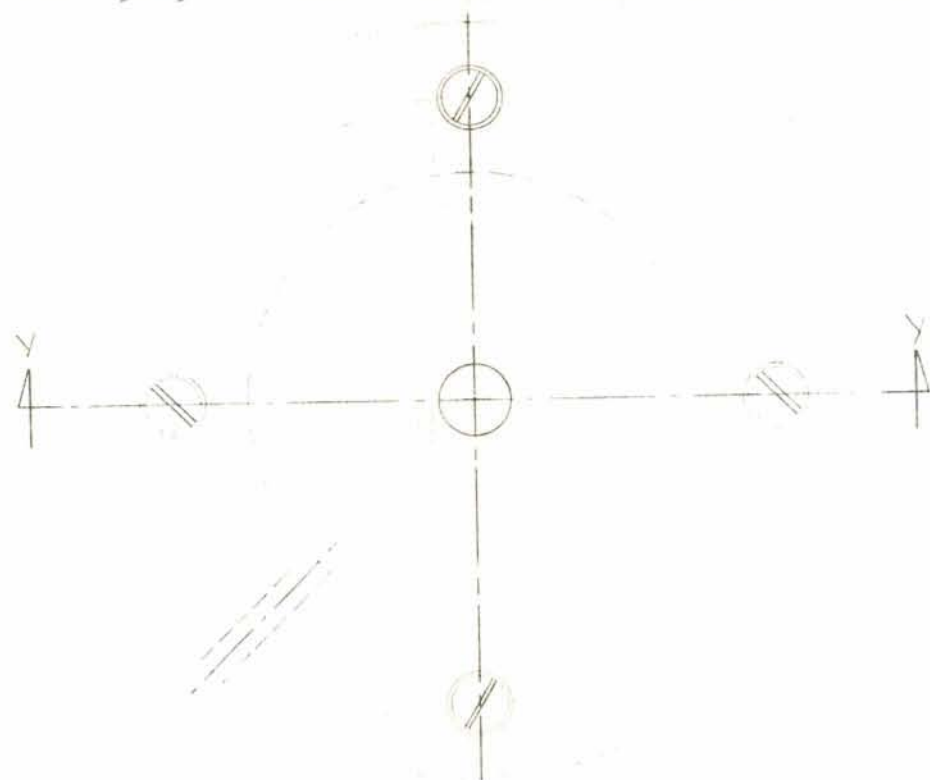


Fig. 6.5B - Célula de Carga I: Vista Superior

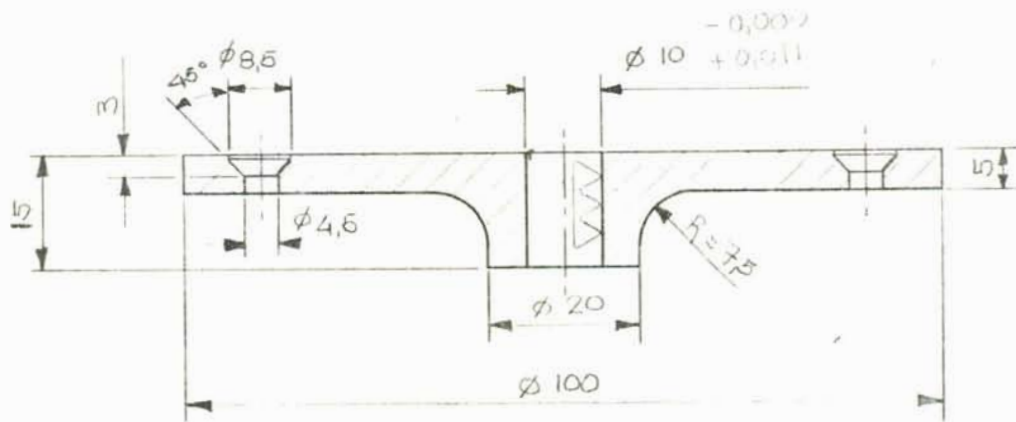


Fig.6.5C- Célula de Carga I: Tapa em Corte com Dimensionamento.

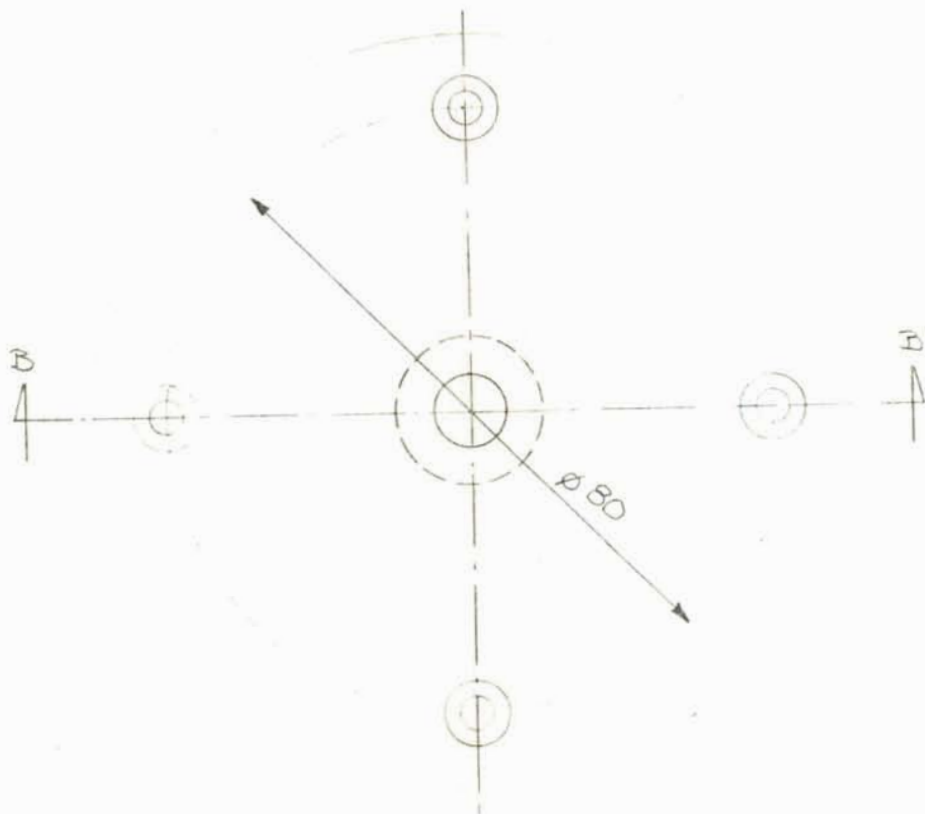


Fig.6.5D- Célula de Carga I: Vista superior da tampa.

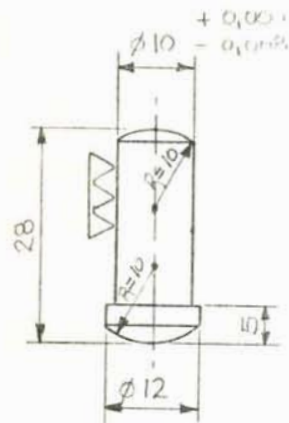


Fig.6.5E - Célula de Carga I: Pino I(Deslizante)
Vista lateral com Dimensionamento.

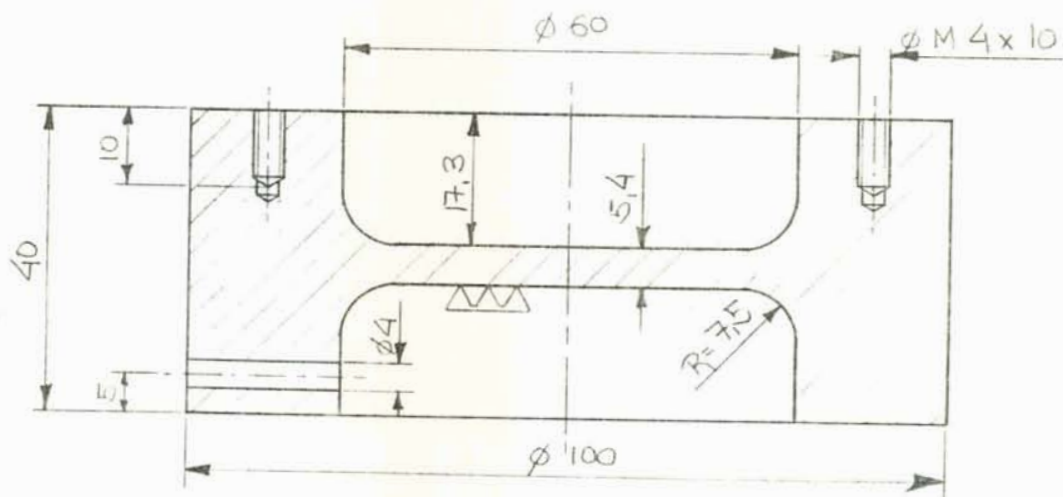


Fig.6.5F - Célula de Carga I: Corpo - Corte
com Dimensionamento.

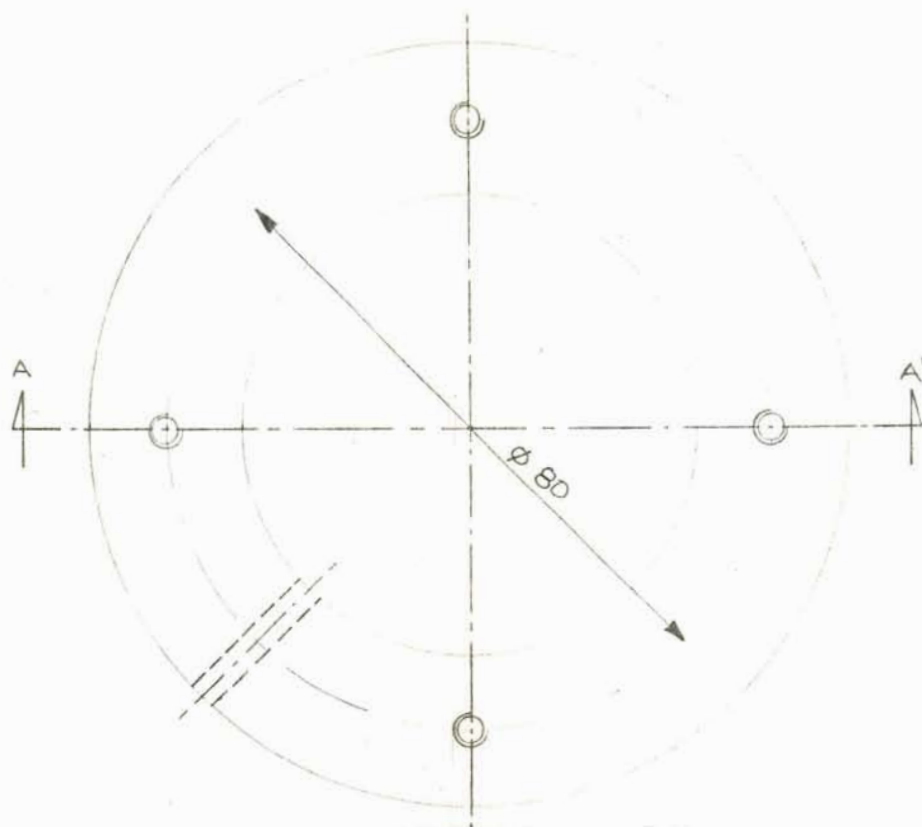


Fig.6.5.G - Célula de Carga I: Vista de cima sem a tampa, pino e parafusos.

Célula de carga II - Pino Deslizante

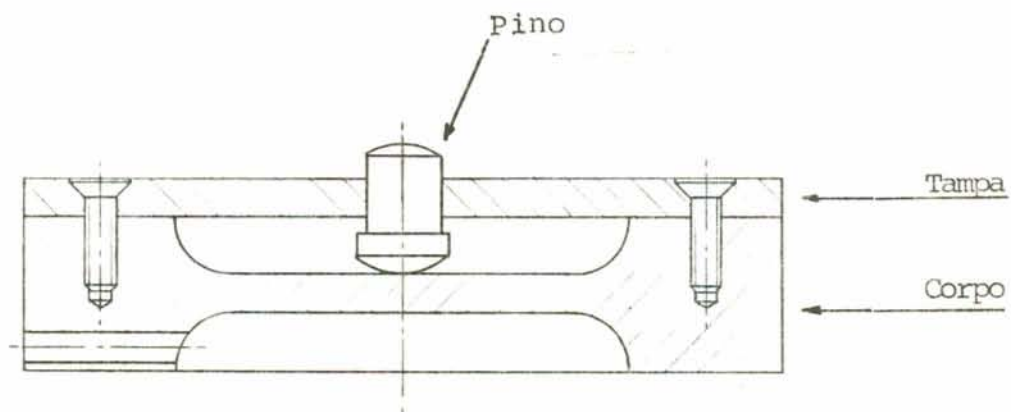


Fig.6.6.A - Célula de Carga II: Corte Geral

- A placa sensora e o anel constituem um todo, é o corpo da célula.

- A tampa circular é parafusada sobre o corpo e o pino desliza numa guia central, fazendo o esforço sobre a placa que o transmite a todo conjunto.

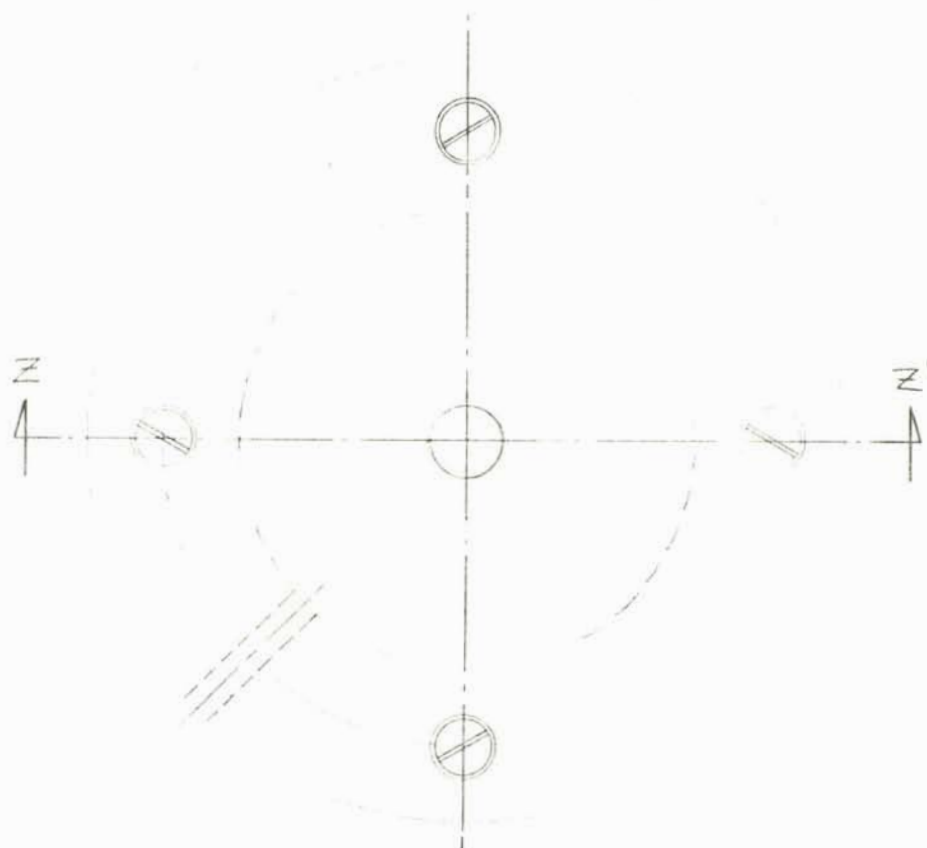


Fig. 6.6B - Célula de Carga II: Vista superior.

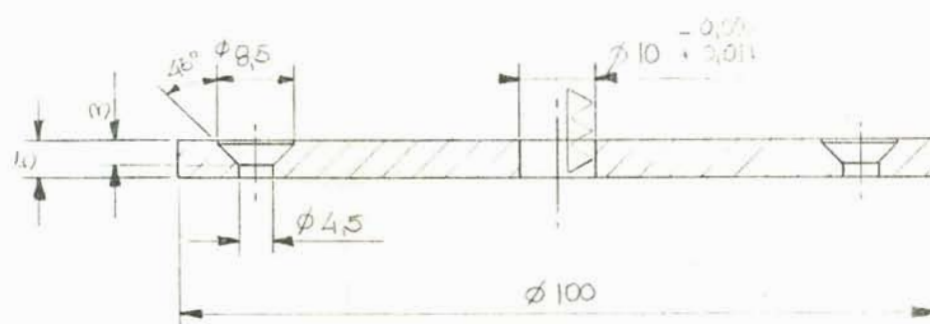


Fig. 6.6C - Célula de Carga II: Tampa em corte com dimensionamento.

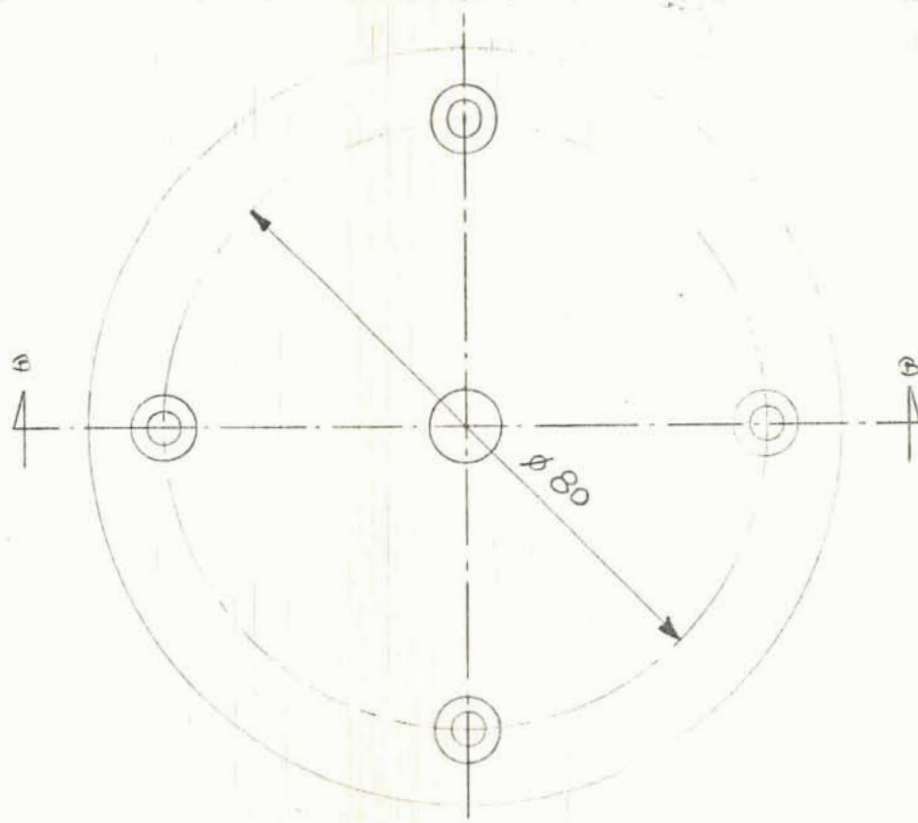


Fig.6.6D - Célula de Carga II:
Vista superior da tampa.

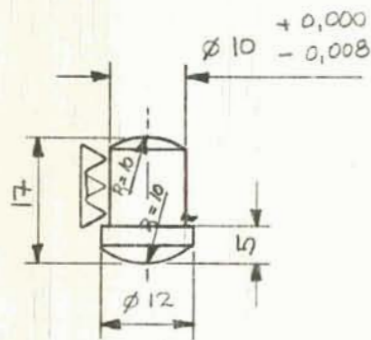


Fig.6.6E - Célula de Carga II: Pino II
(Deslizante), vista lateral
com dimensionamento. Difere
do pino I apenas na altura.

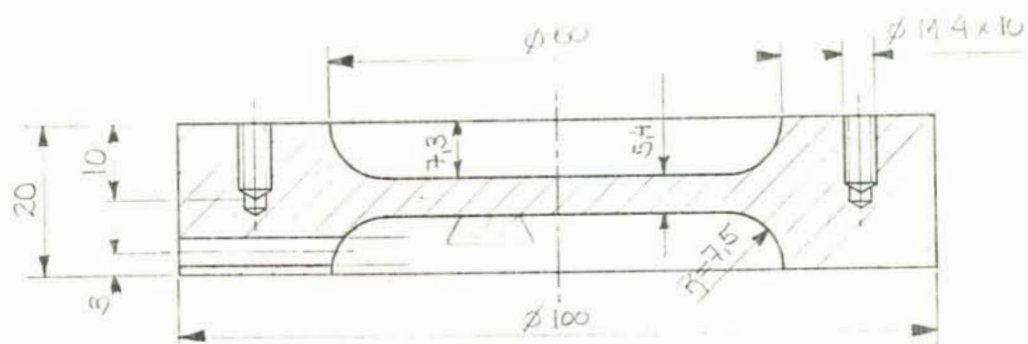


Fig.6.6F - Célula de Carga II: Corpo - Corte com Dimensionamento.

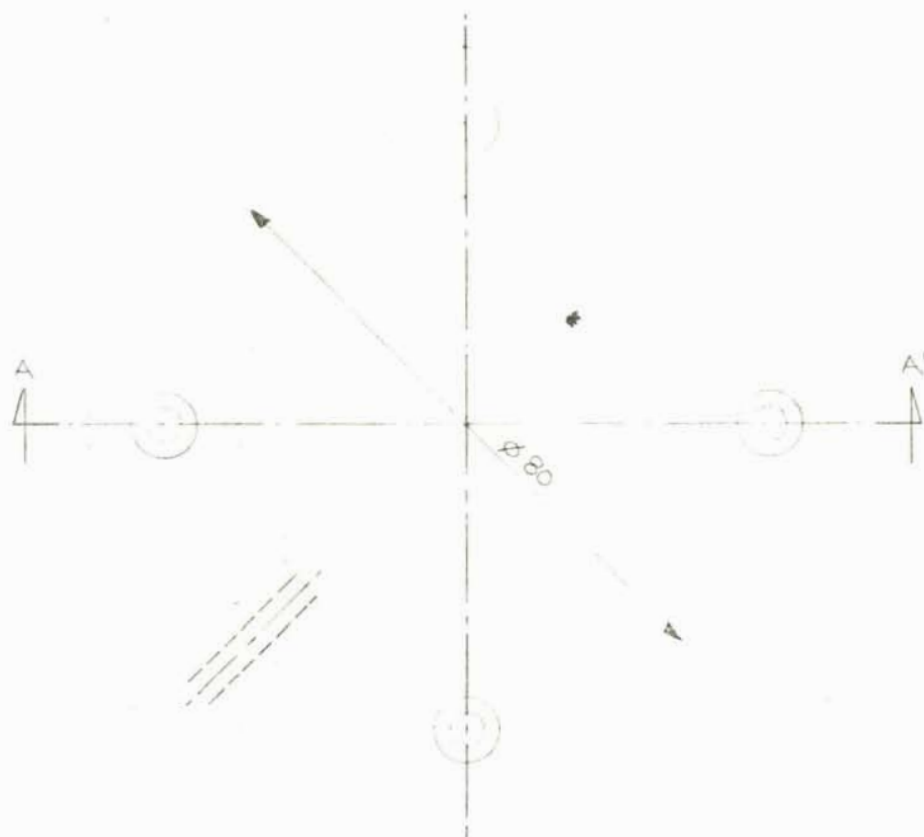


Fig.6.6G - Célula de Carga II: Vista de cima, sem tampa, pino e parafusos.

6.3 - Procedimentos na Tomada de Dados (14), (15), (18), (22)

Para executar os testes, utilizou-se uma máquina de ensaio de fadiga (RPU6), com a qual levantou-se as curvas de calibração das células de carga I e II. (figuras 4.3 e 4.4).

Na parte superior da máquina de ensaio RPU6 adaptou-se uma célula de carga, a qual foi calibrada utilizando-se para a medição da força um anel dinamométrico padrão de 6 kN de capacidade, com certificado de calibração fornecido pelo fabricante (PGH Kraftmessegeräte Halle). Para medir o desbalanço da ponte, utilizou-se uma ponte amplificadora marca HBM, modelo KWS/T-5 de sensibilidade 10^{-4} m/m = 0,1‰ (para um extensômetro ativo). O ganho desta ponte foi tal que, simulando-se uma pré-deformação inicial total de $\epsilon_t = \pm 1\%$, o sinal de desbalanço indicado pela ponte amplificadora era de $V = \pm 427$ mV (célula padrão). Para a leitura do desbalanço utilizamos um multímetro digital marca Philips-PM 2421. A figura 6.7 mostra a curva de calibração desta célula cuja imprecisão é 1%. Portanto, traduzimos o desbalanço em mV desta ponte em N. Assim esta célula de referência (constante na RPU6) é o nosso padrão e serviu para comparar as células I e II.

As células teste, foram adaptadas na parte inferior da máquina onde, para a medição do desbalanço de suas respectivas pontes, utilizou-se uma segunda ponte amplificadora marca HBM, modelo KWS/T-5. O ganho da célula padrão era tal que, simulando-se uma pré-deformação total $\epsilon_t = \pm 1\%$, o sinal de desbalanço da

ponte amplificadora era de ± 427 mV. O ganho da célula II era tal que simulando-se uma pré-deformação total $\epsilon_t = \pm 1\%$, o sinal de desbalanço da ponte amplificadora era de ± 269 mV.

Estabelecemos assim, a relação entre os desbalanços acusados pela célula de referência (constante na máquina) e pela célula teste, tanto no carregamento quanto no descarregamento.

Na tabela I apresentamos os valores médios obtidos para a célula padrão (constante na RPU-6), em cinco dias seguidos.

Força (kN)	Desbalanço da ponte (mV)	
	C	D
0,6	8,2	8,2
1,2	16,5	16,4
1,8	24,7	24,8
2,4	32,9	32,7
3,0	41,1	41,3

C- Valores obtidos no carregamento (valores crescentes)

D- Valores obtidos no descarregamento (valores decrescentes)

imprecisão: $\pm 0,1$ mV

TABELA I - Calibração da célula padrão - Valores Médios. Sensibilidade 1000.

A célula padrão, colocada na parte superior da máquina de ensaio à tração (denominada RPU 6), e que nos serviu como referência é uma célula do tipo lâmina. Temos dois extensômetros colados na parte superior e dois na parte inferior da citada lâmina. Tal célula foi ali colocada substituindo o sistema indutivo originalmente existente.

Trata-se de uma célula do tipo lâmina e que possui uma imprecisão da ordem de 1%.

Na página seguinte apresenta-se a calibração desta célula de carga (Força versus Deformação).

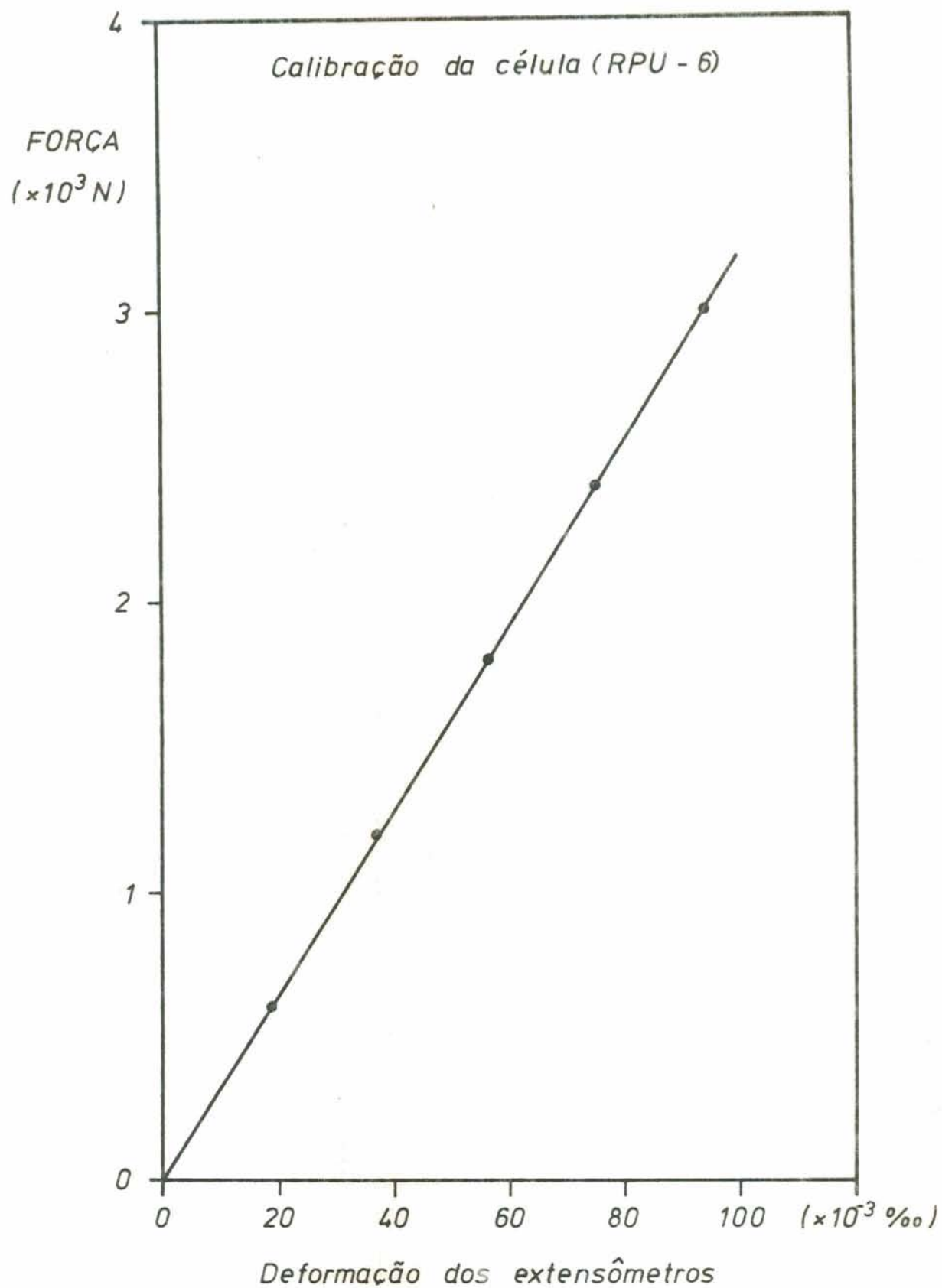


Fig. 6.7

6.4 - Condições Utilizadas nos Testes

As células I e II possuem pinos de mesmo diâmetro e área de apoio, diferindo apenas na altura. Na execução dos testes que passamos a descrever, utilizamos dois pinos: o pino I (pequeno) da célula I (fig. 6.8) e outro pino cujo diâmetro é o dobro do anterior, chamado pino II (ou grande, fig. 6.9).

Foram realizados testes nas seguintes condições:

Condição 1 - Pino I deslizante na tampa da célula I

Condição 1'- Pino I deslizante na tampa da célula II

Condição 2 - Pino I preso na máquina de ensaio RPU6 atuando na célula I

Condição 2'- Pino I preso na máquina de ensaio RPU6 atuando na célula II

Condição 3 - Pino II preso na máquina de ensaio RPU6 atuando na célula I

Condição 3'- Pino II preso na máquina de ensaio RPU6 atuando na célula II

Realizamos um total de 1190 leituras com as células de carga I e II. Em cada condição fizemos uma série de 10 medidas completas: 9 carregamentos e 8 descarregamentos.

Deste total de leituras, apresentamos uma amostragem no Apêndice D, onde temos 162 leituras no carregamento e 144 leituras no descarregamento, com as respectivas alinearidades para uma temperatura de $(15 \pm 3)^{\circ}\text{C}$. Ver gráficos obtidos nas dife-

rentes condições, na figura 6.11.

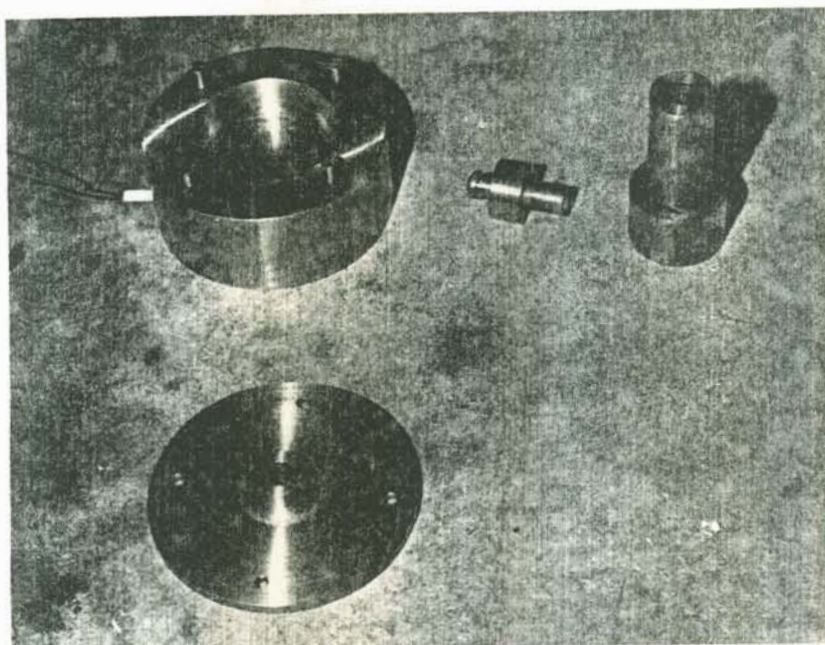


Fig. 6.8 - Mostrando: Corpo da célula I, tampa, pino pequeno, Parafusos e Adaptadores utilizados para engastar os pinos na máquina de ensaio (RPU 6).



Fig. 6.9 - Mostrando: O pino grande que foi adaptado na máquina de ensaios e acionado sobre as células I e II.

6.5 - Adaptabilidade do Modelo (2), (5)

No modelo apresentado e utilizado para dimensionar a célula de carga I, considera-se a força total aplicada no centro da placa. Neste ponto os momentos fletores são infinitos e também a força cortante é infinita. Esta é uma aproximação utilizada, já que em realidade temos a força distribuída sobre uma pequena superfície que é a cabeça do pino. Verifiquemos a adaptabilidade do modelo para regiões onde temos grandes valores dos momentos radiais e tangenciais

Utilizando as expressões seguintes de acordo com o Apêndice B:

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \ln \frac{R}{r} - 1 \right], \quad \sigma_t = \frac{6 M_t}{h^2}$$

$$M_t = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \ln \frac{R}{r} - \mu \right], \quad \sigma_r = \frac{6 M_r}{h^2}$$

As tensões para $r = 2 \text{ mm}$ são:

$$M_r = 501,6 \text{ N} ; \sigma = 1,0 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$$

$$M_t = 641,0 \text{ N} ; \sigma = 1,3 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$$

para $r = 1 \text{ mm}$:

$$M_r = 681,0 \text{ N} ; \sigma = 1,4 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$$

$$M_t = 820,3 \text{ N} ; \sigma = 1,7 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$$

A espessura da placa é $h = 5,3 \text{ mm}$ e $R = 30 \text{ mm}$.

O material constituinte da célula I (placa), tem uma tensão de escoamento da ordem $3 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$ valor bem distante dos anteriormente encontrados, adaptando-se a este respeito, o modelo ora adotado.

6.6 - Confronto entre Valores Calculados e Medidos (2), (3)

Em acordo com o formulário adotado (proposto por Feodosiev) na colagem dos "strain gauges" devemos evitar os pontos onde os momentos radiais e tangenciais são nulos. No caso presente para a célula da carga I estes pontos localizam-se em $r = 13,9\text{mm}$ e $r = 23,8\text{mm}$ (correspondentes a $M_r = 0$ e $M_t = 0$).

Os quatro "strain gauges" utilizados foram colados às seguintes distâncias dos seus respectivos centros ao centro da célula: $r_1 = 3\text{mm}$, $r_2 = 5\text{mm}$ e $r_3 = r_4 = 19\text{mm}$, tendo acusado as seguintes deformações, calculadas de acordo com o item 5.7 e carga P_M :

$$\epsilon_1 = 4,24 \times 10^{-4} = 0,42\% = 424 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_2 = 1,61 \times 10^{-4} = 0,16\% = 161 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_4 = -0,96 \times 10^{-4} = -0,09\% = -96 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Sendo portanto o desbalanço total correspondente a carga nominal P_M emitido pela ponte, proporcional ao somatório das deformações, ou seja, $777 \text{ } \mu\text{m/m}$.

A figura 6.10 apresenta as deformações radiais e tangenciais correspondentes à célula de carga I.

A figura 6.10 apresenta as deformações dos extensômetros em função da carga aplicada, em quatro condições utilizadas.

Para o caso da célula de carga I verifica-se que para uma força de 2500N tem-se uma deformação medida de 886 $\mu\text{m}/\text{m}$, o que dá uma diferença de 14% em relação ao valor calculado, mostrando que o modelo matemático adotado pode ser utilizado.

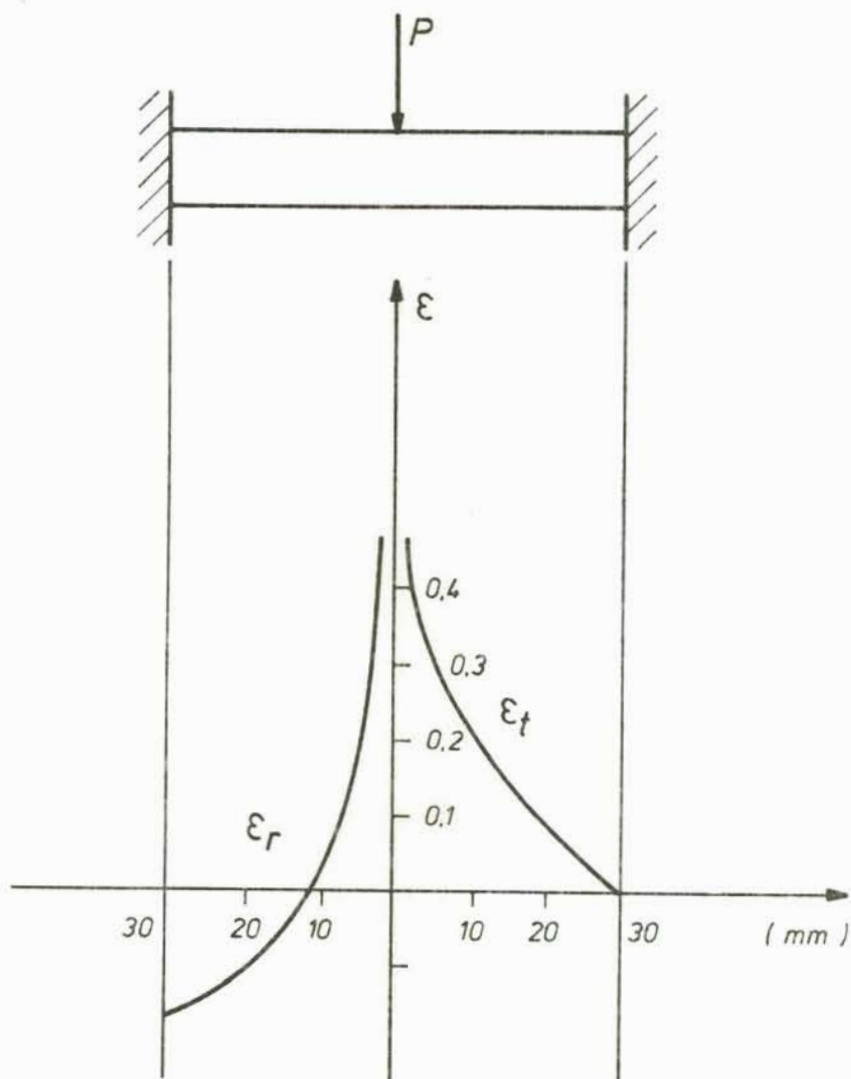


Fig. 6.10 - Distribuição das deformações radiais e tangenciais na célula de carga I.

6.7 - Resultados Obtidos (células I e II)

Condição	Alinearidades
1'	3,4
2'	2,5
3'	1,8
1	1,0
2	0,8
3	0,6

TABELA II

Através da tabela II, pelas diferentes condições se verifica que na célula II (não pré-calculada) a alinearidade passa de 3,4 % a 1,8 %, enquanto que a célula I (pré-calculada) a alinearidade passou de 1,0% a 0,6%. Ver convenções na pág.6.21.

Note-se que a nossa célula de carga padrão possui uma alinearidade de 1%, assim sendo, as alinearidades abaixo de 1% podem ser atribuídas à máquina de ensaio. A partir do momento em que as alinearidades foram abaixo de 1%, passamos a utilizar o anel dinamométrico diretamente na máquina (células III, IV, V e VI).

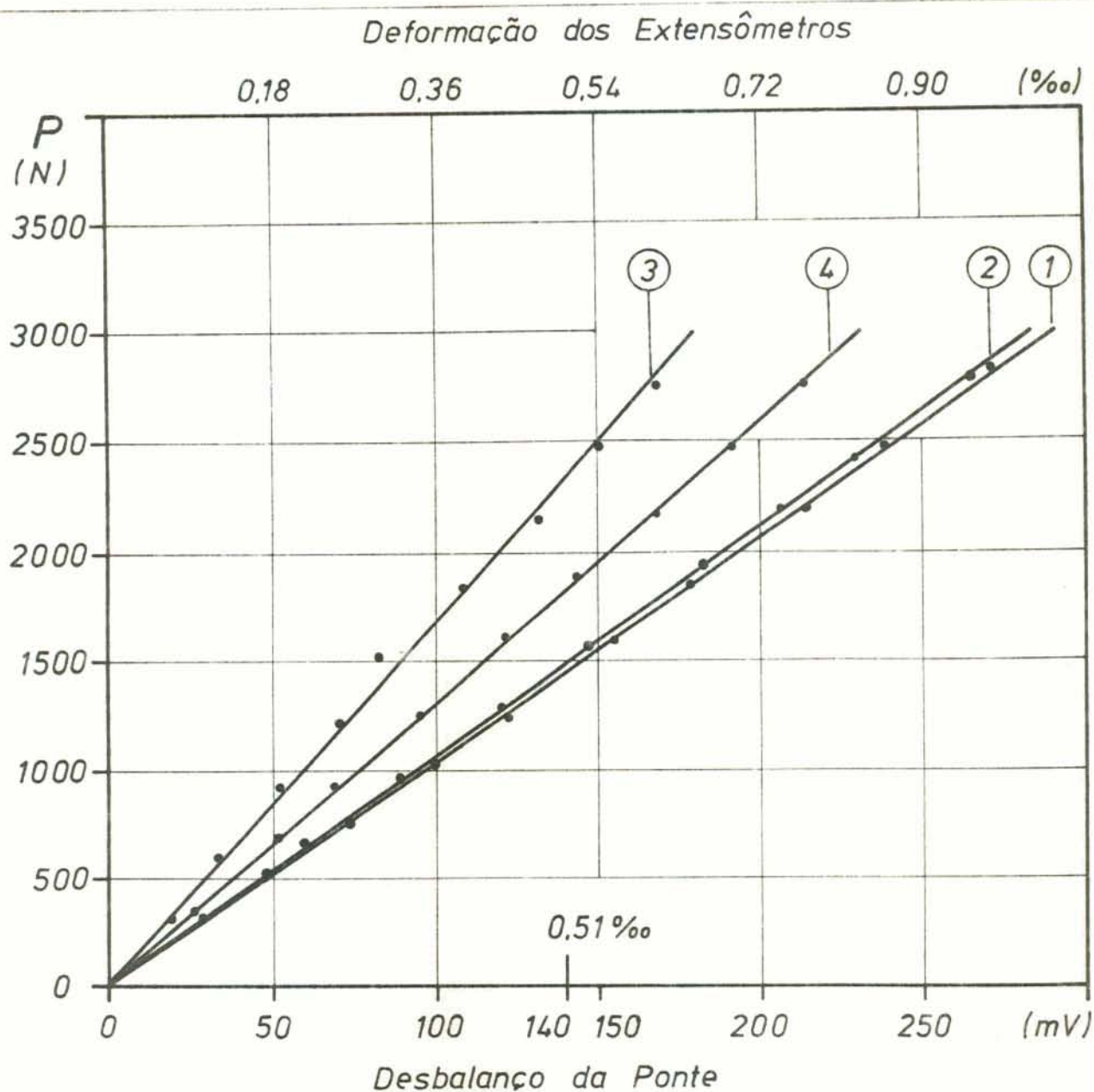


Fig. 6.11 CURVA 1

Célula de Carga I

Pino pequeno deslizante na tampa

Carregamento

Alinearidade 0,98%

Pré-deformação simulada de

 $+ 1\text{‰} \rightarrow + 270 \text{ mV}$ **CURVA 2**

Célula de Carga I

Pino pequeno fixo na máquina de ensaios RPU6

Carregamento

Alinearidade 0,75%

Pré-deformação simulada

 $\pm 1\text{‰} \rightarrow \pm 270 \text{ mV}$ **CURVA 3**

Célula de Carga II

Pino pequeno deslizante na tampa

Carregamento

Alinearidade 3,35%

Pré-deformação simulada

 $\pm 1\text{‰} \rightarrow \pm 269 \text{ mV}$ **CURVA 4**

Célula de Carga II

Pino pequeno fixo na máquina de ensaios RPU6

Carregamento

Alinearidade 1,75%

Pré-deformação simulada

 $\pm 1\text{‰} \rightarrow \pm 269 \text{ mV}$

6.8

Considerações sobre os modelos matemáticos

O modelo simplificado adotado (carga pontual) está em desacordo com a realidade, uma vez que se tem a carga distribuída no apoio do pino sobre a placa.

No modelo simplificado adotado (segundo Feodosiev), calculou-se o momento máximo para um valor de $r = 2,6\text{mm}$ que é o raio de apoio do pino, uma vez que no centro os momentos são infinitos.

Um modelo mais de acordo com o presente caso (carga circularmente distribuída sobre a placa), é apresentado por "Belluzzi" (39), em que os momentos central (M_c) e no engastamento (M_{ri}) são dados respectivamente por:

$$M_c = (1 + \mu) \frac{pa^2}{4} \left(\ln \frac{R}{a} + \frac{a^2}{4R^2} \right)$$

$$M_{ri} = - \frac{p}{2R^2} \left(\frac{R^2 a^2}{2} - \frac{a^4}{4} \right)$$

onde a = raio de apoio

p = pressão

Apresenta-se a seguir algumas comparações dos valores encontrados para a célula de carga I, em relação aos dois modelos matemáticos citados.

Os momentos no engastamento da placa:

a) para carga pontual $M_{ri} = - \frac{P}{4\pi} = - 199,0 \text{ N.mm/mm}$

b) para carga circularmente distribuída

$$M_{ri} = 198,9 \text{ N.mm/mm}$$

Então, no engaste da placa é mínima a diferença entre os dois modelos teóricos.

Para os momentos no apoio da carga:

a) para carga pontual $M_t = 573,1 \text{ N.mm/mm}$

b) para carga circularmente distribuída $M_c = 633,2 \text{ Nmm/mm}$.

Tem-se uma diferença de 10%. Esta diferença irá produzir alterações no coeficiente de segurança utilizado (no caso 2,5).

O coeficiente de segurança para o caso da carga circularmente distribuída será:

$$sg = \frac{\sigma_e \cdot h^2}{6 \cdot M_c} = 2,2$$

Então, enquanto utilizarmos pinos de pequenas dimensões em comparação com a placa, podemos utilizar o modelo simplificado e obter resultados próximos daqueles que seriam obtidos com o modelo mais exato.

7 - CÉLULA DE CARGA III (5), (6), (7)

7.1 - Finalidade

Com base nas conclusões obtidas a partir das células de carga I e II, projetamos, construímos e experimentamos a célula de carga III. No projeto utilizou-se a teoria que considera um esforço pontual sobre a placa. Mudou-se a geometria desta célula com a finalidade de:

- 1) minimizar os efeitos do atrito do pino com a tampa superior;
- 2) eliminar o atrito decorrente do apoio da tampa superior com o corpo da célula;
- 3) melhorar o engastamento da tampa inferior com o corpo da célula (através de maior espessura e maior número de parafusos);
- 4) otimizar sua utilização, ou seja, poder utilizar a mesma célula para tração e para compressão;
- 5) melhorar a linearidade;
- 6) melhorar a repetitividade.

Tal célula possui dimensões semelhantes a Célula I, mas com um pino roscado no centro da placa e possuindo uma rosca central na tampa inferior, para ser utilizado em tração. Foi construída também em aço SAE 1045 não tratado termicamente e com capacidade para 2500N.

7.2 - Projeto

Conforme retrocitado, foi utilizada a mesma seqüência de projeto empregada para executar a célula I.

Dimensionamos a célula III a partir dos seguintes dados:

Carga nominal : 2500 N

Material : aço SAE 1045

Coefficiente de segurança: 2,5

Tensão de escoamento: 210 N/mm²

Rigidez entre placa e anel: $\frac{\psi(p/M=1)}{\psi(a/M=1)} = 63$

Módulo de elasticidade: 210 kN/mm²

Tratamento térmico: não houve

Posição de colagem dos "strain gauges": conforme página 6.3.

Deformações esperadas nos "strain gauges": conforme item 6.6

A figura 7.1 mostra as dimensões da célula III.

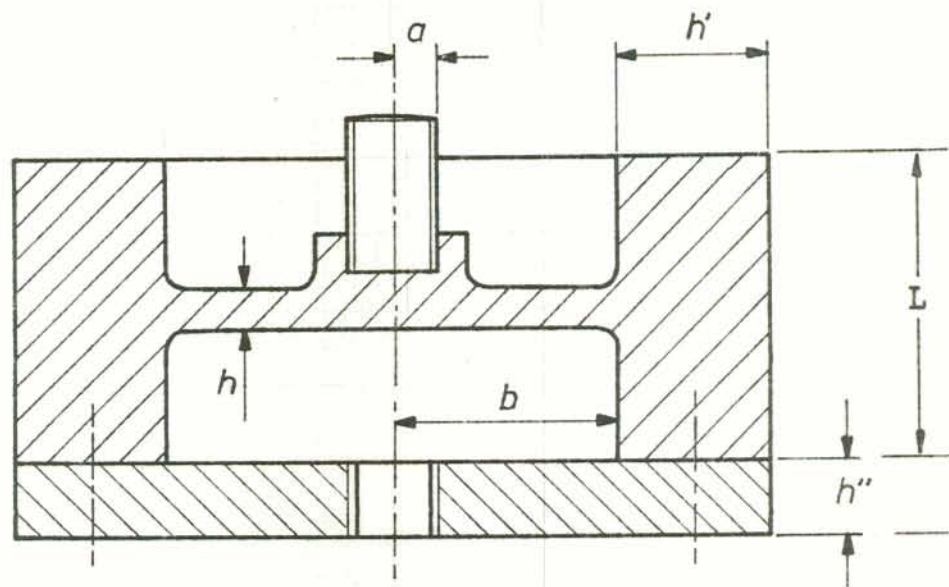


Fig.7.1 - Célula de carga III, corte com dimensionamento

$a = 9$ mm (raio do pino)

$b = 30$ mm (raio interno da placa)

$h = 5$ mm (espessura da placa)

$h' = 20$ mm (espessura da parede do anel)

$h'' = 10$ mm (espessura da tampa inferior)

$L = 40$ mm (altura do anel)

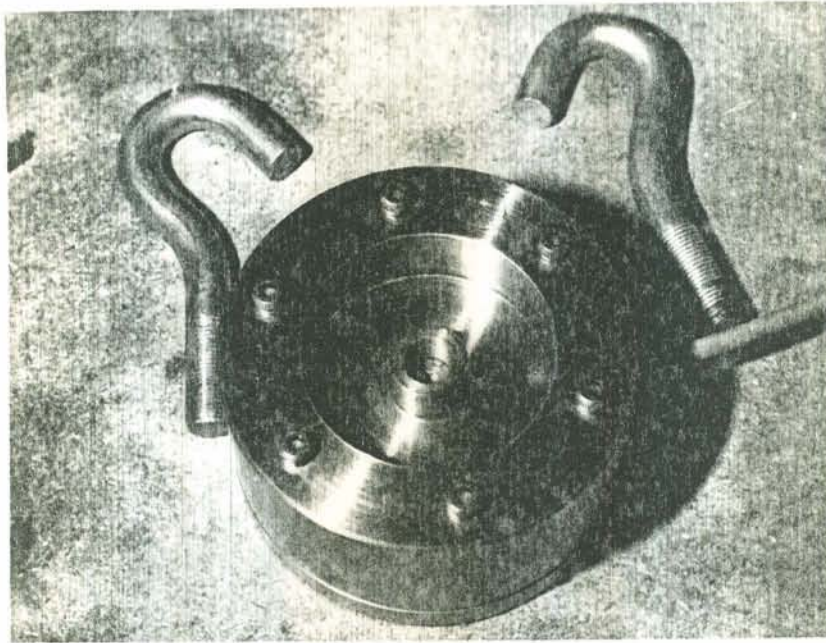


Fig. 7.2 Mostra a célula de carga III, para tração e compressão

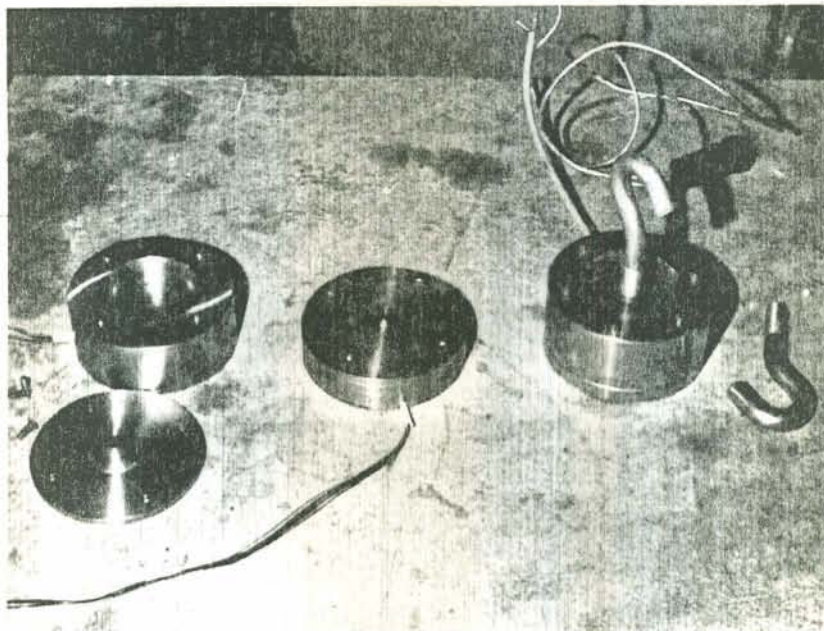


Fig. 7.3 - Objetiva as células de carga I, II e III respectivamente.

7.3 - Ensaaios

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

Temperatura ambiente: $(18 \pm 4)^{\circ}\text{C}$

Sensibilidade da ponte (HBM KWS/T-5): 1000

Deformação simulada de 1‰ corresponde a 426 mV

A tabela III contém os dados obtidos com a célula de carga III ensaiada em cinco dias consecutivos.

Calibração Célula III- Valores típicos

Força (kN)	Desbalanço da ponte em mV (Sens. 1000)									
	1º dia		2º dia		3º dia		4º dia		5º dia	
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
0,6	60	60	60	58	60	57	59	57	59	57
1,2	120	120	120	116	119	115	119	116	118	116
2,4	240	233	237	234	236	233	238	234	236	233
3,6	356	355	356	354	355	353	354	353	353	352
4,2	413	410	412	412	413	411	412	410	412	410
4,8	474	473	473	473	472	471	472	471	470	471

C - Valores obtidos no carregamento (forças crescentes)

D - Valores obtidos no descarregamento (forças decrescentes)

TABELA III

Imprecisão: $\pm 0,5$ mV

7.4 - Alinearidade

Utilizando o processo já referido, obteve-se o valor de 0,8% para o desvio de linearidade desta célula.

7.5 - Repetitividade

A célula de carga III apresentou um desvio de 0,8%.

Calibração Célula III - valores médios

Força (N)	Desbalanço da ponte (em mV)	
	C	D
600	59,6	57,8
1200	119,2	116,6
2400	237,4	233,4
3600	354,8	353,4
4200	412,4	410,6
4800	472,2	471,8

TABELA IV

Imprecisão: $\pm 0,1$ mV

7.6 - Calibração

A figura 7.4 mostra a curva de calibração da célula III.

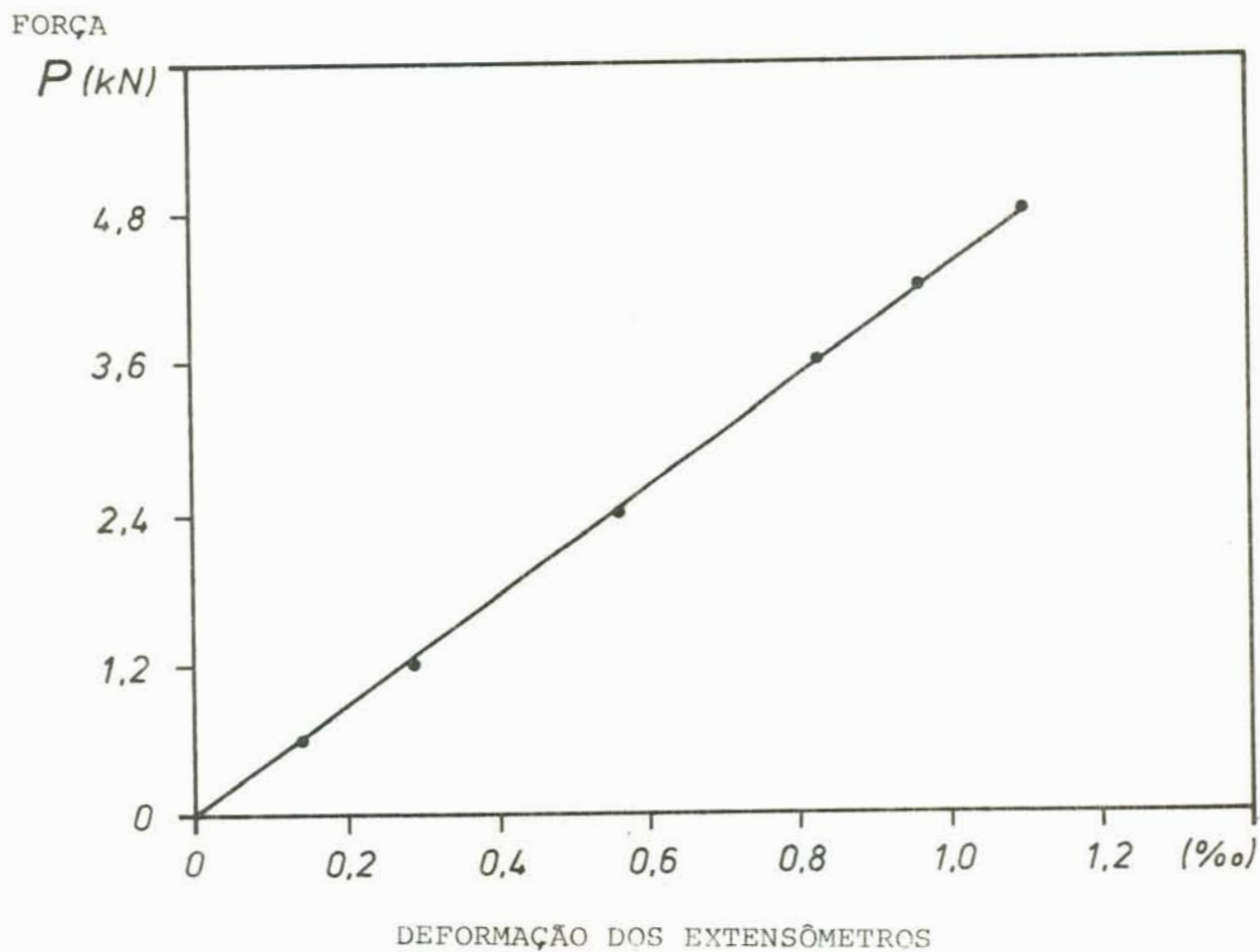


Fig.7.4

Célula de carga III
Máquina RPU6 e anel dinamométrico

Então, em relação às duas células anteriormente executadas, obtivemos um ótimo progresso em termos de linearidade e repetitividade.

8 - CÉLULA DE CARGA IV (5), (6), (7)

8.1 - Finalidade

Tendo funcionado a contento a célula de carga III, o que é um indicador da boa adaptabilidade do modelo e de acertadas as previsões teóricas, projetamos, construímos e experimentamos a célula de carga IV (ver figura 8.1) na qual fizemos as modificações seguintes:

- 1) mudamos a geometria, com a finalidade de facilitar a usinagem de tais transdutores, visando aplicações industriais. Colocou-se a placa sensora na parte superior;
- 2) no projeto usamos a teoria da carga circunferencialmente distribuída;
- 3) aumentamos a capacidade para 30 kN com a finalidade de experimentar as possíveis variações e dispor nos nossos laboratórios de um transdutor para maior capacidade;
- 4) utilizamos um outro material, o SAE D6, temperamos e revenimos para aumentar sua tensão de escoamento e não alterar excessivamente suas dimensões, já que a finalidade é comparar seu comportamento com as outras já construídas;
- 5) neste modelo, a rosca utilizada, foi efetuada no lado externo do pino.

Frente às modificações executadas, esta célula de carga IV, possui dimensões semelhantes à célula III, possuindo também o pino engastado na placa, sendo também para tração e compressão e possuindo como diferença fundamental dentre as três células anteriores, o fato de que a própria tampa superior que é engastada no anel, é a placa sensora.

8.2 - Projeto

No presente caso a conceituação é semelhante à utilizada para a construção das células I e II, com a diferença de que se utilizou o modelo da distribuição circunferencial de carga. (39)

Dimensionou-se a célula de carga IV, a partir dos seguintes dados: (38), (40)

Carga nominal: 30 kN

Material: aço SAE D6

Coefficiente de segurança: 2,5

Tensão de escoamento: 1500 N/mm²

Rigidez entre placa e anel $\frac{\psi(p/M=1)}{\psi(a/M=1)} = 119$

Tratamento térmico: têmpera e revenimento (dureza 48Rc). Note-se a elevada tensão de escoamento adotada.

A figura 8.1 mostra a célula de carga IV, em corte com dimensionamento. A figura 8.2 mostra a calibração da célula de carga IV.

Célula IV: Corte com dimensionamento

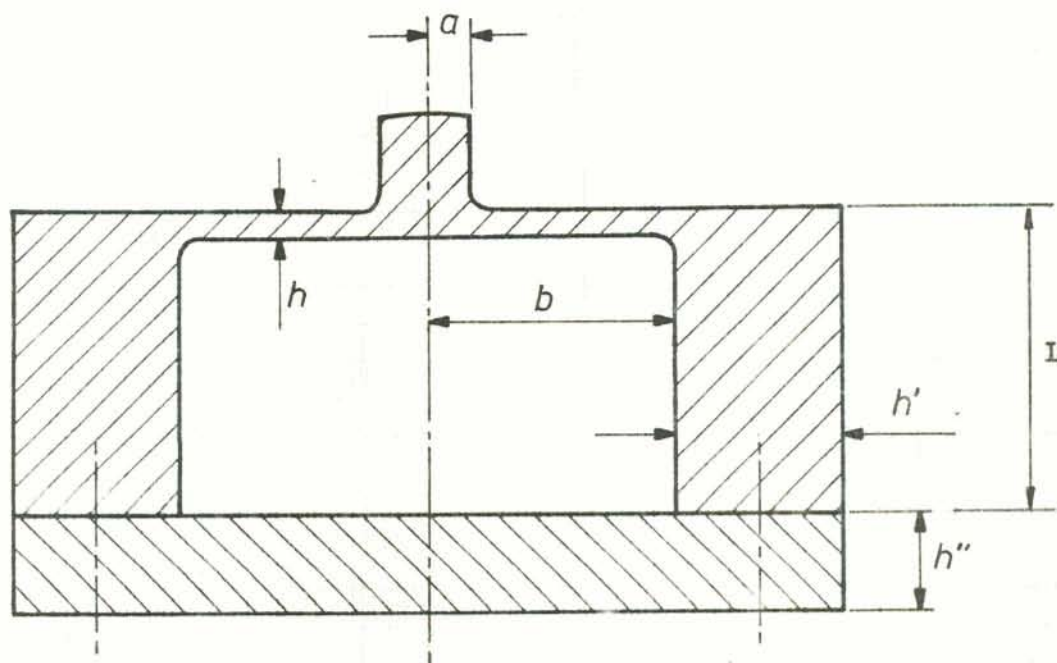


FIGURA 8.1

$$a = 5,5 \text{ mm}$$

$$b = 33\text{mm}$$

$$h = 4,6\text{mm}$$

$$h' = 14\text{mm}$$

$$h'' = 13\text{mm}$$

$$L = 40\text{mm}$$

Apresentamos a seguir os passos fundamentais utilizados para desenvolver a célula IV, conforme desenvolvimento temático apresentado no Apêndice B.

Então, de acordo com Feodosiev⁽⁵⁾ os momentos radiais (M_r) e tangenciais (M_t) calculam-se por:

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} \right) + \frac{a^2}{2r^2} (1 - \mu) - 1 \right]$$

$$M_t = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} \right) + \frac{a^2}{2r^2} (1 - \mu) - \mu \right]$$

Para $r \geq a$

e a deformação angular da placa para um momento unitário é dada por:

$$\psi_{(P/M=1)} = \frac{b}{D_p (1 + \mu)}$$

onde b é o raio da placa e h é a espessura da placa,

$$D_p = \frac{Eh^3}{12 (1 - \mu^2)} = \text{rigidez da placa}$$

No centro da placa os momentos ficam:

$$(M_{r/r=a}) = (M_{t/r=a}) = \frac{P}{4\pi} (1 + \mu) \left[\ln \frac{b}{a} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} - \frac{1}{2} \right]$$

e no engastamento

$$(M_{r/r=b}) = \frac{P}{4\pi} \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right),$$

onde a é o raio da circunferência em que a carga está aplicada e b é o raio da placa.

Para o caso de máxima sensibilidade temos $M_{r/r=a} = M_{r/r=b}$, que resolvendo-se por tentativas chega-se ao valor de

$\frac{a}{b}$:

$$\frac{a}{b} = 0,34$$

Vejam os valores encontrados para $M_{r/r=a} = M_{r/r=b}$ utilizando a relação acima encontrada.

$$(M_{r/r=a}) = \frac{P}{4\pi} (1,3) \left[\ln \frac{1}{0,342} + \frac{1}{2} (0,342)^2 - \frac{1}{2} \right] = 0,065P$$

$$(M_{r/r=b}) = \frac{P}{4\pi} \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) = \frac{P}{12,56} (1 - 0,116) = 0,070P$$

Efetivamente, para a relação $\frac{a}{b} = 0,34$ os valores dos momentos são bastante próximos.

Tensões radiais e tangenciais

$$\sigma_r = \frac{6Mr}{h^2}, \quad \sigma_t = \frac{6Mt}{h^2}; \quad \sigma_{r\text{máx}} \leq \frac{\sigma_e}{sg} \cdot \frac{6Mr}{h^2} = \frac{\sigma_e}{sg} \cdot \dots$$

$$\therefore h = \sqrt{\frac{6Mr \cdot sg}{\sigma_e}}$$

Utilizando-se a relação $\frac{a}{b} = 0,34$ obtivemos $h=4,6\text{mm}$, usou-se $h=5\text{mm}$ e arbitrando-se $\frac{b}{h} = 6,6$, escolheu-se $b = 33\text{mm}$.

Cálculo da rigidez da placa (necessário para dimensionar o anel):

$\psi_{(p/M=1)}$: representa a deformação angular da placa na extremidade; para momento unitário.

D_p : rigidez da placa.

$$D_p = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = 2,404 \times 10^4 \text{ N} \times \text{mm}$$

$$\psi_{(p/M=1)} = \frac{b}{D_p (1 + \mu)} = 1,056 \times 10^{-5}$$

$$\text{Então temos } \psi_{(p/M=1)} = 1,056 \times 10^{-5} \text{ rad/N.mm/mm}$$

$$\text{Também quer-se } \psi_{(a/M=1)} \ll \psi_{(p/M=1)}$$

pois a deformação do anel deve ser bem menor que a deformação da placa para que se justifique a utilização do anel.

$$\text{Arbitrando-se } \frac{\psi_{(a/M=1)}}{\psi_{(p/M=1)}} = \frac{1}{28} ;$$

$$\psi_{(a/M=1)} = 3,79 \times 10^{-7} \text{ rad/N.mm/mm}$$

Aplicando-se o formulário para cilindros longos

$$\psi_{(a/M=1)} = \frac{b'}{D} = \sqrt[4]{\frac{h'^2 \cdot b'^2}{3(1-\mu^2) \frac{Eh'^3}{12(1-\mu^2)}}} = \frac{9,118}{Eh'^2} \sqrt{\frac{b'}{h'}} \times (1 - \mu^2)^{3/4}$$

h' = espessura da parede do cilindro

b' = comprimento elástico do cilindro

D = rigidez flexional do cilindro

$$\text{Isolando-se } h' \text{ temos: } h' = \left[\frac{9,118 \sqrt{b'(1-\mu^2)^{3/4}}}{E \cdot \psi_{(a/M=1)}} \right]^{2/5}$$

substituindo-se os valores já encontrados vem

$$h' = 13,0 \text{ mm}$$

Tomou-se para a espessura da parede do cilindro

$h' = 14\text{mm}$, para termos melhor rigidez.

Cálculo do comprimento elástico do cilindro

$$b' = \sqrt[4]{\frac{h'^2 b^2}{3(1-\nu^2)}} = 16,5 \text{ mm}$$

Caso fôssemos utilizar a teoria dos cilindros longos, a teoria recomendaria o valor $L \geq 4b \cong 66\text{mm}$. Devido a esta excessiva altura, utilizou-se a teoria dos cilindros curtos (7), mas para

$$L = 40\text{mm} \text{ (valor arbitrado)}$$

$$\zeta^* = \frac{L}{b'} = 2,4 \text{ rad}$$

$$S = \sinh \zeta^* = 5,46$$

$$C = \cosh \zeta^* = 5,56$$

$$s = \sin \zeta^* = 0,675$$

$$c = \cos \zeta^* = -0,737$$

$$\text{Para a rigidez flexional } D = \frac{Eh'^3}{12(1-\nu^2)} = 5,27 \times 10^7 \text{ N.mm}$$

$$\psi_a / (M=1) = \frac{-b}{D} \times \left(\frac{SC + sc}{S^2 - s^2} \right) = 3,19 \times 10^{-7} \text{ rad/N.mm/mm}$$

A relação de rigidez entre a placa e o anel passou a ser:

$$\frac{\psi_a / (M=1)}{\psi_p / (M=1)} = \frac{1}{33}$$

valor razoável frente ao pré-estabelecido, note-se que aumentou-se a espessura do anel para 14mm, portanto, as dimensões finais ficaram sendo:

$$a = 5,5 \text{ mm} \text{ (raio do pino)}$$

$$b = 33,0 \text{ mm} \text{ (raio interno da placa)}$$

$$h' = 14,0 \text{ mm} \text{ (espessura da parede do anel)}$$

$$L = 40 \text{ mm} \text{ (altura do anel)}$$

$h = 5,0 \text{ mm}$ (espessura da placa)

$h'' = 13,0 \text{ mm}$ (espessura da tampa inferior, arbitrada como 2,6 vezes a espessura da placa).

Assim a nossa célula está projetada para compressão de 30kN. A limitação na tração deve-se ao tipo de material a ser usado nas porcas e parafusos de adaptação, que em geral não são tratados termicamente.

A figura 8.1 apresenta a célula IV em corte, com dimensionamento.

8.3 - Cálculo das Deformações

Deformações correspondentes à carga de projeto P_M .

Os momentos radiais e tangenciais na região central da célula de carga ($r \leq a$) são iguais e têm o seguinte valor (pág.8.5)

$$(M_t/r=a) = (M_r/r=a) = 0,06532 \cdot 30000 = 1960 \text{ N.mm/mm}$$

Próximo ao engastamento, e para o mesmo valor P_M da carga, o valor do momento radial é (pág.8.5):

$$(M_r/r=b) = -0,07027 \times 30000 = -2108 \text{ N.mm/mm}$$

e o momento tangencial é

$$(M_t/r=b) = \frac{P}{4\pi} \left[(0,342)^2 - 0,3 \right] = -437 \text{ N.mm/mm}$$

Na região central as tensões radiais e tangenciais são iguais e têm o valor (pág. 8.5)

$$(\sigma_r/r=a) = (\sigma_t/r=a) = \frac{6 (M_r/r=a)}{h^2} = \frac{6 \times 1960}{5^2} = 470,4 \text{ N/mm}^2$$

Próximo ao engastamento, a tensão radial tem valor

$$\left(\sigma_{r/r=b}\right) = \frac{-6(M_r/r=b)}{h^2} = -505,9 \text{ N/mm}^2$$

e a tensão tangencial é

$$\left(\sigma_{t/r=b}\right) = \frac{-6(M_t/r=b)}{h^2} = -104,9 \text{ N/mm}^2$$

Resultando na região central as seguintes deformações (item 5.7):

$$\left(\epsilon_{r/r=a}\right) = \left(\epsilon_{t/r=a}\right) = \frac{(1 - \nu)(\sigma_{r/r=a})}{E} = 1568 \text{ } \mu\text{m/m}$$

e próximo ao engastamento a deformação radial fica sendo

$$\left(\epsilon_{r/r=b}\right) = \frac{(\sigma_{r/r=b}) - \nu(\sigma_{t/r=b})}{E} = -2259 \text{ } \mu\text{m/m}$$

O somatório das deformações correspondentes aos quatro pontos de colagem dos "strain gauges" que conduzem a máxima sensibilidade da célula de carga IV é:

$$2 \times 1568 + 2 \times 2259 = 7654 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Veja-se os valores medidos no item 8.7 onde a carga de projeto (30kN) corresponde uma deformação dos extensômetros de 6271 $\mu\text{m/m}$, resultando uma diferença entre o valor medido (6271 $\mu\text{m/m}$) e calculado (7654 $\mu\text{m/m}$) de 18%.

8.4 - Ensaios

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições

Temperatura ambiente: $(18 \pm 4)^{\circ}\text{C}$

Sensibilidade da ponte (HBM KWS/T-5): 2000

Deformação simulada de 1‰ corresponde a 214mV

A tabela V contém ensaios em cinco dias consecuti-
vos.

Calibração Célula IV - Valores Típicos

Força (kN)	Desbalanço da ponte em mV. Sensibilidade 2000									
	1º dia		2º dia		3º dia		4º dia		5º dia	
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
6	274,4	274	274	274	274	276	274	275	276	275
12	548	546	548	547	549	549	549	548	548	548
18	811	815	813	814	811	810	815	815	815	814
24	1083	1083	1083	1086	1083	1083	1085	1086	1084	1085
30	1341	1345	1340	1345	1345	1345	1342	1346	1342	1345

C - Valores obtidos no carregamento (forças crescentes)

D - Valores obtidos no descarregamento (forças decrescentes)

TABELA V

8.5 - Alinearidade

Utilizando o processo já referido, chegamos ao valor de 0,8% para a alinearidade desta célula.

8.6 - Repetitividade

A célula de carga IV apresentou um desvio de 0,6%.

Convém notar-se que, utilizando-se 20% menos da capacidade máxima para a qual esta célula foi projetada, obtivemos os seguintes valores:

Alinearidade: 0,5%

Repetitividade: 0,5%

Portanto, verifica-se que as características de tais células melhoram sensivelmente quando operam abaixo de 20% de sua capacidade máxima. Também devemos observar que a célula de carga IV é para uma capacidade 12 vezes superior a da célula III. Note-se que devido a escolha de um material mais nobre a sensibilidade da célula IV, é aproximadamente 10 vezes maior que a da célula III (Veja-se figuras 8.2 e 7.4).

Calibração Célula IV - Valores Médios

Força (kN)	Desbalanço da ponte em mV (sensibilidade 2000)	
	C	D
6	274,4	274,8
12	548,4	547,6
18	813,0	813,6
24	1083,6	1084,6
30	1342,0	1345,2

TABELA VI

imprecisão: $\pm 0,1$ mV

As figuras 12.3 e 12.4 mostram a célula IV

8.7 - Calibração

A figura 8.2 mostra a curva de calibração da célula de carga IV.
FORÇA

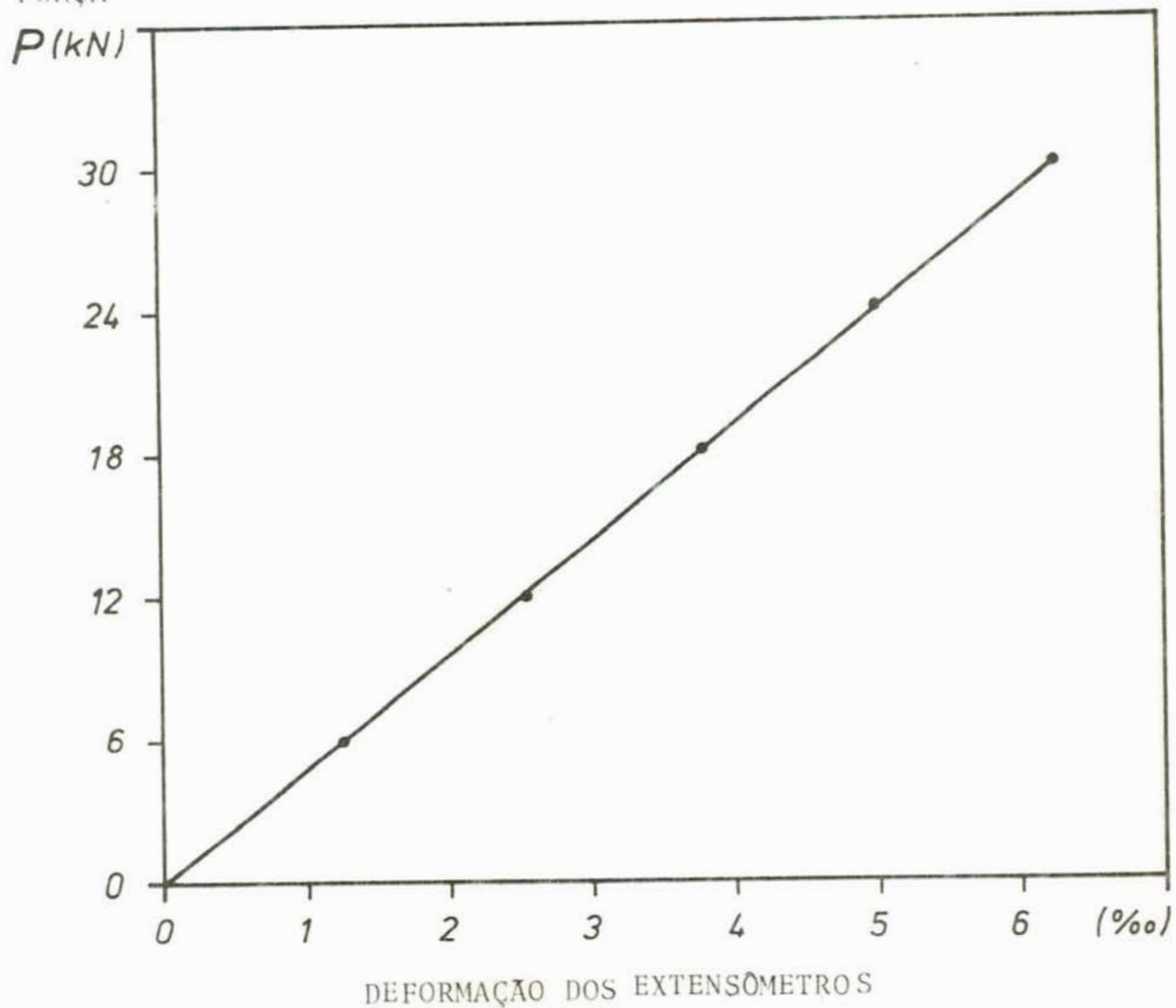


FIGURA 8.2

Célula de Carga IV

Curva Força x Deformação

Máquina RPU6 com anel dinamométrico

Estes pontos correspondem aos valores indicados na tabela (IV.2)

9 - CÉLULA DE CARGA V

9.1 - Finalidade

Através dos valores obtidos por meio das células de carga anteriores, constatamos que os modelos matemáticos teóricos utilizados para a execução dos projetos fornecem ótimos resultados práticos para as capacidades utilizadas. Em vista disto, resolvemos utilizar a mesma geometria, material e tratamento térmico aplicado na célula IV e executar a célula de carga V, para 200 kN de capacidade, com a finalidade de:

- 1) investigar o comportamento em termos de linearidade e repetitividade numa larga faixa de capacidade;
- 2) verificar as dimensões necessárias para células de placa de alta capacidade;
- 3) analisar a possibilidade de utilização e execução industrial.

9.2 Projeto

Foi empregada a mesma conceituação teórica e seqüência de projeto utilizado para desenvolver a célula de carga IV. Foi construída em aço SAE 4340, temperado em óleo e revenido. Possui o pino engastado na placa sensora que constitui a tampa superior da célula, a qual é engastada no anel. Como a an

terior, servirá para tração e compressão.

Dimensionou-se a célula de carga V , a partir dos seguintes dados: (38), (39), (40)

Carga nominal: 200 kN

Material: aço SAE 4340

Coefficiente de segurança: 3

Tensão de escoamento: 1500 N/mm²

Rigidez entre placa e anel: $\frac{\psi_{(P/M=1)}}{\psi_{(a/M=1)}} = 20$

Tratamento térmico: têmpera e revenimento

(dureza 48 Rc)

A figura 9.1 mostra a célula de carga V , em corte com dimensionamento. A figura 9.2 mostra a curva de calibração da célula de carga V .

Célula de carga V: Corte com dimensionamento

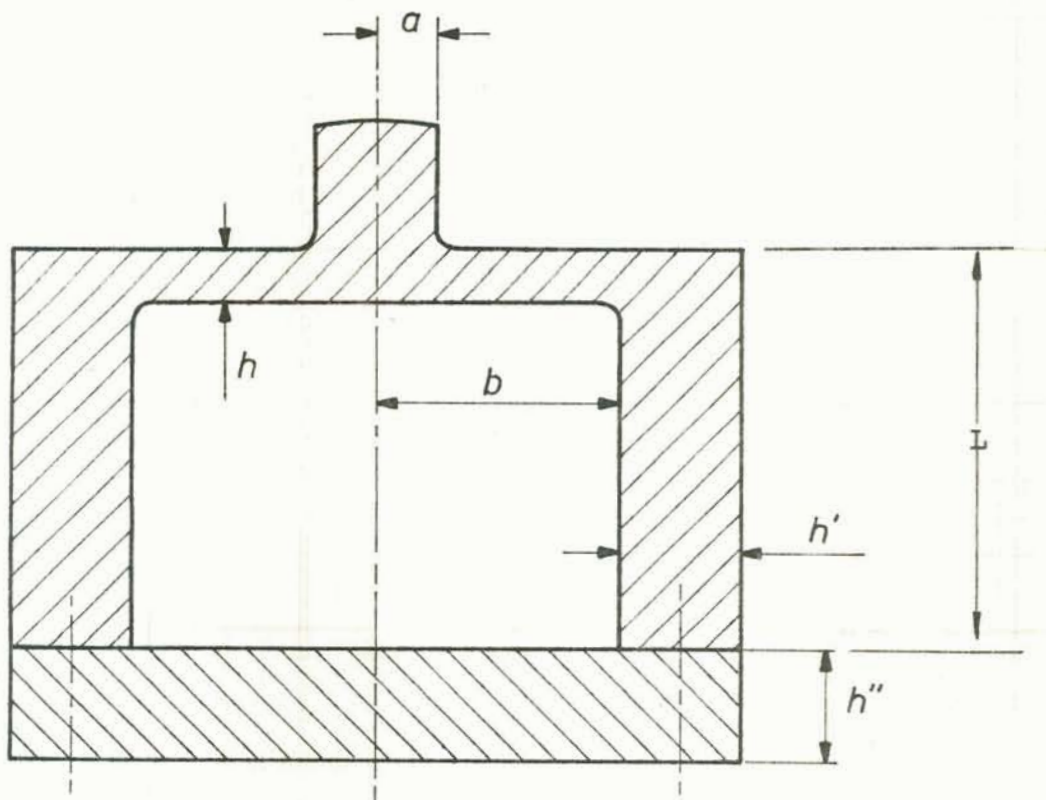


FIGURA 9.1

$$a = 16\text{mm}$$

$$b = 65\text{mm}$$

$$h = 13\text{mm}$$

$$h' = 32\text{mm}$$

$$h'' = 30\text{mm}$$

$$L = 85\text{mm}$$

9.3 - Cálculo das deformações

Deformações correspondentes à carga de projeto $P_M^{(39)}$

Utilizando-se o mesmo formulário aplicado no item 8.3 e os valores das dimensões da célula de carga V mostradas no item 9.2, obtiveram-se os seguintes valores para os momentos, tensões e deformações na placa:

$$(M_t/r=a) = (M_r/r=a) = 0,06532 \times 200000 = 13064 \text{ N.mm/mm}$$

$$(M_r/r=a) = -14054 \text{ N.mm/mm}$$

$$(M_t/r=b) = -2913 \text{ N.mm/mm}$$

$$(\sigma_r/r=a) = (\sigma_t/r=a) = \frac{6 \times 13064}{(13)^2} = 463,8 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_r/r=b) = -490 \text{ N/mm}^2$$

$$(\sigma_t/r=b) = -103 \text{ N/mm}^2$$

$$(\epsilon_r/r=a) = (\epsilon_t/r=a) = \frac{(1-\mu)(\sigma_r/r=a)}{E} = 1546 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$(\epsilon_r/r=b) = \frac{(\sigma_r/r=b) - \mu(\sigma_t/r=b)}{E} = 2186 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Somatório das deformações:

$$2 \times 1546 + 2 \times 2186 = 7464 \text{ } \mu\text{m/m}$$

A excessiva diferença entre os valores calculados de 7464 $\mu\text{m/m}$ e o medido 3811 $\mu\text{m/m}$ (ver item 9.6), deveu-se a uma rachadura existente na parte central da célula, ocorrida acidentalmente durante os ensaios.

9.4 - Ensaaios

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

Temperatura ambiente: $(18 \pm 4)^{\circ}\text{C}$

Sensibilidade da ponte (HBM KWS/T-5): 1000

Deformação simulada de 1%. corresponde a 425 mV.

A tabela VII contém os dados obtidos com a célula de carga V, ensaiada em cinco dias consecutivos.

Calibração da Célula V - Valores Típicos

Força (kN)	Desbalanço da Ponte em mV (sensibilidade 1000)									
	1º dia		2º dia		3º dia		4º dia		5º dia	
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
60	488	485	488	488	488	488	490	485	489	490
110	820	819	821	820	821	821	818	819	820	820
150	1238	1238	1239	1238	1240	1239	1240	1241	1239	1240
200	1646	1647	1646	1646	1645	1646	1646	1646	1643	1644

C - Valores obtidos no carregamento (forças crescentes)

D - Valores obtidos no descarregamento (forças decrescentes)

TABELA VII

Imprecisão: $\pm 0,5$ mV

9.5 - Alinearidade

Chegou-se analiticamente a 0,6% para o desvio de linearidade desta célula. Como a confiabilidade da aparelhagem é de 0,5%; portanto, o valor encontrado se aproxima deste limite.

9.6 - Repetitividade

A célula de carga V apresentou um desvio de 0,6%.

Calibração da Célula V - Valores Médios		
Força (kN)	Desbalanço da ponte (mV) Sensibilidade 1000	
	C	D
60	488,6	488,8
100	820,0	819,8
150	1239,2	1239,2
200	1645,2	1645,8

TABELA VIII

Imprecisão: $\pm 0,1$ mV

9.7 - Calibração

A figura 9.2 mostra a curva de calibração da célula de carga V.

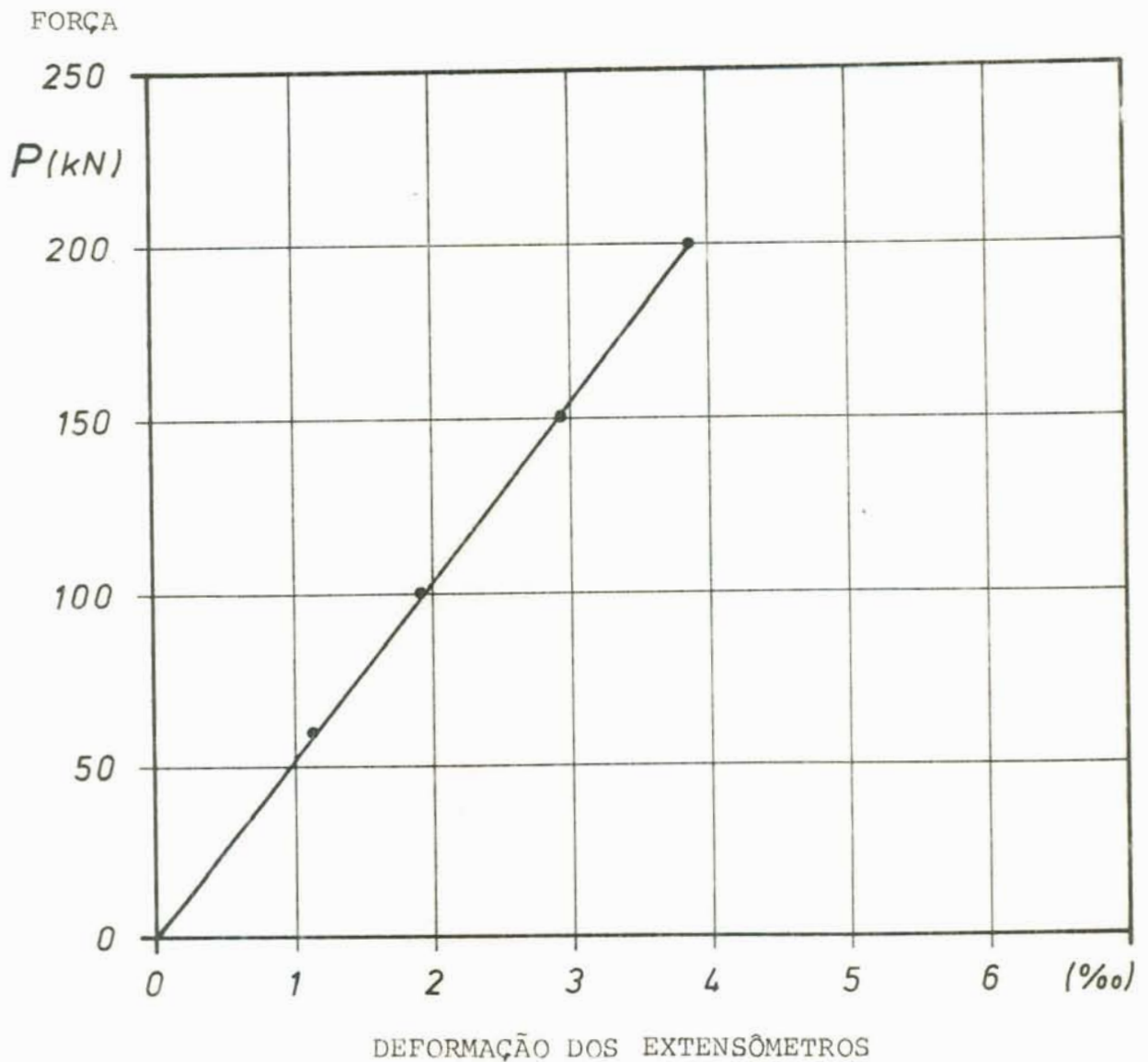


FIGURA 9.2

Célula de Carga V
Curva de Força x Deformação
Prensa manual com anel dinamométrico
Estes pontos correspondem aos valores indicados na
tabela V.2.

Note-se que, embora haja um ótimo comportamento desta célula, fazemos restrição no que diz respeito: ao volume, número de peças, peso, características próprias de usinagem e elementos acoplantes quando em tração.

As figuras 12.3 e 12.4 mostram a célula V.

TERCEIRA PARTE

CÉLULAS DE CARGA TIPO ANEL, APOIADO LATERALMENTE

10. INTRODUÇÃO

Considerando o peso excessivo, dimensões avantajadas e trabalho de usinagem, necessários a uma razoável sensibilidade, repetitividade e linearidade para as células de placa de alta capacidade, haja vista a célula de carga V, partimos para o estudo de uma nova geometria. Então, pesquisando uma nova geometria para células de alta capacidade, que não fossem volumosas nem excessivamente pesadas, mas de fácil execução, de tal sorte a facilitar sua construção e utilização, projetamos e construímos as células de carga em forma de anel apoiado lateralmente (células de carga VI e VII, Fig. 12.3). A usinagem de tais células é simples, uma vez que é necessário, partindo de um tarugo cilíndrico, apenas efetuar um furo central e aplainar a superfície externa em dois planos paralelos diametralmente opostos. Isto com o objetivo de reduzir as tensões superficiais de contato e ao mesmo tempo favorecer o equilíbrio estável (figura 12.1). Neste tipo de célula os extensômetros são colados em posições diametralmente opostas, de acordo com o diagrama dos momentos fletores indicado na figura C-7 (pág. C-8).

Apresentamos no Apêndice C, o modelo matemático utilizado e considerações efetuadas segundo Feodosiev(5), para a

execução da seqüência de projeto das células tipo anel apoiado lateralmente.

Portanto, tal geometria tem como objetivos básicos:

- 1) Facilitar a usinagem;
- 2) Diminuir o volume das células de carga para medições de altas cargas (consideradas aquelas superiores a 300kN);
- 3) Diminuir o peso de tais transdutores;
- 4) Evitar, sempre que possível, os tratamentos térmicos;
- 5) Evitar problemas decorrentes do empenamento;
- 6) Baratear o custo de tais transdutores;
- 7) Eliminar o maior número de peças possíveis, já que esta geometria constitui-se numa peça única.

11. CÉLULA DE CARGA VI ^{(5), (6), (36), (39)}

11.1 - Finalidade

Conforme retro-exposto, esta célula de carga é do tipo anel apoiado lateralmente. Foi construída levando-se em consideração às limitações ponderadas em relação a célula de carga V, tendo como finalidade a medição de altas cargas. Apesar disto, não há impedimento para que tal geometria também funcione em projetos visando baixas cargas.

11.2 - Projeto

Devido à mudança radical imposta à geometria desta célula de carga em relação às outras (de placas), foi necessário utilizar-se outra conceituação teórica de Feodosiev(5), a qual adaptamos às nossas necessidades, conforme relatamos extensivamente no Apêndice C. Esta célula de carga como está construída, poderá ser utilizada apenas para compressão. Dimensionou-se a célula de carga VI, a partir dos seguintes dados:

Carga nominal: 400 kN

Material: aço SAE 4340

Coefficiente de segurança: 2

Tensão de escoamento: 750 N/mm^2

Relação entre raio interno e raio externo: 0,4

Relação espessura e raio externo: 0,8

Tratamento térmico: não foi efetuado

A figura 10.1 mostra a célula de carga VI com dimensionamento.

A figura 10.2 mostra a curva de calibração da célula de carga VI.

Nas células de carga tipo anel apoiado lateralmente, os extensômetros foram colados em posições diametralmente opostas (nas regiões de máxima deformação), e ligados em circuito tipo ponte inteira.

Célula de carga VI: Corte com dimensionamento

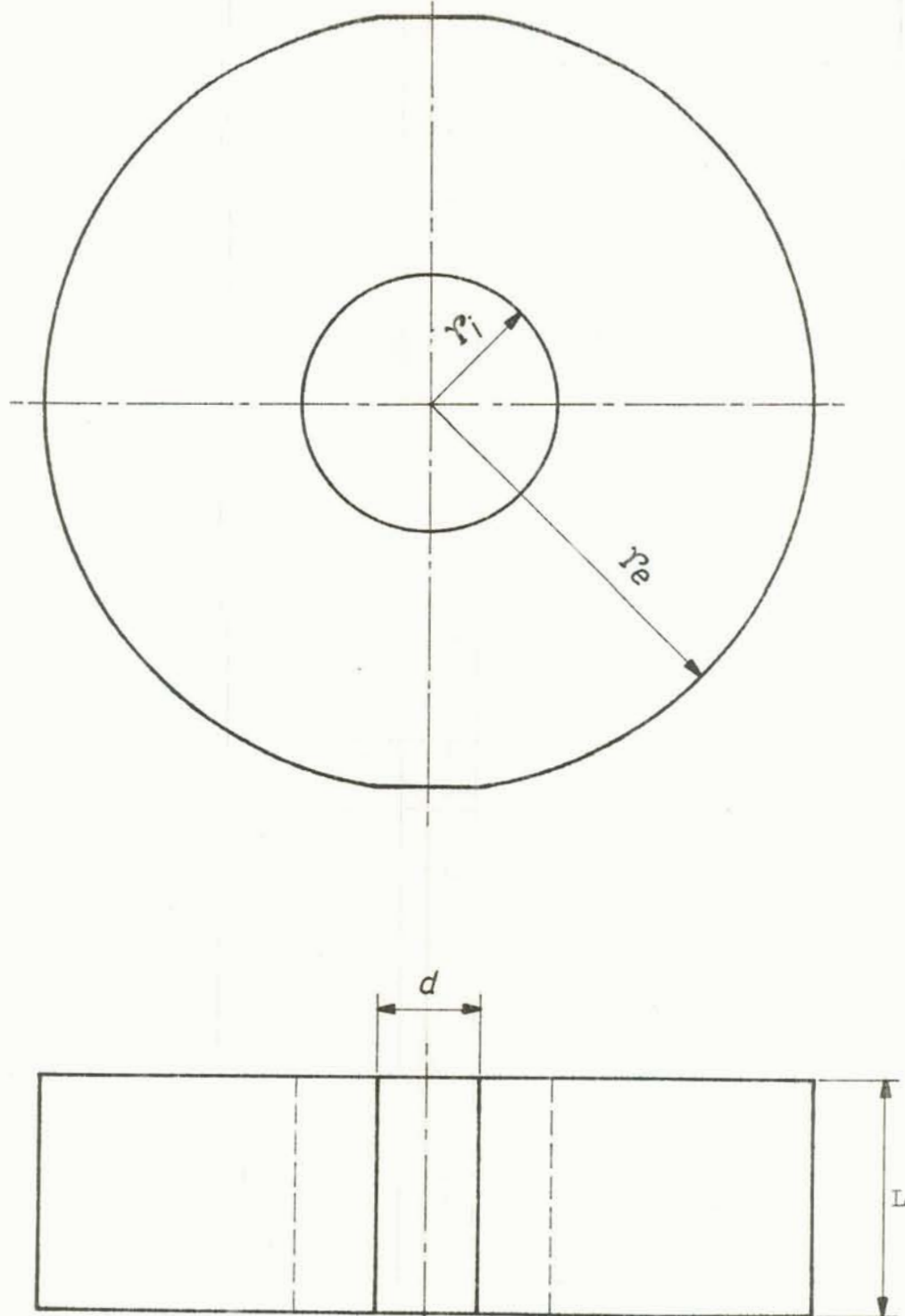


FIGURA 10.1

$$\begin{aligned}r_i &= 32,4 \text{ mm} \\r_e &= 80,9 \text{ mm} \\L &= 69,7 \text{ mm} \\d &= 16,7 \text{ mm}\end{aligned}$$

Apresentamos a seguir os passos fundamentais utilizados para desenvolver a célula VI, conforme desenvolvimento matemático apresentado no Apêndice C.

Consideremos, pois, de acordo com Feodosiev(5):

y = ordenada a partir da linha neutra

F_e = momento estático da seção com respeito à linha neutra

ρ_o = raio de curvatura do eixo correspondente ao baricentro da seção

r_o = raio de curvatura da linha neutra (flexão pura)

$e = \rho_o - r_o$, distância da linha neutra ao centro

F = área da seção transversal

h' = altura da seção transversal do anel

L = largura do cilindro

De acordo com o Apêndice C, temos

$$e = \rho_o - \frac{h'}{\ln \frac{\rho_o + h'/2}{\rho_o - h'/2}}$$

Cálculo do valor da distância da linha neutra ao

centro

$$\left. \begin{array}{l} r_e = \rho_o + h'/2 \\ r_i = \rho_o - h'/2 \end{array} \right] \rightarrow e = \rho_o - \frac{h'}{\ln \frac{r_e}{r_i}} = \rho_o - \frac{r_e(1-r_i/r_e)}{\ln(r_e/r_i)}$$

Cálculo da espessura do anel

$$h' = r_e - r_i = r_e \left(1 - \frac{r_i}{r_e}\right)$$

ção

Cálculo do raio correspondente ao baricentro da se-

$$\rho_o = \frac{r_e + r_i}{2} = \frac{r_e}{2} \left(1 + \frac{r_i}{r_e}\right)$$

Cálculo da área da seção transversal do anel

$$F = L \times h' = L (r_e - r_i) = L \cdot r_e (1 - r_i/r_e)$$

A expressão que fornece a área da seção F pode ser posta na forma

$$F = r_e \times \frac{L}{r_e} \cdot r_e (1 - r_i/r_e) = \frac{L}{r_e} \times r_e^2 (1 - r_i/r_e)$$

O valor de e em função de r_e e r_i/r_e , pode ser escrito

$$e = \frac{r_e}{2} \left(1 + \frac{r_i}{r_e}\right) - \frac{r_e (1 - r_i/r_e)}{\ln r_e/r_i}$$

O momento estático da seção com respeito à linha neutra pode ser escrito em função de r_e e r_i/r_e .

$$F \times e = \frac{L}{r_e} \times r_e^2 \left(1 - \frac{r_i}{r_e}\right) \times \left[\frac{r_e}{2} \left(1 + \frac{r_i}{r_e}\right) - \frac{r_e (1 - r_i/r_e)}{\ln r_e/r_i} \right]$$

e após algumas transformações pode ser posta na seguinte forma

$$F \cdot e = \frac{L}{r_e} \times \frac{r_e^3}{2} \left[1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2 \right] - \frac{L}{r_e} \times r_e^3 \frac{(1 - r_i/r_e)^2}{\ln r_e/r_i}$$

$$F \cdot e = \frac{L}{r_e} \times \frac{r_e^3}{2} \left[1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2 - \frac{2(1 - r_i/r_e)^2}{\ln r_e/r_i} \right]$$

Utilizando a relação $D = 2 \times r_e$, onde D é o diâmetro externo do anel, abitremos as relações $\frac{L}{D} = 0,4$ e $r_i/r_e = 0,4$

então $\frac{L}{r_e} = 0,8$ e

calculamos o momento estático da seção com respeito à linha neutra em função do raio externo r_e :

$$F.e = 0,8 \times \frac{r_e^3}{2} \left[1 - (0,4)^2 - \frac{2(1-0,4)^2}{\ln \frac{1}{0,4}} \right] = 0,0216 r_e^3$$

$$F.e = 0,0216 r_e^3$$

Calculamos a seguir os valores máximos da tensão normal σ devido ao momento fletor atuante na seção considerada. Os valores máximos da tensão σ ocorre nos pontos extremos onde

$$y = \begin{cases} r_e - r_o \\ r_i - r_o \end{cases}$$

$$\sigma = \frac{M}{F_e} \times \frac{y}{r_o + y}$$

Substituindo estes valores de y na equação

$$\sigma_{\text{ext.}} = \frac{M}{F_e} \times \frac{y}{r_o + y}, \text{ chegamos a}$$

$$\sigma_{\text{ext.}} = \frac{M}{F_e} \times \frac{r_e - r_o}{r_o + r_e - r_o} = \frac{M}{F_e} \times \frac{r_e - r_o}{r_e} = \frac{M}{F_e} \left(1 - \frac{r_o}{r_e} \right)$$

$$\sigma_{\text{int.}} = \frac{M}{F_e} \times \frac{r_i - r_o}{r_o + r_i - r_o} = \frac{M}{F.e} \frac{r_i - r_o}{r_i} = \frac{M}{F_e} \left(1 - \frac{r_o}{r_i} \right),$$

onde $\sigma_{\text{ext.}}$ = valor da tensão normal na superfície exterior do anel

$\sigma_{int.}$ = valor da tensão normal na superfície interior do anel.

O raio de curvatura da linha neutra é dado pela seguinte expressão:

$$r_o = \frac{h'}{\ln \frac{\rho_o + h'/2}{\rho_o - h'/2}} = \frac{r_e(1 - r_i/r_e)}{\ln r_e/r_i}$$

que pode ser posta na seguinte forma

$$\frac{r_o}{r_i} = \frac{r_e}{r_i} \times \frac{(1 - r_i/r_e)}{\ln \frac{r_e}{r_i}}$$

Substituindo nesta expressão o valor de $\frac{r_i}{r_e}$, determinamos $\frac{r_o}{r_i}$

$$\frac{r_o}{r_i} = 1,637$$

Calculamos a seguir o valor da tensão normal na superfície interna do anel

$$\sigma_{int.} = \frac{M}{Fe} \times \left[1 - \frac{r_e}{r_i} \times \frac{(1 - r_i/r_e)}{\ln r_e/r_i} \right] = - 0,637 \frac{M}{Fe}$$

Substituindo nesta expressão o valor de Fe em função do raio externo do anel

$$Fe = 0,0216 r_e^3$$

chegamos a uma expressão que dá o valor da tensão normal $\sigma_{ext.}$ em função do momento fletor M e do raio externo r_e :

$$\sigma_{int} = - 0,637 \frac{M}{Fe} = - 29,49 \frac{M}{r_e^3}$$

O sinal negativo (-) indica que a tensão é de compressão. Eliminando-se o sinal negativo e isolando-se r_e , chega-se a seguinte expressão

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{29,49 M}{\sigma_{int}}}$$

que dá o valor do raio externo r_e em função do momento fletor M e da tensão normal atuante na superfície interna do anel.

Os momentos máximos atuantes na seção de acordo com o diagrama indicado na figura C.7, são:

$$\text{Momentos} \left[\begin{array}{l} \Pr\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\right) = 0,182 \Pr \\ \frac{\Pr}{\pi} = 0,318 \Pr \end{array} \right.$$

Façamos $r = r_o$ onde

r_o = raio de curvatura da linha neutra da seção transversal do anel.

Calculamos a seguir o valor de $\frac{r_o}{r_e}$.

O valor de $\frac{r_i}{r_e} = 0,4$, havia sido arbitrado no início

O valor de $\frac{r_o}{r_i} = 1,637$ já tinha sido determinado em

função de $\frac{r_i}{r_e}$.

Podemos escrever $\frac{r_o}{r_e} = \frac{r_o}{r_i} \cdot \frac{r_i}{r_e}$, portanto

$$\frac{r_o}{r_e} = 0,6548$$

O valor máximo do momento fletor M , de acordo com o diagrama é $M = 0,318 Pr$, uma vez que $r_o = 0,6548 r_e$, o valor de M pode ser posto na forma $M = 0,318P \cdot 0,6548r_e = 0,2082Pr_e$.

Substituindo esta expressão na equação que dá o valor de r_e em função de r_e e σ_{int} , obtemos:

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{29,49M}{\sigma_{int.}}} = \sqrt[3]{\frac{29,49 \times 0,2082P \cdot r_e}{\sigma_{int.}}}$$

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{6,1398P \cdot r_e}{\sigma_{int.}}}$$

Para

$$P = 400 \text{ kN}$$

$$\sigma_e = 750 \text{ N/mm}^2, \text{ onde } \sigma_e \text{ é a tensão de escoamento}$$

$$sg = 2$$

$$r_e = \sqrt{\frac{6,1398 \times 2 \times P}{\sigma_e}}, \text{ onde fizemos } \sigma_{int.} = \frac{\sigma_e}{sg}$$

Portanto, as dimensões serão:

$$r_e = 80,9 \text{ mm}$$

Sendo $r_i/r_e = 0,4$, $r_i = 32,4 \text{ mm}$

$$\text{Também estabelecemos } \frac{L}{r_e} = 0,8 \text{ portanto } L = 64,7 \text{ mm}$$

Para reduzir as tensões superficiais de contato e favorecer

o equilíbrio da célula de carga numa posição estável vamos aplai
nar a superfície de apoio numa largura.

$$d = 16,7 \text{ mm}$$

Este valor foi encontrado através da expressão

$$d = \frac{P \cdot sg}{L \cdot \sigma_e}, \text{ onde } P = \text{ carga nominal}$$

sg = coeficiente de segurança

L = largura do anel

σ_e = tensão de escoamento do material

A figura 10.1 mostra a célula VI em corte (pág.11-3).

11.3 - Cálculo das deformações da célula de carga VI

De acordo com a figura C-7 constante no apêndice C, os pontos onde ocorrem as máximas deformações correspondem aos pontos onde está aplicada a carga P. Estes são os pontos utilizados no cálculo do coeficiente de segurança, e as deformações correspondem a $\epsilon_m = \frac{\sigma_e}{E \cdot sg}$.

Na figura C-7 os extensômetros foram colados nos pontos correspondentes aos números 1,2,3 e 4. Quando o anel é comprimido os pontos 1 e 3 são tracionados e 2 e 4 são comprimidos, considerando-se os extensômetros colados na parte interna do anel.

As deformações nos pontos 1 e 3 são máximas, e para a carga de projeto $P = P_M$, valem: $\epsilon_m = \frac{\sigma_e}{E \cdot sg}$. Nos pontos 2 e 4 as deformações são iguais à relação entre os momentos nos pontos 2 e 4 e os momentos nos pontos 1 e 3, multiplicada pelas deformações nos pontos 1 e 3, que são iguais a ϵ_m , ou seja:

$$\epsilon_{1,3} = \epsilon_m \quad , \quad \epsilon_{2,4} = \frac{\epsilon_m \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\Pi}\right)}{1/\Pi} = \epsilon_m \left(\frac{\Pi}{2} - 1\right)$$

onde:

$\epsilon_{1,3}$ = valor das deformações nos pontos 1 e 3.

$\epsilon_{2,4}$ = valor das deformações nos pontos 2 e 4.

O somatório das deformações nestes quatro pontos é igual a:

$$\Sigma \epsilon = 2 \cdot \epsilon_m + 2 \epsilon_m \left(\frac{\Pi}{2} - 1 \right) = 2 \epsilon_m \left(1 + \frac{\Pi}{2} - 1 \right) = \Pi \epsilon_m$$

uma vez que $\epsilon_m = \frac{\Pi \sigma e}{sg}$, o somatório das deformações fica sendo

$$\Sigma \epsilon = \frac{\Pi \sigma e}{E \cdot sg}$$

Portanto, para $P = P_M = 400 \text{ kN}$, tem-se

$$\Sigma \epsilon = \frac{\Pi \times 750}{210000 \times 2} = 5610 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Veja-se através do item 11.7 pela calibração que:

$$\text{Deformação medida} = \frac{1,005\text{V} \times 1000 \mu\text{m/m}}{0,21\text{V}} = 4786 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Verifica-se que a diferença entre o valor calculado (5610 $\mu\text{m/m}$) e o valor medido (4786 $\mu\text{m/m}$) é de 15%.

11.4 - Ensaio

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

Temperatura ambiente: $(18 \pm 4)^\circ\text{C}$

Sensibilidade de ponte (HBM KWS/T-5): 2000

Deformação simulada de 1% corresponde a 0,21V.

A tabela IX contém os dados obtidos com a célula de carga VI, ensaiada em cinco dias consecutivos.

Calibração da Célula VI - Valores Médios

Força (kN)	Desbalanço da ponte (mV)	
	C	D
50	0,120	0,120
100	0,245	0,246
150	0,370	0,369
200	0,500	0,500
250	0,625	0,625
300	0,755	0,756
350	0,880	0,880
400	1,005	1,004

C - Valores obtidos no carregamento (forças crescentes)

D - Valores obtidos no descarregamento (forças decrescentes)

TABELA IX

Imprecisão: $\pm 0,005$ V11.5 Alinearidade

Chegou-se a um valor menor que 0,5%, que é a imprecisão da aparelhagem utilizada.

11.6 Repetitividade

Esta célula de carga apresentou um desvio na repetitividade, da ordem de 0,5%.

Veja-se a ótima sensibilidade desta célula na figura 10.2.

As figuras 12.3 e 12.4 mostram a célula VI.

11.7 - Calibração

A figura 10.2 mostra a curva de calibração da célula de carga VI.

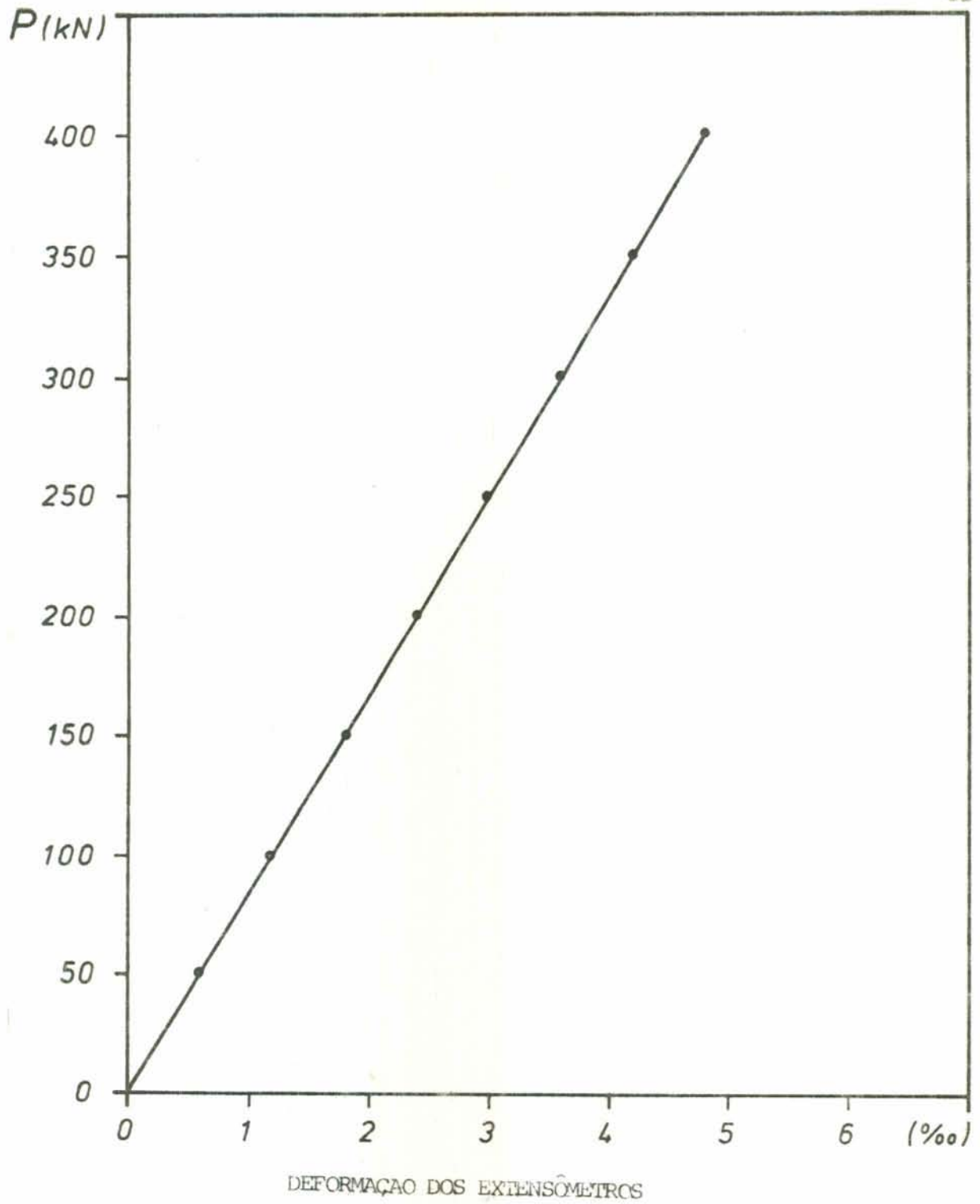


Fig.10.2

CÉLULA DE CARGA VI

CURVA FORÇA x DEFORMAÇÃO

PRENSA MANUAL COM ANEL DINAMOMÉTRICO

12 - CÉLULA DE CARGA VII (5), (6), (39)

12.1 - Finalidade

Através dos valores obtidos por meio da célula VI, verifica-se que o modelo teórico utilizado para a execução do projeto fornece ótimos resultados quanto a linearidade e repetitividade, para uma larga faixa de capacidades.

Resolveu-se então, utilizar a mesma geometria usando outro material, procurando limitar as dimensões com a finalidade de verificar as variações no comportamento.

12.2 - Projeto

Foi empregada a mesma conceituação teórica e sequência de projeto utilizado para desenvolver a célula de carga VI. Esta célula de carga, como está construída, poderá ser utilizada apenas para compressão.

Dimensionou-se a célula de carga VII, a partir dos seguintes dados:

Carga nominal: 400 kN

Material: aço SAE D6

Coefficiente de segurança: 2

Tensão de escoamento: 800 N/mm^2

Relação entre raio interno e raio externo: 0,3

Relação espessura e raio externo: 1,2

A figura 12,1 mostra a célula de carga VII, com dimensionamento.

A figura 12.2 mostra a curva de calibração da célula de carga VII.

Célula de carga VII: Corte com dimensionamento

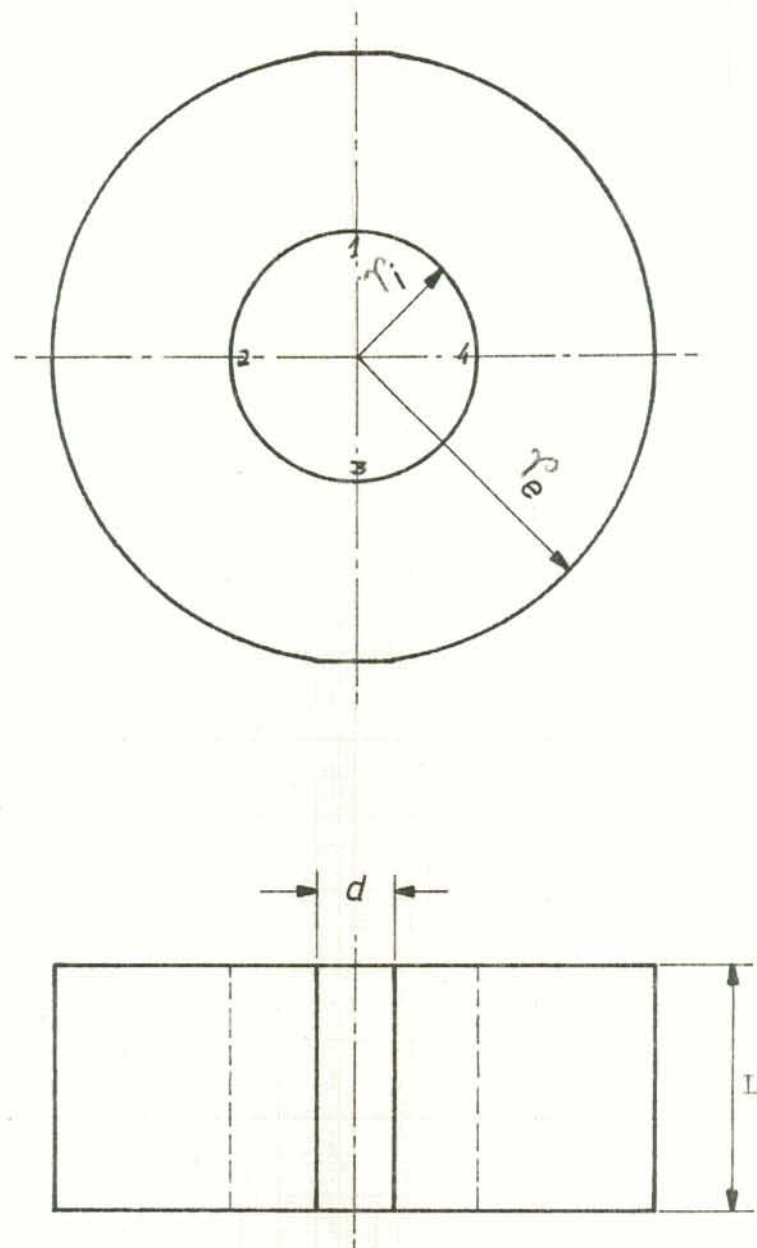


FIGURA 12.1

$$r_i = 19\text{mm}$$

$$r_e = 57\text{ mm}$$

$$L = 70\text{ mm}$$

$$d = 15\text{mm}$$

Os números 1,2,3,4 correspondem à posição de colagem dos "strain gauges"

12.3 - Cálculo das deformações da célula de carga VII

Deformações correspondentes à carga de projeto $P = P_M$.

De acordo com o formulário estabelecido no item 11.3, calcula-se o valor das deformações na célula de carga VII para $P = P_M = 400 \text{ kN}$.

$$\Sigma \varepsilon = \frac{\Pi \sigma_e}{E. \text{sg}} = 5984 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Veja-se através do item 12.7 pela calibração que:

$$\text{Deformação medida} = \frac{1,12\text{V} \cdot 1000 \text{ } \mu\text{m/m}}{0,21\text{V}} = 5333 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Verifica-se que a diferença entre o valor calculado (5984 $\mu\text{m/m}$) e o valor medido (5333 $\mu\text{m/m}$) é de 11%. Portanto, também para esta célula de carga tem-se ótima aproximação entre valores calculados e medidos adaptando-se perfeitamente o modelo adotado.

12.4 - Ensaaios

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

Temperatura ambiente: $(18 \pm 4)^\circ\text{C}$

Sensibilidade da ponte (HBM KWS/T-5): 2000

Deformação simulada de 1‰ corresponde a 0,21V

A tabela X contém os dados obtidos com a célula de carga VII, ensaiada em cinco dias consecutivos.

Calibração da Célula VII - Valores Médios

Força (kN)	Desbalanço da ponte (mV)	
	C	D
50	0,140	0,140
100	0,280	0,279
150	0,420	0,421
200	0,560	0,560
250	0,700	0,701
300	0,840	0,839
350	0,980	0,980
400	1,120	1,120

C - Valores obtidos no carregamento (forças crescentes)

D - Valores obtidos no descarregamento (forças decrescentes)

TABELA X

Imprecisão do equipamento de medida = $\pm 0,005$ V

12.5 - Alinearidade

Também com esta célula de carga obtivemos menos de 0,5%.

12.6 - Repetitividade

A célula de carga VII apresentou um desvio da ordem de 0,5%.

As figuras 12.3 e 12.4 mostram a célula VII.

Portanto, ao que tudo indica, esta geometria (ou seja as relações L/D e r_i/r_e da célula de carga VII) e o material empregado são mais favoráveis em termos de linearidade, repetitividade, volume, peso e facilidade de usinagem. Note-se ainda, que a referida célula pode ter suas dimensões reduzidas, desde que efetuado conveniente tratamento térmico para elevar sua tensão de escoamento.

12.7 - Calibração

A figura 12.2 mostra a curva de calibração da célula de carga VII.

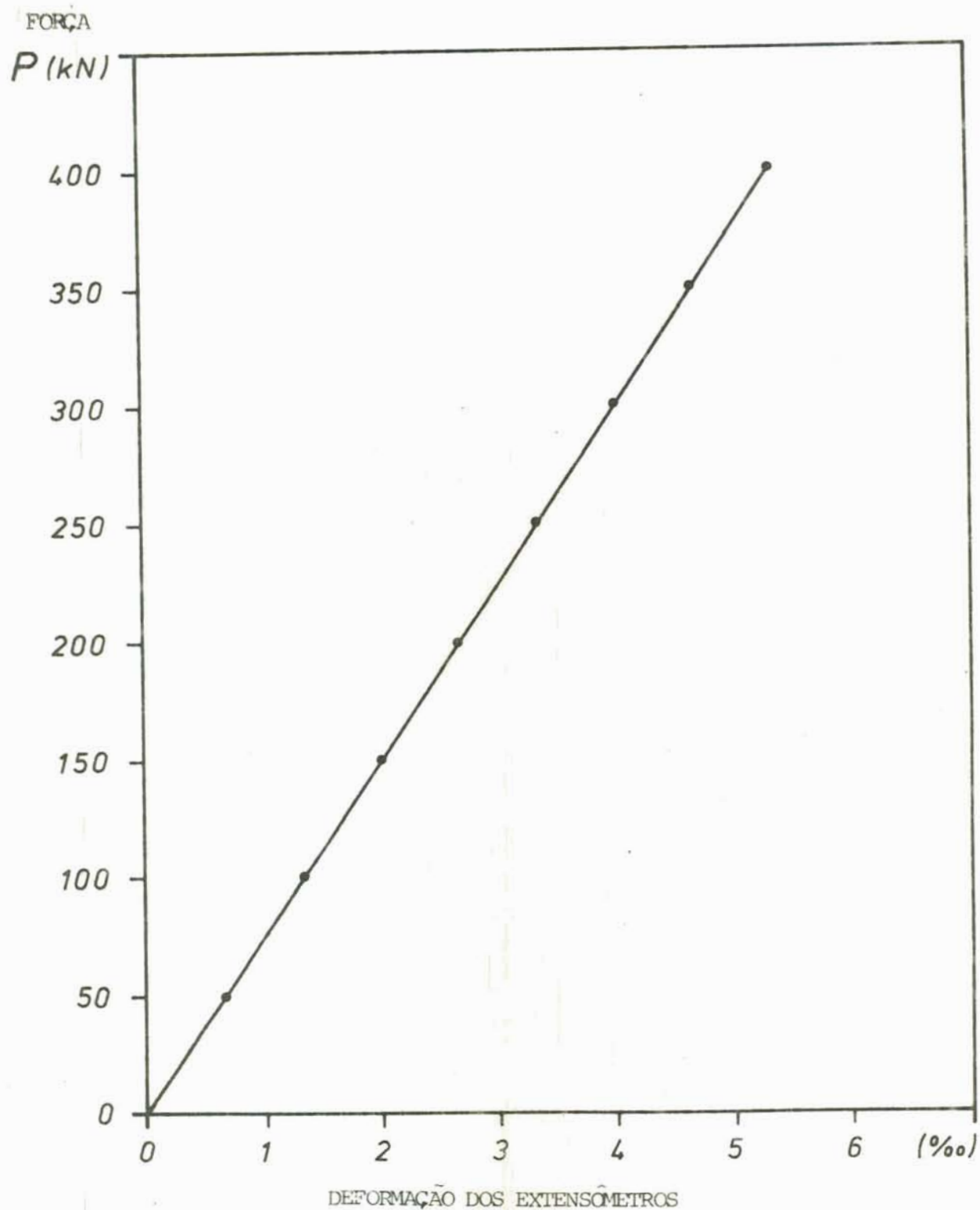


Fig. 12.2

CÉLULA DE CARGA VII

CURVA FORÇA \times DEFORMAÇÃO

Prensa manual com anel dinâmico

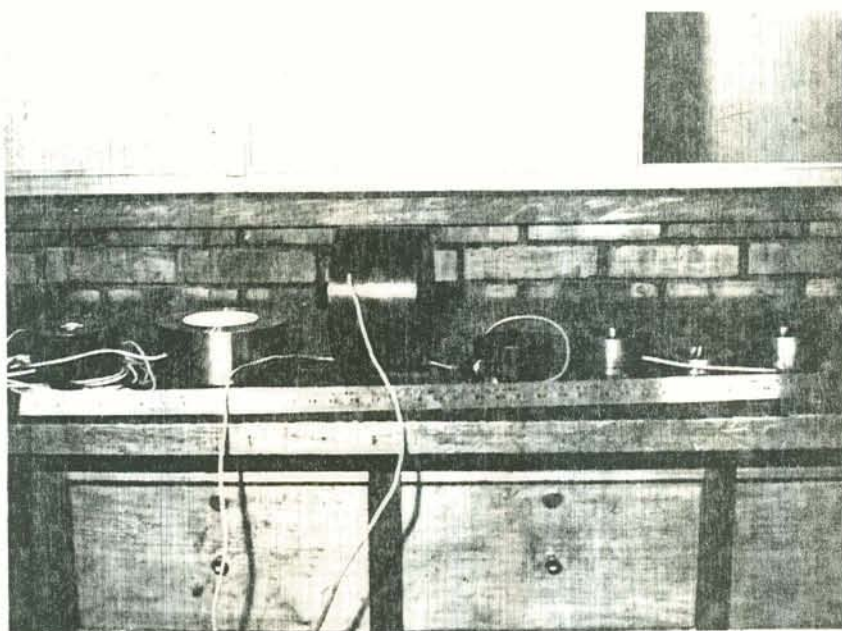


FIGURA 12.3

Mostra em conjunto, todas as células de carga
construídas, respectivamente as células VII ,
VI,V, IV,III,II,I.

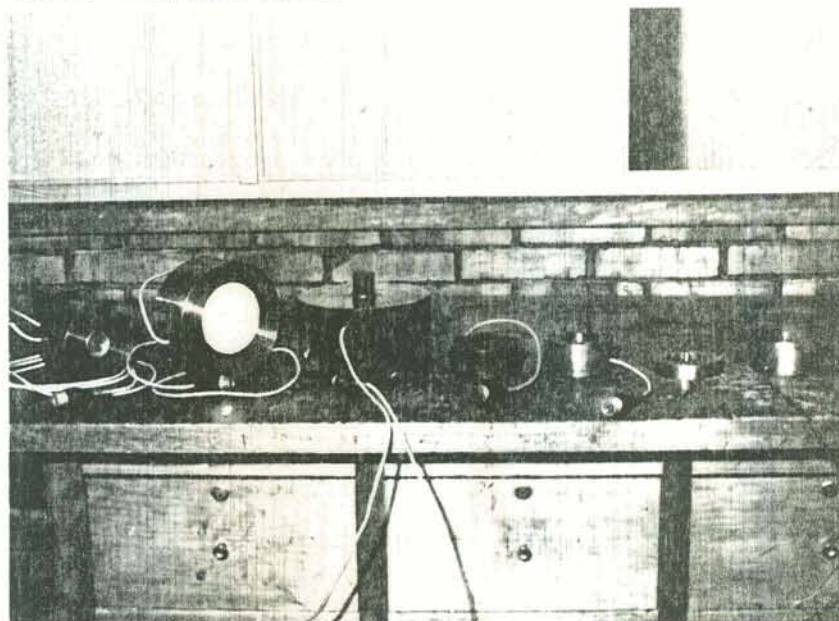


FIGURA 12.4

Mostra outra vista do conjunto das células de carga
construídas no presente trabalho.

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DAS SETE CÉLULAS DE CARGA CONSTRUÍDAS

Célula de Carga	Tipo	Capacidade	Coefficiente de Segurança	Desvio de Linearidade	Desvio de Repetitividade	Sensibilidade	Tratamento Térmico
I	Placa à meia altura. Pino deslizante	2,5 kN	2,5	1,0%	2%	0,9%	Nenhum
II	Placa à meia altura. Pino deslizante	2,5 kN	2,5	3,4%	3,4%	0,5%	Nenhum
III	Placa à meia altura. Pino engastado	2,5 kN	2,5	0,8%	0,8%	0,6%	Nenhum
IV	Placa na extremidade superior. Pino engastado	30 kN	2,5	0,8%	0,6%	6%	Têmpera Revenimento
V	Placa na extremidade superior. Pino engastado	200 kN	3,0	0,6%	0,6%	3,8%	Têmpera Revenimento
VI	ANEL	400 kN	2,0	Menos de 0,5%	Menos de 0,5%	4,8%	Nenhum
VII	ANEL	400 kN	2,0	Menos de 0,5%	Menos de 0,5%	5,3%	Nenhum

TABELA XI

13. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DE TRABALHO

13.1 - Conclusões

- 1) O pino deslizando na tampa das células de carga é causa de alinearidade na resposta, em consequência da ocorrência de atrito. Assim, a lubrificação, aspereza da superfície em contato do pino e tampa e área de contato superficial, são fatores limitantes na linearidade do transdutor;
- 2) É crítica a relação altura versus diâmetro do pino, pois, quanto maior a altura, mais sujeito a flexões está o conjunto, produzindo mais atrito;
- 3) As posições e orientações utilizadas na colagem dos "strain gauges" são críticas no que diz respeito a sensibilidade das células;
- 4) Conforme se verificou entre as células de placa projetadas, a área do elemento de apoio, o engastamento da placa sensora e a rigidez do anel, são de fundamental importância na sensibilidade e fidelidade de resposta do sistema. Portanto, é imprescindível a rigidez do conjunto e assim sendo, mesmo naquelas células de carga cuja placa sensora situa-se na extremidade superior do anel, é indispensável uma tampa inferior. Esta deve ser afixada, de tal modo a aumentar a estabilidade do sistema, tornando-o mais rígido;
- 5) As células de carga cuja placa sensora situa-se na extremidade superior, onde é engastado o pino roscado, oferecem a vantagem de apresentar as mesmas características de funcionamento, tanto à tração como à compressão, a par da maior facilidade de usinagem;

6) Para as células de carga de placa, o modelo matemático adotado, as equações propostas e aproximações efetuadas podem ser utilizadas para dimensionar transdutores com pino deslizante na tampa superior, que forneçam a linearidade em torno de 1%, e transdutores com pino engastado que forneçam a linearidade em torno de 0,8% (célula IV);

7) As células cuja placa sensora situa-se na extremidade superior do anel e dotadas de pino engastado, de acordo com o modelo matemático adotado, tem suas características melhoradas sensivelmente quando operam de 20% a 50% abaixo da capacidade para a qual foram projetadas (veja-se células IV e V);

8) As células de placa para alta capacidade (mais de 300 kN) apresentam os inconvenientes seguintes: dimensão excessiva, peso elevado, dificuldades de usinagem, e em geral necessidade de tratamento térmico para redução do volume (veja-se célula de carga V);

9) As células de carga tipo anel apoiado lateralmente desenvolvidas no presente trabalho e segundo o modelo matemático adotado apresentam uma linearidade e um desvio de repetitividade menores que 0,5%;

10) As células de carga tipo anel apoiado lateralmente apresentam as vantagens seguintes: são de fácil usinagem, possuem pequenas dimensões, não apresentam peças móveis, têm pequena área de apoio, são bastante sensíveis e a priori não necessitam tratamento térmico.

13.2 - Sugestões de Continuidade de Trabalho

- 1) Estudar a variação no comportamento da célula de carga de placa, em função do diâmetro do pino e da espessura da placa;
- 2) Analisar a variação das tensões radiais e tangenciais em células de pino e placa engastada, para pinos de diferentes diâmetros;
- 3) Projetar células de carga do tipo anel apoiado lateralmente, para baixas capacidades utilizando-se materiais ferrosos e não ferrosos;
- 4) Analisar o comportamento de células de carga do tipo anel apoiada lateralmente, para utilização em compressão e tração através de estabelecimento de orifícios diametralmente opostos;
- 5) Estudar detalhadamente a diferença entre as curvas de carregamento e descarregamento em células de carga tipo anel apoiado lateralmente;
- 6) Construir duas células tipo anel apoiado lateralmente, com as mesmas dimensões, mas respectivamente de materiais SAE D6 e SAE 4340 com a finalidade de comparar o comportamento entre ambas.

APÊNDICE A

A.1 - DIAGRAMA DO PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO. DA EXCITAÇÃO À RESPOSTA.

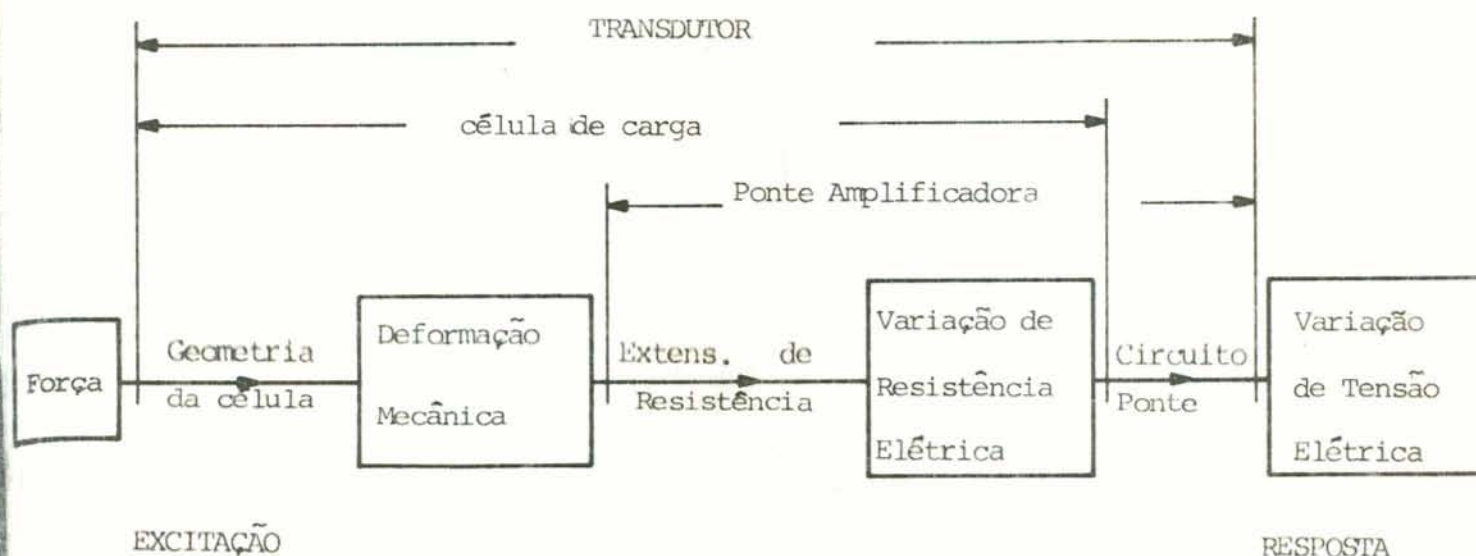


Fig. A-1

A excitação do sistema é efetuada através da aplicação da força que, distribuindo as tensões de acordo com a geometria de célula, produz uma deformação mecânica. Esta deformação é distribuída aos extensômetros elétricos, os quais variam sua resistência elétrica que é transmitida pelo circuito ponte, produzindo assim, uma variação de tensão elétrica como resposta.

A.2 - DIAGRAMA EM BLOCO DAS UNIDADES DE UM TRANSDUTOR DE FORÇA.

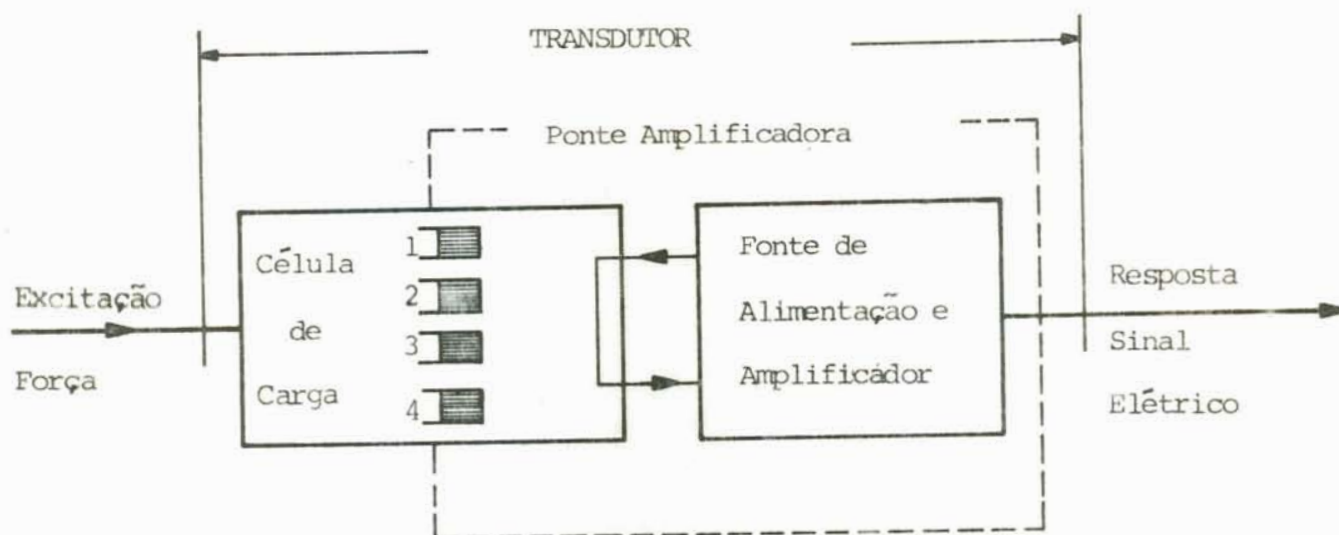


Fig. A-2

O transdutor compõe-se de uma célula de carga e uma ponte amplificadora de sinal. Os quatro extensômetros de resistência (strain gauges 1, 2, 3, 4), ligados em circuito ponte, são elementos de conexão entre a célula e o amplificador.

A P Ê N D I C E B

FLEXÃO DE PLACAS CIRCULARES SUBMETIDAS A CARGAS SIMÉTRICAS

Examinaremos o caso da flexão de placas sem considerar a tração. O mais cômodo é analisar este problema no ca -
so da flexão de uma placa.

A teoria da flexão das placas é uma parte bem desenvolvida da teoria da elasticidade.

Pela ação de forças exteriores que atuam perpendicularmente ao plano médio, a placa varia sua curvatura. Es -
ta variação de curvatura ocorre, em regra geral, em dois planos simultaneamente e, como resultado, se obtém a denominada superfície elástica de pequena curvatura, cuja forma se caracteri -
za pela lei de variação das flechas W da placa. Nos cálcu -
los das placas se considera que a flecha W é consideravelmen -
te menor que a espessura h da placa. Somente admitindo esta -
suposição se pode estudar a flexão da placa independentemen -
te da tração. As placas que cumprem esta condição se denomi -
nam, às vezes, de placas finas.

Ao calcular vigas, também se pode admitir suposi -
ção análoga. Por exemplo, no caso de uma viga engastada nos se -
us extremos, que trabalha à flexão, a linha elástica da vi -
ga resulta maior que o eixo da viga sem deformar. As deforma -
ções que, como consequência disso resultam, se ignoram em compa -
ração com as deformações devidas à curvatura da viga. Somen -
te quando as flechas da viga são pequenas em comparação com a

espessura da seção se pode prescindir do alongamento do eixo.

As placas cujas flechas são comparáveis com a espessura se calculam, tendo em conta o alongamento da superfície média.

A teoria da flexão de placas e cascas se baseia sobre certas suposições simplificativas. A primeira delas consiste em que considera invariável a normal. Esta suposição se conhece como hipótese de Kirchoff, e consiste em que os pontos situados antes da deformação sobre esta reta normal à superfície média, seguem formando, após a deformação, uma reta normal à superfície deformada. Esta suposição, como também a hipótese das seções planas da barra, indicam que se pode prescindir das deformações angulares das cascas, em comparação com os deslocamentos angulares. Isto é aceitável na medida em que a espessura da placa é pequena em comparação com as outras dimensões.

Consideraremos adiante, que as tensões normais nas seções paralelas ao plano médio são desprezíveis em comparação com as tensões originadas pela flexão, quer dizer que não existe pressão alguma entre os extremos da placa.

No presente caso, temos uma placa de espessura h , solicitada por forças situadas simetricamente com respeito ao eixo z da placa (fig. B.1). As tensões e deformações que aparecem na placa serão simétricas em relação a z .

A flecha da placa se designa por w e o ângulo de giro da normal por θ (fig. B.2). As magnitudes de w e θ , são funções do raio r somente e estão relacionadas entre si pela expressão $\theta = \frac{dw}{dr}$ (B.O) .

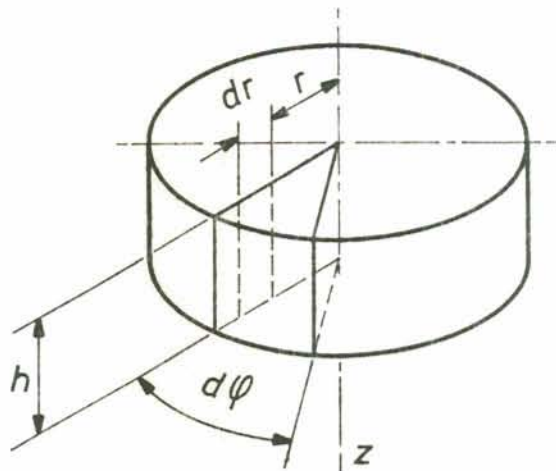


Fig. B-1 Mostra a placa de espessura h

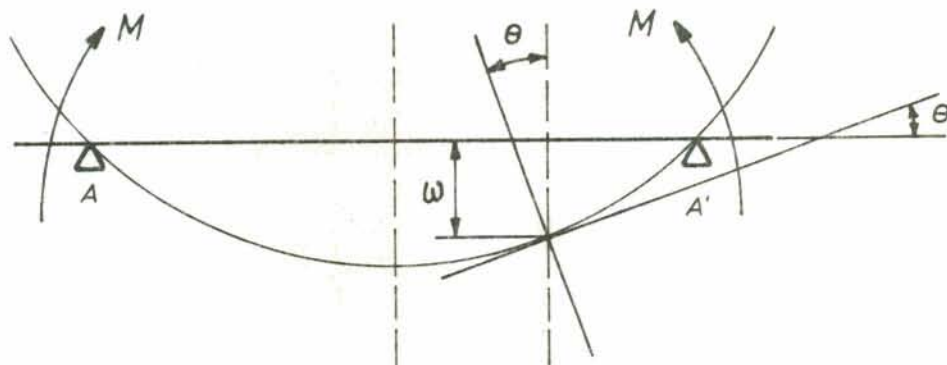


Fig. B-2 Mostra o momento atuante no engastamento da placa com o anel.

Na fig. B.3 representamos uma seção axial da placa. Os pontos situados sobre a normal A_1B_1 , após a flexão da placa, formam a normal $A'_1B'_1$ girada de um ângulo θ . A normal A_2B_2 girará de um ângulo $\theta + d\theta$.

O segmento CD situado à distância Z do plano médio e orientado radialmente deformará :

$$Z(\theta + d\theta) - Z\theta = Z.d\theta$$

$$\text{A deformação unitária será } \epsilon_r = Z \frac{d\theta}{dr} \quad (\text{B.1})$$

A deformação unitária no ponto C e na direção perpendicular ao plano do desenho se pode obter, comparando as magnitudes das circunferências correspondentes, antes e depois da deformação. Antes da deformação da placa, a magnitude da circunferência que passa pelo ponto C era $2\pi r$, portanto, após a deformação será $2\pi (r + Z\theta)$. Assim sendo, a deformação unitária circunferencial será $\epsilon_t = Z \frac{\theta}{r}$. (B.2)

Analisemos um prisma elementar, mediante duas seções axiais que formam um ângulo $d\theta$ e duas superfícies cilíndricas de raios r e $r+dr$ (fig. B.4). Como nas seções paralelas ao plano médio não existem tensões normais, as tensões e deformações estão unidas pela lei de Hooke na forma seguinte :

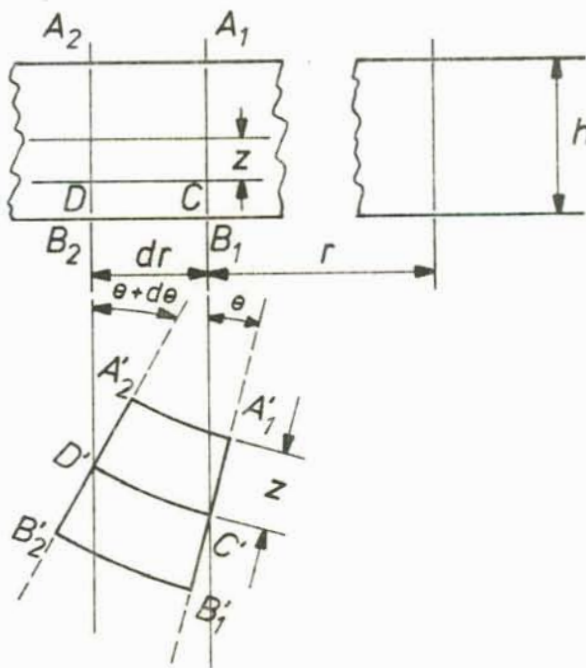


Fig. B-3 Representa uma seção axial da placa.

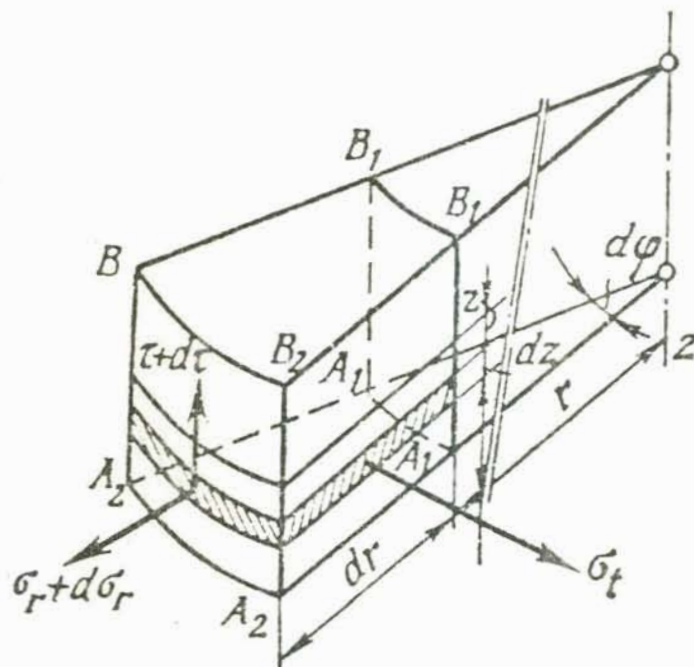


Fig. B-4 Mostra as tensões normais e tangenciais atuantes no prisma elementar.

$$\epsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu \sigma_t)$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \mu \sigma_r)$$

mos :
Escrevendo as tensões em função das deformações te

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_r + \mu \epsilon_t)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_t + \mu \epsilon_r)$$

(B.3)

ou, de acordo com as equações B.1 e B.2,

$$\sigma_r = \frac{E \cdot Z}{1 - \mu^2} \left(\frac{d\theta}{dr} + \mu \frac{\theta}{r} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{E \cdot Z}{1 - \mu^2} \left(\frac{\theta}{r} + \mu \frac{d\theta}{dr} \right)$$

(B.4)

Sobre as faces do prisma podem atuar não somente tensões normais, como também tensões tangenciais (fig. B.4).

Da condição de simetria se deduz facilmente que as tensões tangenciais podem aparecer somente nos planos perpendiculares ao raio r .

Vejamos agora as condições de equilíbrio do prisma separado. Verifiquemos primeiro as resultantes das for - ças que atuam sobre as faces do elemento. As tensões de ci - salhamento na face $A_1B_1A_1B_1$ (fig. B.4) originam uma força resultante cortante dirigida segundo o eixo z .

A intensidade desta força, referida à unida - de de comprimento do arco $d\phi$ se designa por Q , e é dada em N/mm.

A força cortante na face $A_1B_1A_1B_1$ será $Q \cdot r \cdot d\phi$ e a força cortante na face $A_2B_2A_2B_2$, será $(Q + dQ)(r+dr)d\phi$ (fig. B.5).

Como as tensões nas faces superiores e inferio - res são iguais, mas de sinais opostos (eq. B.4), serão nu - las as forças normais sobre as faces do elemento.

As tensões normais σ_r e σ_t que atuam so - bre as faces correspondentes se reduzem a momentos resultan - tes nos planos verticais)

A intensidade dos momentos sobre as faces $A_1B_1A_1B_1$ e $A_1B_1A_2B_2$, quer dizer, as magnitudes dos momentos referidos à unidade de comprimento da seção se designam por M_r e M_t , em N.mm/mm

Conhecendo as tensões σ_r e σ_t , determinamos os momentos resultantes sobre as faces como segue :

$$M_r \cdot r \cdot d\phi = r \cdot d\phi \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r \cdot Z \cdot dZ$$

$$M_t \cdot dr = dr \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_t \cdot Z \cdot dZ$$

De acordo com a expressão B.4, obtemos :

$$M_r = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{d\theta}{dr} + \mu \frac{\theta}{r} \right) \int_{-h/2}^{h/2} Z^2 \cdot dZ$$

$$M_t = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{\theta}{r} + \mu \frac{d\theta}{dZ} \right) \int_{-h/2}^{h/2} Z^2 \cdot dZ$$

Levando-se em conta que $\int_{-h/2}^{h/2} Z^2 \cdot dZ = \frac{h^3}{12}$

Se deduz:

$$\left. \begin{aligned} M_r &= D \left(\frac{d\theta}{dr} + \mu \frac{\theta}{r} \right) \\ M_t &= D \left(\frac{\theta}{r} + \mu \frac{d\theta}{dr} \right) \end{aligned} \right\} \quad (B.5)$$

sendo,

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\mu^2)} \quad (B.6)$$

onde D se denomina rigidez da placa à flexão.

Entre as forças aplicadas ao elemento (fig.B.5) se inclui também a força exterior $p \cdot r \cdot d\phi \cdot dr$, sendo p a pressão em N/mm^2 , que pode variar em função do raio r.

Projetando todas as forças que atuam no elemento (fig. B.5) sobre o eixo de simetria, obteremos

$$(Q+dQ)(r+dr)d\phi - Qrd\phi - p \cdot r \cdot d\phi \cdot dr = 0$$

donde se acha,

$$p \cdot r = \frac{d}{dr}(Q \cdot r) \quad (B.7)$$

Vejamos agora a soma dos momentos de todas as

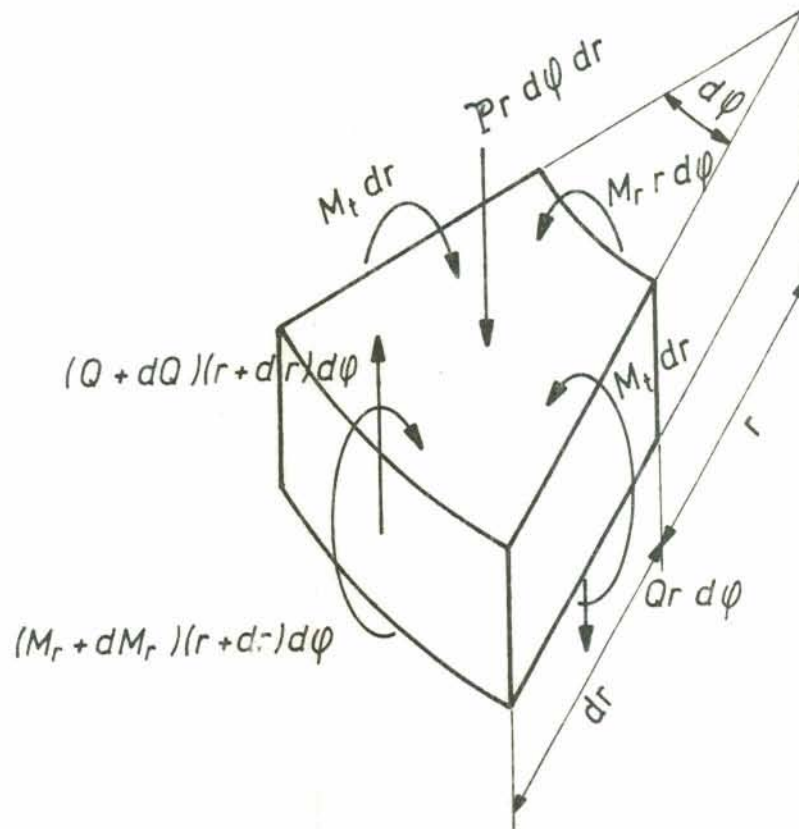


Fig. B- 5. Mostra as condições de equilíbrio de um prisma elementar.

forças em relação ao eixo y , tangente ao arco de círculo de raio r no plano médio :

$$(M_r + dM_r) \cdot (r + dr) d\phi - M_r \cdot r \cdot d\phi - p \cdot r \cdot dr \cdot d\phi \frac{d}{2} - M_t \cdot dr \cdot d\phi + \\ + M_t \cdot dr \cdot d\phi + (Q + dQ) \cdot (r + dr) \cdot d\phi \cdot dr = 0$$

ou, prescindindo das magnitudes das diferenciais de ordem superior e passando ao limite.

$$M_t - \frac{d}{dr}(M_r \cdot r) = Q \cdot r \quad (B.8)$$

As equações de equilíbrio restantes se satisfazem automaticamente devido às condições de simetria.

Introduzindo M_r e M_t das expressões (B.5) na expressão (B.8) e supondo que a rigidez D é constante, temos:

$$r \cdot \frac{d^2 \theta}{dr^2} + \frac{d\theta}{dr} - \frac{\theta}{r} = - \frac{Q \cdot r}{D}$$

e, derivando, se obtêm

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\theta \cdot r) \right] = - \frac{Q}{D} \quad (B.9)$$

Após uma dupla integração da expressão B.9, encontramos :

$$\theta = C_1 r + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{D \cdot r} \int \left[r \cdot \int Q \cdot dr \right] dr \quad (\text{B.10})$$

sendo C_1 e C_2 , as constantes arbitrárias de integração que se deve determinar das condições de contorno, em cada caso concreto.

A força cortante Q se pode obter da equação de equilíbrio (B.7), ou analisando as condições de equilíbrio da parte central da placa, obtida através da seção cilíndrica de raio r .

Uma vez obtida a função θ (B.10), achamos da expressão B.5, os momentos fletores M_r e M_t , e da expressão B.0 a flecha w . Conhecendo os momentos fletores é fácil obter as tensões. Comparando B.4 com B.5 se demonstra que:

$$\sigma_r = \frac{E \cdot Z}{1 - \mu^2} \cdot \frac{M_r}{D} \quad ; \quad \sigma_t = \frac{E \cdot Z}{1 - \mu^2} \cdot \frac{M_t}{D}$$

introduzindo aqui a expressão de D (B.6) obtemos

$$\sigma_r = \frac{12 \cdot M_r}{h^3} \cdot Z \quad , \quad \sigma_t = \frac{12 \cdot M_t}{h^3} \cdot Z$$

As máximas tensões surgem quando $Z = \pm \frac{h}{2}$,

logo,

$$\sigma_r^{\max} = + \frac{6 M_r}{h^2} \quad ; \quad \sigma_t^{\max} = + \frac{6 M_t}{h^2}$$

B.1 - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES MÁXIMAS NUMA PLACA ENGASTADA SOLICITADA POR UMA FORÇA PUNTUAL E APLICADA NO CENTRO

Teremos para o esforço cortante $Q = \frac{P}{2\pi r}$

Da expressão B.10, encontraremos

$$\theta = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} - \frac{P}{4\pi D} \cdot r \left(\ln r - \frac{1}{2} \right)$$

que pode ser escrita, mudando o valor de C_1 :

$$\theta = C'_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} - \frac{P}{4\pi D} \cdot r \cdot \ln \frac{r}{R}$$

Veja-se a fig. B6 ; no centro (quando $r=0$), o ângulo $\theta = 0$. Portanto, como $\lim_{r \rightarrow 0} r \ln \frac{r}{R} = 0$, a constante

$C_2 = 0$. A magnitude C'_1 se determina de maneira tal que a função θ seja igual a zero quando $r = R$. Disto se deduz que $C'_1 = 0$, e, portanto,

$$\theta = \frac{P}{4\pi D} \cdot r \cdot \ln \frac{R}{r}$$

Os momentos fletores são, de acordo com as expressões B.5 :

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \ln \frac{R}{r} - 1 \right], \quad \text{B.11}$$

$$M_t = \frac{P}{4\pi} \left[(1 + \mu) \ln \frac{R}{r} - \mu \right] \quad \text{B.12}$$

A fig. B.6 representa os diagramas construídos de acordo com estas equações. Como se vê (fig. B.6), no centro da placa os momentos fletores são infinitos, devido ao fato de que ali também é infinita a força cortante Q. No centro, como se diz, existe uma singularidade não eliminável. Na realidade, a força não se aplica num único ponto, mas sim numa superfície pequena, cuja magnitude fará com que as tensões sejam maiores ou menores (fig. B.7).

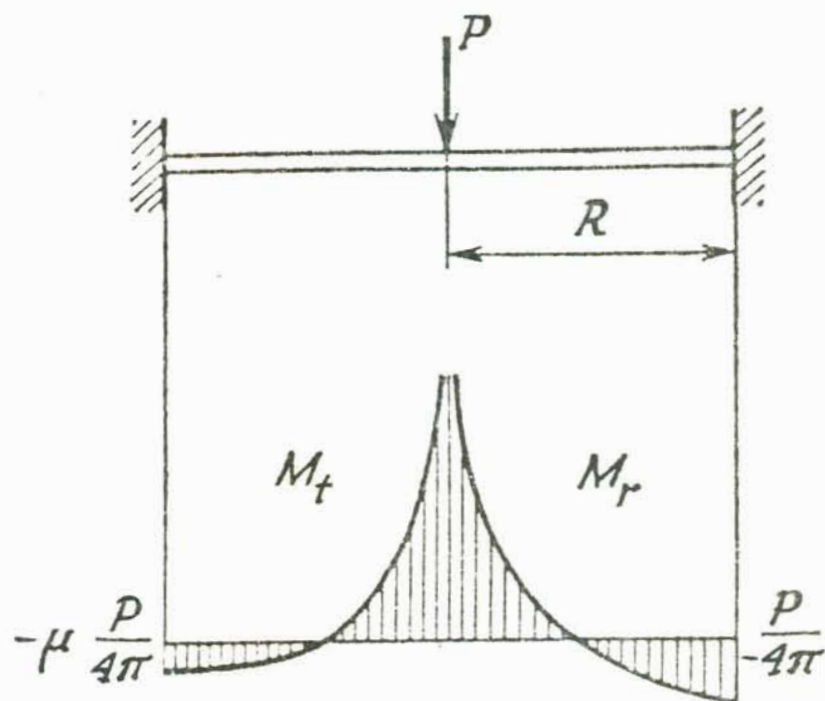


Fig. B-6 Distribuição dos momentos para uma carga pontual aplicada no centro da placa

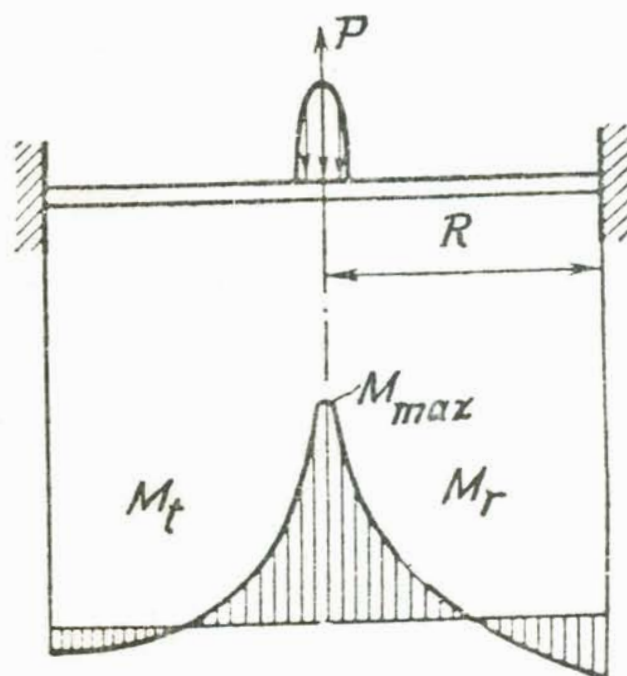


Fig. B-7 Distribuição dos momentos para uma carga distribuída no centro da placa.

B.2 - FORÇA P DISTRIBUÍDA AO LONGO DE UMA CIRCUNFERÊNCIA DE
RAIO a

Segundo Feodosiev⁽⁵⁾, a placa pode ser considerada como constituída de duas partes. Na primeira $Q = 0$ e de acordo com a expressão (B.0)

$$\theta_1 = C_1 r + \frac{C_2}{r}$$

Como no centro $\theta_1 = 0$, podemos considerar que $C_2 = 0$, obtendo $\theta_1 = C_1 r$ (B.11)

Na segunda parte, $Q = \frac{P}{2\pi r}$

Neste caso, de acordo com a fig. B.8 podemos usar a expressão

$$\theta_2 = C_1' r + \frac{C_2}{r} - \frac{P}{4\pi D} \cdot r \cdot \ln \frac{r}{a} \quad (B.12)$$

As constantes de integração C_1 e C_1' e C_2 se determinam agora, das condições de contato entre as duas partes. Quando $r=a$ obtemos $\theta_1 = \theta_2$ e $M_{r_1} = M_{r_2}$, quer dizer, os ângulos de giro e os momentos fletores na linha de contato das duas partes devem ser iguais.

A condição de igualdade dos momentos se escreve assim :

obtém

$$\left(\frac{d\theta_1}{dr} + \mu\theta_1 \right)_{r=a} = \left(\frac{d\theta_2}{dr} + \mu\theta_2 \right)_{r=a} \text{ e, como } \theta_1 = \theta_2, \text{ se}$$

$$\left(\frac{d\theta_1}{dr} \right)_{r=a} = \left(\frac{d\theta_2}{dr} \right)_{r=a}$$

A terceira condição será a seguinte : para $r=b$ o ângulo de giro $\theta_2 = 0$. Assim, se obtém três equações :

$$C_1 \cdot a = C_1' a + \frac{C_2}{a}, \quad C_1 = C_1' - \frac{C_2}{a^2} - \frac{P}{4\pi D},$$

$$C_1' b + \frac{C_2}{b} - \frac{P b}{4\pi D} \ln \frac{b}{a} = 0$$

Delas se obtém :

$$C_1 = \frac{P}{4\pi D} \left(\ln \frac{b}{a} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} - \frac{1}{2} \right)$$

$$C_1' = \frac{P}{4\pi D} \left(\ln \frac{b}{a} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} \right)$$

$$C_2 = - \frac{P a^2}{8\pi D}$$

Na primeira parte, parte central da placa, os momentos fletores são, de acordo com as expressões B.5 e B.11, os seguintes :

$$M_r = M_t = \frac{P(1+\mu)}{4\pi} \left(\ln \frac{b}{a} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} - \frac{1}{2} \right) = \text{const.}$$

Na segunda parte, tendo em conta a expressão B.12 de θ_2 , obtemos

$$M_r = \frac{P}{4\pi} \left[(1+\mu) \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} \right) + \frac{a^2}{2r^2} (1-\mu) - 1 \right]$$

$$M_t = \frac{P}{4\pi} \left[(1+\mu) \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} \right) + \frac{a^2}{2r^2} (1-\mu) - \mu \right]$$

Na fig. B.8 mostram-se os diagramas dos momentos flectores sendo a pequeno, então o momento fletor máximo ocorrerá na parte central. Quando o raio a é grande, o momento máximo ocorre na borda. Conhecidos os momentos é fácil calcular as tensões.

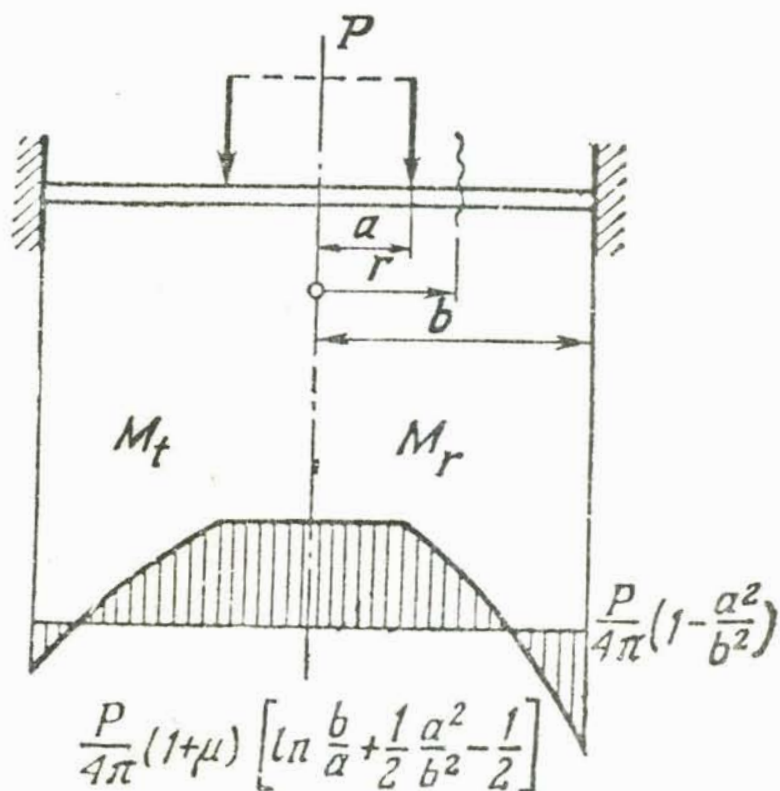


Fig. B-8 Distribuição dos momentos para uma carga circunferencialmente distribuída.

A P Ê N D I C E C

FLEXÃO DE BARRAS DE GRANDE CURVATURA

A presente análise baseia-se em "Feodosiev", onde (Fig. C-1):

y = ordenada a partir da linha neutra;

ρ_0 = raio de curvatura do eixo (lugar geométrico dos centros de gravidade das seções)

$d\phi$ = deflexão angular

r_0 = raio de curvatura da linha neutra

dF = área elementar

r = raio de curvatura da linha neutra depois da deformação

r_e = raio externo da barra

r_i = raio interno da barra

Suponhamos que, durante o processo de flexão da barra, a magnitude de y não varia (fig. C.2). A rigor isso não ocorre, pois analisando as condições de equilíbrio do elemento AB (fig. C.3), é evidente que entre as fibras contíguas deverá existir uma ação mútua em forma de forças dirigidas radialmente e como resultado, variará a forma da seção transversal da barra e a magnitude de y . No caso de seções maciças estas variações são insignificantes.

A razão $\frac{\Delta d\phi}{d\phi}$ é proporcional à variação de curvatura da barra e de acordo com a figura C.2, podemos escrever :

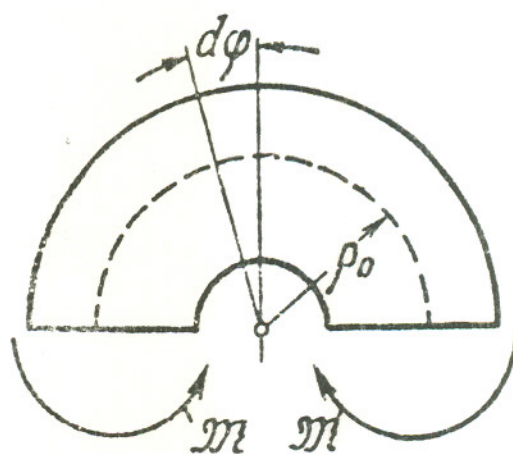


Fig. C-1. Flexão de uma barra de grande curvatura.

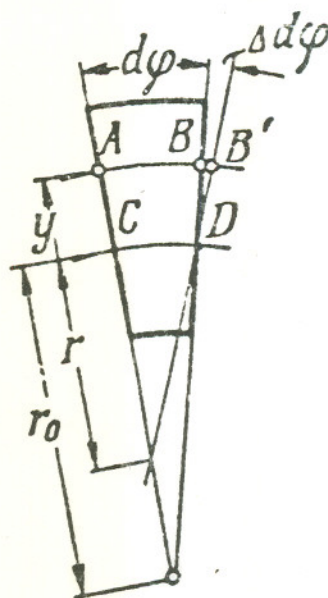


Fig. C-2. Deformações ocorrentes em uma barra.

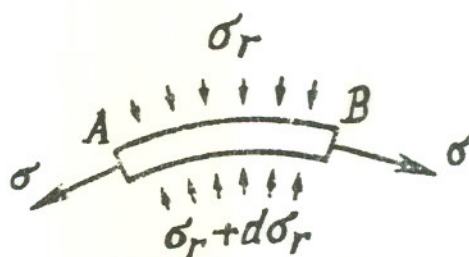


Fig. C-3. Condições de equilíbrio do elementar AB.

$$\varepsilon = \text{deformação de AB} = \frac{BB'}{AB} = y \frac{\Delta d\phi}{r_0 + y d\phi}$$

por outro lado,

$$CD = (d\phi + \Delta d\phi)r, \text{ ou } CD = r_0 \cdot d\phi$$

Igualando estas duas expressões,

$$\frac{\Delta d\phi}{d\phi} = r_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right)$$

Então podemos afirmar que a deformação da barra AB é:

$$\varepsilon = \frac{y}{r_0 + y} \cdot r_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right), \text{ mas } \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

logo,

$$\sigma = E \cdot \frac{y}{r_0 + y} \cdot r_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (\text{C.1})$$

No caso de barra/pequena curvatura, y é pequeno em relação a r_0 e então temos

$$\sigma = Ey \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right)$$

Suponhamos para maior simplicidade que a seção da barra analisada é simétrica em relação ao plano de

curvatura. Então o eixo y da seção será o eixo de simetria (fig. C.4) e o momento das forças elementares σdF em relação a este eixo será igual a zero. Escrevamos, agora, a expressão da força normal N e do momento fletor M :

$$N = \int_F \sigma dF \quad , \quad M = \int_F \sigma y \cdot dF$$

Introduzindo σ conforme a expressão C.1, temos :

$$N = E \cdot r_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \int_F \frac{y dF}{r_0 + y}$$

$$M = E \cdot r_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \int_F \frac{y^2 dF}{r_0 + y}$$

Como a força axial é igual a zero,

$$\int_F \frac{y dF}{r_0 + y} = 0 \quad (C.2)$$

e o momento fletor será, decompondo-o na forma:

$$M = E \cdot r_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \left[\int_F y dF - r_0 \int_F \frac{y dF}{r_0 + y} \right]$$

A primeira integral representa o momento estático da seção em relação à linha neutra que é igual ao produ -

to $F \cdot e$, onde e é a distância da linha neutra ao centro de gravidade $e = r_0 - r_c$. A segunda integral é segundo a expressão C.2, igual a zero. Então o momento fletor M será :

$$M = E \cdot r_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) F \cdot e$$

Utilizando esta expressão na expressão C.1, teremos para as tensões normais :

$$\sigma = \frac{M}{F \cdot e} \left(r_0 \frac{y}{r_0 + y} \right) \quad (C.3)$$

Como se pode observar, as tensões variam com a altura da seção de forma não linear.

Para empregar a expressão C.3 é necessário determinar previamente o valor de r_0 . Para isto, tomemos a integral C.2 e introduzamos a nova variável $u = r_0 + y$, conforme fig. C.5 :

$$\int_F \left(\frac{u - r_0}{u} \right) dF = 0$$

donde se obtém

$$r_0 = \frac{F}{\int_F \frac{dF}{u}} \quad (C.4)$$

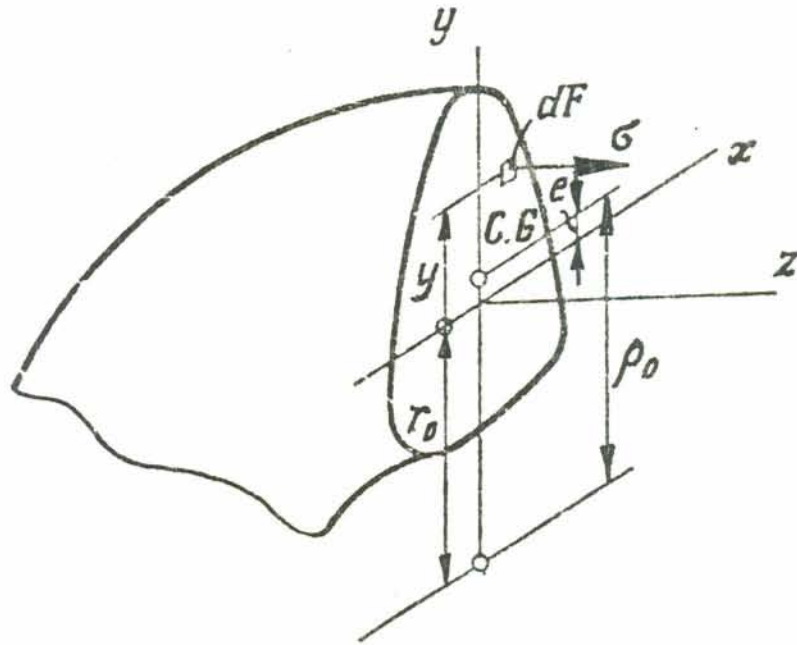


Fig. C-4. Seção transversal de uma barra qualquer em que y' y é eixo de simetria.

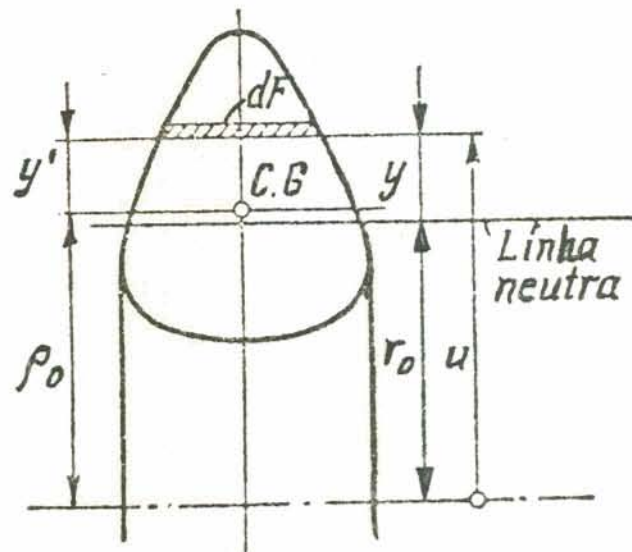


Fig. C- 5. Posição da linha neutra.

A integral que figura no denominador é uma característica geométrica da seção, como por exemplo o momento de inércia. No caso particular de uma seção retangular (C.6),

$$\int \frac{dF}{u} = L \int_{\rho_0 - h'/2}^{\rho_0 + h'/2} \frac{du}{u} = L \cdot \ln \frac{\rho_0 + h'/2}{\rho_0 - h'/2}$$

que, de acordo com a expressão C.4

$$r_0 = \frac{h'}{\ln \frac{\rho_0 + h'/2}{\rho_0 - h'/2}}$$

Sendo o deslocamento da linha neutra com respeito ao centro de gravidade:

$$e = \rho_0 - \frac{h'}{\ln \frac{\rho_0 + h'/2}{\rho_0 - h'/2}} \quad (C.5)$$

Esta é a expressão utilizada no modelo matemático para executar as células de carga VI e VII. A figura C.7 mostra o diagrama das deformações para o caso de um anel tracionado.

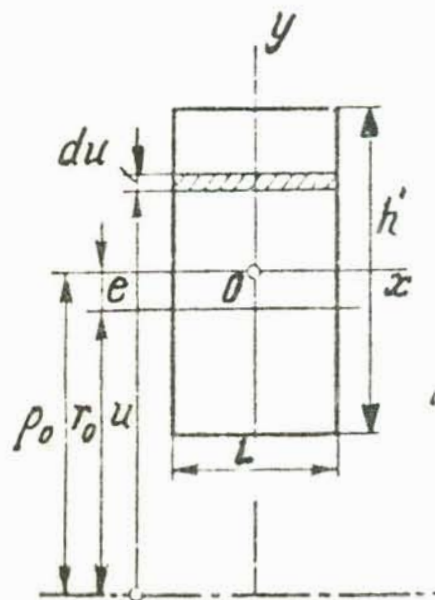


Fig. C- 6. Seção transversal de um anel.

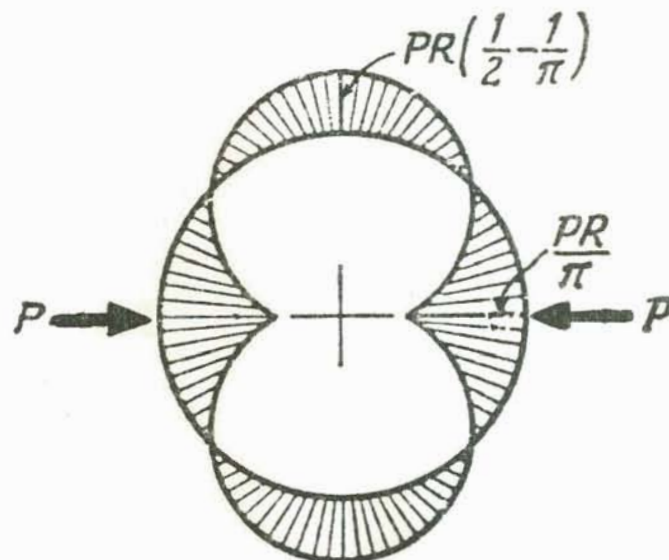


Fig. C- 7. Diagrama das deformações para o caso de um anel.

A P Ê N D I C E D
DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

CELULA II (PEQUENA) - CONDIÇÃO 1'

PINO PEQUENO DESLIZANTE NA TAMPA-CARREGAMENTO-GANHO = 10.00

CÉLULA DA MÁQ. COM PRÉ-DEF $\pm 1\% \rightarrow \pm 427\text{mV}$

CÉLULA TESTE PRÉ-DEF $\pm 1\% \rightarrow \pm 269\text{mV}$

Célula Padrão mV	Célula Teste mV	Diferença mV
4,675 $\pm 0,005$	8,685	3,892
8,175	16,035	7,186
12,575	25,800	11,562
16,560	35,555	15,934
20,10	44,70	20,032
24,50	55,05	24,671
28,55	65,75	29,466
32,80	75,15	33,679
36,00	83,70	37,510
		A=4,19%
4,985 $\pm 0,005$	8,075 $\pm 0,005$	3,638
8,080	15,995	7,206
12,205	25,20 $\pm 0,05$	11,354
16,080	34,45	15,521
20,75 $\pm 0,05$	46,20	20,816
24,15	53,85	24,262
28,85	64,65	29,128
32,55	74,15	33,409
36,05	82,70	37,261
		A=3,35%
4,305 $\pm 0,005$	8,315 $\pm 0,005$	3,714
8,860	17,995	8,039
12,640	26,80	11,973
16,760	36,25	16,135
20,00 $\pm 0,05$	44,60	19,926
24,45	54,80	24,483
28,60	65,55	29,286
32,20	74,30	33,195
36,35	83,60	37,350
		A=2,75%

CÉLULA II (PEQUENA) - CONDIÇÃO 1'

PINO PEQUENO DESLIZANTE NA TAMPA- DESCARREGAMENTO-GANHO 1000

mV	mV	mV
4,295 $\pm 0,005$	8,695 $\pm 0,005$	3,849
8,660	17,935	7,939
12,230	26,30	11,642
16,740	37,40	16,556
20,55 $\pm 0,05$	46,60	20,629
24,00	54,90	24,303
28,35	65,10	28,819
32,65	76,20	33,733
		A=3,3%
4,670 $\pm 0,005$	9,190 $\pm 0,005$	4,076
8,08	16,605	7,366
12,275	26,15	11,600
16,435	36,45	16,169
20,90 $\pm 0,05$	47,30	20,182
24,60	56,45	25,041
28,25	65,40	29,012
32,00	74,30	32,960
		A=3,0%
4,895 $\pm 0,005$	9,555 $\pm 0,005$	4,240
8,670	18,020	7,996
12,920	27,20 $\pm 0,05$	12,069
16,460	36,65	16,263
20,75 $\pm 0,05$	46,40	20,589
24,05	55,20	24,494
28,45	66,10	29,331
32,45	75,85	33,658
		A=3,69%

CÉLULA II (PEQUENA) - CONDIÇÃO 2'

PINO PEQUENO PRESO NA MAQ. RPU6 - CARREGAMENTO - GANHO - 1000

mV	mV	mV
4,655 $\pm 0,005$	6,075 $\pm 0,005$	4,278
8,975	12,195	8,593
12,175	16,840	11,866
16,390	23,00 $\pm 0,05$	16,206
20,90 $\pm 0,05$	29,50	20,787
24,75	35,25	24,838
28,70	41,0	28,890
32,45	46,70	32,907
36,30	52,40	36,923

A=1,71%

4,455 $\pm 0,0005$	5,875 $\pm 0,005$	4,144
8,935	12,125	8,554
12,085	16,625	11,728
16,725	23,35 $\pm 0,05$	16,473
20,75 $\pm 0,05$	29,25	20,635
24,15	34,20	24,127
28,90	41,30	29,136
32,85	47,20	33,299
36,50	52,80	37,249

A=2,05%

4,380 $\pm 0,005$	5,575 $\pm 0,005$	3,955
8,675	11,585	8,219
12,173	16,620	11,792
16,885	23,40 $\pm 0,05$	16,602
20,40 $\pm 0,05$	28,60	20,292
24,30	34,30	24,336
28,25	40,15	28,487
32,10	45,95	32,602
36,80	53,10	37,675

A=2,37%

CÉLULA II (PEQUENA) - CONDIÇÃO 2'

PINO PEQUENO FIXO A MÁQUINA-DESCARREGAMENTO-GANHO 10.00

mV	mV	mV
4,485 $\pm 0,005$	5,945 $\pm 0,005$	4,168
8,460	11,585	8,123
12,665	17,755	12,450
16,930	24,00 $\pm 0,05$	16,829
20,10 $\pm 0,05$	28,60	20,054
24,85	35,70	25,053
28,30	40,90	28,679
32,05	46,35	32,501
		A=1,40%

4,185 $\pm 0,005$	5,525 $\pm 0,005$	3,864
8,825	12,130	8,495
12,635	17,745	12,428
16,435	23,30 $\pm 0,05$	16,318
20,80 $\pm 0,05$	29,75	20,836
24,55	35,30	24,723
28,30	40,85	28,610
32,75	47,40	33,197
		A=1,36%

4,655 $\pm 0,005$	5,975 $\pm 0,005$	4,127
8,965	12,120	8,539
12,365	17,140	12,097
16,575	23,30 $\pm 0,05$	16,444
20,50 $\pm 0,05$	29,10	20,538
24,10	34,35	24,243
28,55	41,10	29,007
32,0	46,20	32,607
		A=1,89%

CÉLULA II (PEQUENA) - CONDIÇÃO 3'

PINO GRANDE PRESO NA MÁQUINA RPU6 - CARREGAMENTO - GANHO -1000

CARREGAMENTO

mV	mV	mV
4,495 $\pm 0,005$	10,985 $\pm 0,005$	3,766
8,195	21,20 $\pm 0,05$	7,269
12,765	35,85	12,293
16,635	47,90	16,425
20,85 $\pm 0,05$	61,00	20,918
24,20	71,55	24,535
28,25	83,10	28,496
32,55	97,05	33,280
36,70	109,80	37,652
		A=2,59%

4,405 $\pm 0,005$	10,835 $\pm 0,005$	3,700
8,205	21,30 $\pm 0,05$	7,273
12,395	34,35	11,730
16,165	46,70	15,947
20,70 $\pm 0,05$	60,80	20,762
24,30	72,00	24,587
28,00	83,60	28,548
32,00	95,80	32,714
36,75	110,30	37,666
		A=2,53%

4,235 $\pm 0,005$	10,415 $\pm 0,005$	3,538
8,565	22,45 $\pm 0,05$	7,627
12,865	36,20	12,299
16,805	48,80	16,580
20,90 $\pm 0,05$	61,70	20,963
24,10	71,60	24,326
28,90	86,45	29,372
32,75	28,60	33,500
36,65	110,55	37,560
		A=2,55%

CÉLULA II (PEQUENA) - CONDIÇÃO 3'

PINO GRANDE ENGASTADO NA MÁQ. RPU6 - DESCARREGAMENTO - GANHO - 1000

4,795 $\pm 0,005$	12,315 $\pm 0,005$	4,203
8,455	22,40 $\pm 0,05$	7,645
12,135	34,10	11,658
16,615	48,60	16,587
20,80 $\pm 0,05$	61,50	20,990
24,75	73,75	25,171
28,15	84,20	28,738
32,40	97,05	33,124

A=3,50%

4,425 $\pm 0,005$	11,240 $\pm 0,005$	3,834
8,405	22,40 $\pm 0,05$	7,640
12,385	34,90	11,904
16,915	49,65	16,936
20,40 $\pm 0,05$	60,50	20,637
24,15	72,05	24,577
28,70	86,00	29,335
32,10	96,55	32,934

A=2,59%

4,290 $\pm 0,005$	11,085 $\pm 0,005$	3,746
8,850	23,95 $\pm 0,05$	8,095
12,880	36,80	12,439
16,460	48,50	16,393
20,90	62,45	24,109
24,25	72,90	24,641
28,20	85,00	28,731
32,25	97,40	32,922

A=2,34%

CÉLULA I - CONDIÇÃO 1

PINO DESLIZANTE NA TAMPA (PEQUENO)-CARREGAMENTO-GANHO 10.00

CÉLULA DA MÁQ. PRÉ-DEF $\pm 1\%$ \rightarrow 427mVCÉLULA TESTE PRÉ-DEF $\pm 1\%$ \rightarrow ± 270 mV

mV	mV	mV
4,185 $\pm 0,005$	29,45 $\pm 0,05$	4,052
6,475	61,45	8,393
12,985	94,10	12,948
16,545	122,45	16,849
20,65 $\pm 0,05$	153,10	21,066
24,85	181,05	24,912
28,75	207,5 $\pm 0,5$	28,552
32,55	235,0	32,336
36,75	265,0	36,464

A=1,3%

4,895 $\pm 0,005$	34,60 $\pm 0,05$	4,755
8,295	61,05 $\pm 0,05$	8,390
12,765	92,10	12,657
16,215	119,40	16,409
20,70 $\pm 0,05$	150,35	20,663
24,80	180,20	24,765
28,75	209,0 $\pm 0,5$	28,723
32,30	236,0	32,434
36,50	265,0	36,420

A=0,53%

4,795 $\pm 0,005$	34,05 $\pm 0,05$	4,669
8,775	64,75	8,878
12,375	89,70	12,300
16,195	120,05	16,462
20,70 $\pm 0,05$	151,70	20,802
24,10	175,05	24,004
28,45	210,00	28,796
32,25	234,00	32,087
36,70	275,00	36,338

A=0,98%

CÉLULA I - CONDIÇÃO 1

PINO PEQUENO DESLIZANTE NA TAMPA-DESCARREGAMENTO-GANHO 10.00

mV	mV	mV
4,725 $\pm 0,005$	34,75 $\pm 0,05$	4,692
8,305	61,65	8,324
12,905	95,90	12,948
16,845	125,00	16,877
20,40 $\pm 0,05$	152,15 $\pm 0,5$	20,543
24,25	180,0	24,303
29,75	211,0	28,489
32,00	237,0	32,000
		A=0,81%
4,425 $\pm 0,005$	32,50 $\pm 0,05$	4,386
8,425	62,45	8,429
12,015	89,20	12,039
16,485	122,30	16,507
20,60 $\pm 0,05$	153,60	20,732
24,35	178,60	24,106
28,00	208,0 $\pm 0,5$	28,074
32,10	238,0	32,123
		A=0,76%
4,115 $\pm 0,005$	30,65 $\pm 0,05$	4,141
8,375	62,40	8,431
12,195	90,70	12,255
16,945	126,05	17,032
20,70 $\pm 0,05$	154,60	20,890
24,60	182,0 $\pm 0,5$	24,592
28,80	210,0	28,376
32,15	238,0	32,159
		A=1,31%

CÉLULA I - CONDIÇÃO 2

PINO (PEQUENO) PRESO NA MÁQUINA RPU 6-CARREGAMENTO-GANHO 10.00

mV	mV	mV
4,085 $\pm 0,005$	27,05 $\pm 0,05$	3,819
8,425	57,75	8,154
12,395	86,40	12,199
16,635	117,60	16,605
20,30 $\pm 0,05$	145,15	20,495
24,00	170,95	24,138
28,35	202,0 $\pm 0,5$	28,522
32,05	228,0	32,193
36,60	260,0	36,712
		A=0,74%

4,195 $\pm 0,005$	27,70 $\pm 0,05$	3,905
8,695	60,40	8,515
12,625	89,00	12,547
16,425	116,30	16,396
20,75 $\pm 0,05$	147,95	20,858
24,05	175,60	24,757
28,55	203,0 $\pm 0,5$	28,620
32,80	234,0	32,990
36,70	261,0	36,797
		A=0,79%

4,275 $\pm 0,005$	28,00 $\pm 0,05$	3,963
8,725	60,00	8,492
12,665	87,80	12,427
16,545	116,40	16,476
20,35 $\pm 0,05$	144,30	20,425
24,40	173,30	24,530
28,10	200,0 $\pm 0,5$	28,309
32,95	234,0	33,22
36,40	259,0	36,661
		A=0,85%

CÉLULA I - CONDIÇÃO 2

PINO (PEQUENO) PRESO NA MÁQUINA RPU 6-DESCARREGAMENTO-GANHO 10.00

mV		mV	mV
4,930 $\pm 0,005$		33,90 $\pm 0,05$	4,763
8,515		59,90	8,416
12,235		86,70	12,182
16,735		118,80	16,692
20,30 $\pm 0,05$		145,15	20,395
24,30		173,60	24,312
28,35		202,0 $\pm 0,5$	28,383
32,60		233,0	32,739
			A=0,51%
4,595 $\pm 0,005$		31,15 $\pm 0,05$	4,385
8,745		61,10	8,602
12,555		88,60	12,473
16,935		120,00	16,894
20,25 $\pm 0,05$		144,50	20,343
24,90		177,90	25,046
28,55		204,0 $\pm 0,5$	28,720
32,60		232,0	32,662
			A=0,64%
4,455 $\pm 0,005$		29,70 $\pm 0,05$	4,194
8,335		57,85	8,169
12,745		89,60	12,653
16,675		117,75	16,629
20,70 $\pm 0,5$		147,25	20,795
24,35		173,90	24,530
28,25		201,0	28,386
32,75		233,0 $\pm 0,5$	32,905
			A=0,79%

CÉLULA I - CONDIÇÃO 3

PINO GRANDE PRESO NA MÁQUINA RPU6-CARREGAMENTO-GANHO 10,00

mV	mV	mV
4,435 $\pm 0,005$	29,75 $\pm 0,05$	4,213
8,175	56,25	7,966
12,175	85,50	12,108
16,975	119,80	16,966
20,55 $\pm 0,05$	146,40	20,733
24,40	172,90	24,486
28,45	202,0 $\pm 0,5$	28,607
32,30	228,0	32,289
36,45	258,0	36,538
		A=0,57%
4,395 $\pm 0,005$	19,90 $\pm 0,05$	4,227
8,465	58,75	8,305
12,495	87,95	12,434
16,335	115,70	16,357
20,20 $\pm 0,05$	143,80	20,330
24,70	175,20	24,769
28,45	202,0 $\pm 0,5$	28,558
32,75	232,0	32,799
36,75	260,0	36,758
		A=0,45%
4,835 $\pm 0,005$	35,10 $\pm 0,05$	4,874
8,245	59,50	8,286
12,595	90,80	12,645
16,555	119,70	16,670
20,90 $\pm 0,05$	150,00	20,890
24,60	176,70	24,609
28,85	207,0 $\pm 0,5$	28,829
32,85	235,0	32,729
36,75	263,0	36,628
		A=0,32%

CÉLULA I - CONDIÇÃO 3

PINO GRANDE ENGASTADO NA MÁQUINA RPU6- DESCARREGAMENTO-GANHO 1000

mV	mV	mV
4,775 $\pm 0,005$	33,30 $\pm 0,05$	4,682
8,595	60,80	8,549
12,735	90,35	12,704
16,265	115,45	16,234
20,90 $\pm 0,05$	149,25	20,986
24,40	174,20	24,495
28,35	202,0 $\pm 0,5$	28,404
32,80	233,0	32,763
		A=0,28%
4,915 $\pm 0,005$	34,40 $\pm 0,05$	4,832
8,495	60,25	8,464
12,745	90,45	12,707
16,240	115,85	16,275
20,85 $\pm 0,05$	148,90	20,918
24,75	176,70	24,824
28,85	205,0 $\pm 0,5$	28,800
32,15	229,0	32,171
		A=0,25%
4,495 $\pm 0,005$	34,25 $\pm 0,05$	4,709
8,645	64,30	8,840
12,885	94,45	12,985
16,545	121,20	16,663
20,20 $\pm 0,05$	147,10	20,224
24,65	178,65	24,576
28,95	209,0 $\pm 0,5$	28,735
32,95	237,0	32,584
		A=1,10

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BORCHARDT, I.G. e ZARO, M.A. Extensômetros de resistência elétrica. UFRGS, 1981.
- 2 SCHAEFFER, L. e BORCHARDT, I.G. e GERBASE, J.F. "Projeto e construção de uma célula de carga para medição de força de trefilação". Revista Brasileira de Tecnologia, Vol. 7, 1976.
- 3 MICRO - Measurements, Technote, TN-127-2, TN-129-2, TN-130-3, TN-131-2, TN-135, TN-137, TN-138-2, TN-139, TN-140, TN-505, TT-127-4, TT-128-2.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Performance Characteristics of Bonded Resistance Strain Gages, A.S.T.M., E 251.
- 5 FEODOSIEV, V. Strength of Materials. Mir Publishers, 1973.
- 6 TIMOSCHENKO, S.P. Theory of elasticity. Mc Graw Hill, Vol. 2, 1970.
- 7 BONILHA, N. Reservatório Cilíndricos. UFRGS, 1979.
- 8 STEIN, P.K. Designing Strain Gauges Circuits for Sensitivity. Product Engineering, 1965. Vol. 27, nº 7.
- 9 PRAGER, W. An Introduction to Plasticity, Addison. Wesley 1959.
- 10 EPSILONICS, The Measurements Group Journal for Stress Analysis. October, 1981.
- 11 STEHLIN, P., Strain Distribution in and Around Strain Gauges. Journal of Strain Analysis 1972. Vol. 7, nº 3.
- 12 BECKWITH, T.G. & BUCK N.L. Mechanical measurements, Addison. Wesley, 1961.
- 13 GERBASE, J.F. Método de Medição de Força de Trefilação de Arames. Dissertação de mestrado - UFRGS, PPGEMM, 1976.
- 14 DOEBELIN, E.O. Measurements Systems. McGraw Hill, 1975.
- 15 DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy. McGraw Hill, 1961.
- 16 ZARO, M.A. Dissertação de Mestrado. UFRGS, PPGEMM, 1977.
- 17 MONDOLFO, L.F. e ZMESKAL, O. Engineering Metallurgy. McGraw-Hill, 1955.

- 18 RONE, G.W. "Principles of Industrial Metalworking Processes". Edward Arnold, 1977.
- 19 PARKINS, R.N. "Mechanical Treatment of Metals". George and Unwin Ltd., 1968.
- 20 BORCHARDT, I.G. e ZARO, M.A. Instrumentação. 1982.
- 21 SHELTON, A. An Experimental Investigation of the Cross-Sensitivity of Resistance Strain Gauges. Journal of Strain Analysis, Vol.3 nº 2, 1968. p.115-21.
- 22 NEVILL, G.E. e MYERS, C.D. Strain Rate Effect During Reverse Loading. J. Mech PHYS. Solids. 1968, Vol.16. p.187-94.
- 23 JACKSON, R.S. A Hand-Held Dynamic Strain Gauge. Journal of Scientific Instruments 1968. p.937-39.
- 24 KREMPL, E. Evaluation of High-Elongation Foil Strain gages for Measuring Cyclic Plastic Strains. Experimental Mechanics, 1968. p.19N-26N.
- 25 SWAINGER, K.H., UTWIN, C.R., A.C.G.I. e A.M.I.E.F. Minimising Zero-Drift in Electrical Strain Gauge Bridges. The Royal Aeronautical Society. 1974. p.867-73.
- 26 WHEATSTONE, C. An Account of Several New Instruments and Processes for Determining the Constants of a Voltaic Circuit. Phil. Trans. Roy.Soc., London, 1843. P.303 - 327.
- 27 MEITZLER, Allen H. Effect of Strain Rate in the Behavior of Iso-Elastic Wire Strain Gauges. The Review of Scientific Instruments, 1955. p.55.
- 28 STEIN, Peter K. Designing Strain Gage Circuits for Sensitivity and Linearity. Product Engineering, 1956. p. 144-49.
- 29 LUXMOORE, A.R. e EDER, W.E. Modifying a Profile Projector for Strain Measurements Using the Moire Technique. Journal Science Instruments, 1967. Vol.44 p.908-10.
- 30 SMITH, H.W. e CHAPEL, R.E. Poisson's Ratio Determined with Strain Rosettes. Experimental Mechanics, 1969. p.140-41.
- 31 STEINBERG, D.J. e BANNER, D.L. Accounting for Resistive Hysteresis in Calibrating Manganin Stress Gauges Undergoing Dynamic Loading. Journal Applieds Physics, 1979. p.235-37.
- 32 GOWDA, C.V.B. e TOPPER, T.H. Performance of Miniature Resistance Strain Gages in Low-Cycle Fatigue. Experimental Mechanics, 1970. p.27N-38N.

- 33 NASH, W.A. Schaum's Outline of Theory and problems of Strength of materials, McGraw-Hill, 1970.
- 34 BARROWMAN, E.M. The Measurement of Thermal Strain Using Self-Temperature Compensated Strain Gauges. Strain, 1973. p.23-8.
- 35 OLDROYD, P.W.J. A Diametral Extensometer for the Measurement of Small Strains in Tension - Compression Testing. - Journal of Strain Analysis, 1974. Vol.9, p.82-7.
- 36 VAN VLACK, Lawrence H. Princípios de Ciência dos Materiais. Edgar Blücker, 1970.
- 37 THOMPSON, Lord Kelvin. On the eletro-dinamic qualities of metals. Phil. Trans. Royal Soc. 1856, p.646-751.
- 38 SAUVEUR, A. The metallography and heat treatment of iron and Steel. McGraw-Hill Book Company, inc., 1943.
- 39 BELLUZZI, O. Scienza Delle Construzioni. Nicola Zanichell; Editore Bologna, 1957.
- 40 LASHERAS, J.M. Tecnologia del Acero. Zaragoza, 1959.

O importante de um trabalho
realizado, são os amigos feii
tos.