

1999

São Paulo

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia

**DESENVOLVIMENTO E ENSAIO DE TRANSDUTOR
MULTICOMPONENTE PARA MEDIÇÃO DE FORÇA E MOMENTO**

MIGUEL JAIME SANDOVAL RODRIGUEZ

1999

Orientador :
Tarcísio Antonio Hess Coelho

Área de Concentração :
Engenharia Mecânica

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia

MULTICOMPONENTE PARA MEDIÇÃO DE FORÇA E MOMENTO

DESENVOLVIMENTO E ENSAIO DE TRANSDUTOR

MIGUEL JAIMÉ SANDOVAL RODRIGUEZ

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Tarcísio Antonio Hess Coelho, pelo incentivo e apoio.

Ao Prof. Dr. Valter Francisco Arruda Alves, pelas sugestões e comentários motivadores.

A todos os colegas e funcionários da Escola Politécnica que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

iv	
vi	Lista de Figuras
viii	Lista de Tabelas
ix	Lista de Símbolos
xiii	Resumo
xiv	“Abstract”
1	1. Introdução.....
1	1.1 - Considerações preliminares.....
4	1.2 - Objetivos.....
4	1.3 - Sobre a divisão do trabalho.....
6	2. Revisão da Literatura.....
6	2.1 - Introdução.....
6	2.2 - Sistemas de Medição.....
7	2.2.1 - Sensor ou transdutor.....
8	2.2.2 - Amplificador.....
8	2.2.3 - Filtro.....
8	2.2.4 - Apresentador de dados.....
8	2.3 - Transdutores de força e momento.....
12	2.4 - Considerações básicas sobre extensometria.....
19	2.5 - Revisão de publicações mais recentes.....
25	3. Estrutura do Dinamômetro.....
25	3.1 - Introdução.....
25	3.2 - Tipo de estrutura do dinamômetro.....
28	3.3 - Modelagem matemática.....
33	3.4 - Verificação de resistência de um componente estrutural do dinamômetro.....
33	3.4.1 - Flambagem.....
34	3.4.2 - Tração / Compressão.....

4. Ensaio para determinação da matriz característica total do transdutor.....35

4.1 - Introdução.....35

4.2 - Descrição dos sistemas empregados na bancada experimental.....35

4.3 - Calibrações preliminares da célula de carga e dos seis anéis do transdutor.....38

4.3.1 - Calibração da célula de carga.....38

4.3.2 - Calibração dos seis anéis do transdutor desmontados do dinamômetro.....38

4.4 - Calibração do transdutor.....38

4.4.1 - Descrição genérica dos ensaios realizados.....38

4.4.2 - Descrição completa do procedimento experimental de um ensaio genérico.....39

4.4.3 - Descrição específica dos ensaios realizados.....46

4.4.4 - Obtenção das matrizes características experimentais estáticas do dinamômetro.....48

5 - Capacidade do Dinamômetro.....66

5.1 - Anel do transdutor mais solicitado.....66

5.1.1 - Uma força genérica com módulo igual a 1 N.....66

5.1.2 - Um momento genérico com módulo igual a 1 N.m.....67

5.1.3 - A combinação de força e de momento como esforços solicitantes no dinamômetro.....69

6 - Discussão.....71

7 - Conclusões.....77

7.1 - Conclusões.....77

7.2 - Temas de pesquisa futura.....77

8 - Referências Bibliográficas.....79

Anexos

A Calibração da célula de carga.....81

B Calibrações dos seis anéis desmontados do dinamômetro.....84

Apêndices

I - Listagem dos programas desenvolvidos

II - Sub-sistema de medição

Lista de Figuras

1.1 - Dinamômetro de TEN HORN e SCHURMANN com a balança de aferição (FERRARESI, 1970).....	2
1.2 - Dinamômetro O. KIENZLE para medição da força principal de corte (FERRARESI, 1970).....	2
1.3 - Aparelhagem empregada na medição de 2 componentes da força de usinagem (FERRARESI, 1970).....	3
1.4 - Montagem de duas peças de um conjunto.....	3
1.5 - Cilindros laminadores de chapas.....	3
2.1 - Componentes de um sistema de medição.....	6
2.2 - Característica de um transdutor.....	7
2.3 - Configurações e tipos básicos de transdutores de força (DOEBELIN, 1983).....	9
2.4 - Tipos de extensômetros (KYOWA, 1996).....	12
2.5 - Transdução do extensômetro elétrico.....	12
2.6 - Deformação sob tração (KYOWA, 1996).....	13
2.7 - Resistividade de metais (KYOWA, 1996).....	13
2.8 - Circuito da ponte (KYOWA, 1996).....	16
2.9 - Saída do circuito da ponte (KYOWA, 1996).....	16
2.10 - Célula de carga a tração.....	18
2.11 - Circuito da ponte da célula de carga.....	18
2.12 - Sensor de pulso de seis componentes baseado em extensômetros (KOREN, 1985).....	19
2.13 - Transdutor de elementos SPE (QUINN, MOTE, 1990).....	20
2.14 - Mola como transdutor de força (WICKAM, RILEY, 1992).....	21
2.15 - Medições do sensor de SORLI; PASTORELLI (1994).....	23
2.16 - Dinamômetro de múltiplas componentes de COELHO (1997).....	24
3.1 - Estrutura do Dinamômetro.....	26
3.2 - Detalhe da coluna.....	26
3.3 - Conexão da estrutura.....	27
3.4 - Diagrama de corpo livre da plataforma do dinamômetro.....	28
3.5 - Plataforma do transdutor.....	32
3.6 - Inclinação dos anéis 2, 4, 5 e 6 do transdutor.....	32
4.1 - Bancada de ensaios.....	37
4.2 - Sistema Mecânico.....	37
4.3 - Sistema de Medição.....	37
4.4 - Dinamômetro, sistema mecânico e célula de carga (carga no eixo Oz).....	41
4.5 - Dinamômetro, sistema mecânico e célula de carga (carga no eixo Ox).....	41
4.6 - Dinamômetro, sistema mecânico e célula de carga (carga no eixo Oy) de cima.....	42

4.7 - Dinamômetro, sistema mecânico e célula de carga (carga no eixo Oy) na lateral....	42
4.8 - Esquema de carregamento do dinamômetro pela célula de carga para obtenção das curvas experimentais de cada anel em uma determinada posição de carga no ponto P com origem em $P1$	43
4.9 - Sistema de coordenadas $Oxyz$ no transdutor de força (Origem para P e $P1$).....	44
4.10 - Posição de P e de $P1$ em relação ao transdutor para um carregamento.....	44
4.11 - Força aplicada no dinamômetro pela célula de carga.....	44
4.12 - Registro das leituras no ensaio I do anel I no dinamômetro.....	60
4.13 - Projção de \vec{F} no eixo Ox	61
4.14 - Projção de \vec{F} nos eixos Ox , Oy e Oz	61
4.15 - Aplicação de um esforço \vec{F}_7 em uma direção qualquer.....	62
5.1 - Orientação vetorial da força ou do momento aplicado no transdutor.....	68
5.2 - Gráfico da força e do momento respeitando o limite de 93 N, definido pela inequação da capacidade do dinamômetro.....	70
A.1 - Esquema de calibração da célula de carga.....	81
A.2 - Gráfico da calibração da célula de carga.....	83
B.1 - Esquema de calibração dos anéis desmontados do transdutor pela célula de carga.....	85
B.2 - Gráficos das calibrações dos anéis desmontados do transdutor pela célula de carga.....	86

2.1 - Configurações possíveis de transdutores elásticos de força e suas relações entre força e deflexão (BECKWITH ; MARANGONI, 1990).....	10
2.2 - Configurações possíveis de transdutores elásticos de momento e suas relações entre momento e deflexão (DEN HARTOG, 1956).....	11
4.1 - Ensaios de Calibração do transdutor com força e momento individuais e genéricos.....	46
4.2 - Carregamentos aplicados ao dinamômetro.....	47
4.3 - Valores das forças lidos nos seis anéis do transdutor.....	47
5.1 - Forças nos anéis do dinamômetro para força unitária e momento unitário.....	67
6.1 - Desvio percentual dos coeficientes da matriz inv[C]tot correspondente a todas as experiências no item 4.4.3 em relação à matriz teórica inv[C]t (%).....	75
6.2 - Desvio percentual dos coeficientes da matriz inv[C]exp correspondente às seis primeiras experiências no item 4.4.3 em relação à matriz teórica inv[C]t (%).....	76

Lista de Tabelas

- a₁ - Força atuante na coluna 1 do dinamômetro, segundo a direção da mesma, de módulo a₁
- a₂ - Força atuante na coluna 2 do dinamômetro, segundo a direção da mesma, de módulo a₂
- a₃ - Força atuante na coluna 3 do dinamômetro, segundo a direção da mesma, de módulo a₃
- a₄ - Força atuante na coluna 4 do dinamômetro, segundo a direção da mesma, de módulo a₄
- a₅ - Força atuante na coluna 5 do dinamômetro, segundo a direção da mesma, de módulo a₅
- a₆ - Força atuante na coluna 6 do dinamômetro, segundo a direção da mesma, de módulo a₆

encontra-se no seu respectivo desenho do **Apêndice II**)

6 - anel do transdutor ou coluna do dinamômetro (o seu posicionamento para o transdutor

encontra-se no seu respectivo desenho do **Apêndice II**)

5 - anel do transdutor ou coluna do dinamômetro (o seu posicionamento para o transdutor

encontra-se no seu respectivo desenho do **Apêndice II**)

4 - anel do transdutor ou coluna do dinamômetro (o seu posicionamento para o transdutor

encontra-se no seu respectivo desenho do **Apêndice II**)

3 - anel do transdutor ou coluna do dinamômetro (o seu posicionamento para o transdutor

encontra-se no seu respectivo desenho do **Apêndice II**)

2 - anel do transdutor ou coluna do dinamômetro (o seu posicionamento para o transdutor

encontra-se no seu respectivo desenho do **Apêndice II**)

1 - anel do transdutor ou coluna do dinamômetro (o seu posicionamento para o transdutor

Lista de Símbolos

a_{ij} - elemento equivalente a uma leitura de um anel "j" do transdutor no respectivo ensaio "i"
 α ou α_j - é a tangente de θ_j , ou seja a razão entre da_{ij} e dF_j ou entre dF_{kj} e dF_j
 c_{ij} - coeficiente da matriz inversa à matriz característica experimental total de um anel "j" do transdutor no respectivo ensaio "j"
 F_j - é a função de a_{ij} dependente dos F_{kj} 's
 F - força resultante aplicada no dinamômetro, com módulo F
 F_x - componente da força resultante F na direção do eixo Ox
 F_y - componente da força resultante F na direção do eixo Oy
 F_z - componente da força resultante F na direção do eixo Oz
 F_{xj} - componente da força resultante F do ensaio "j" na direção do eixo Ox
 F_{yj} - componente da força resultante F do ensaio "j" na direção do eixo Oy
 F_{zj} - componente da força resultante F do ensaio "j" na direção do eixo Oz
 F_{kj} - componente da força resultante aplicada no dinamômetro F_j , na direção de um eixo Ok , no respectivo ensaio "j"
 \vec{F}_j - vetor-força resultante no ensaio "j", com módulo F_j
 i - índice representativo do anel ou coluna do dinamômetro, que varia de 1 a 6
 j - índice representativo do ensaio executado na tabela 4.1, que varia de 1 ao 12
 k - índice representativo do eixo do sistema de referência, que pode ser x, y ou z
 M - momento resultante aplicado no dinamômetro, com módulo M

- M_x - componente do momento resultante M na direção do eixo Ox
- M_y - componente do momento resultante M na direção do eixo Oy
- M_z - componente do momento resultante M na direção do eixo Oz
- \vec{M}_j - vetor-momento resultante no ensaio " j ", com módulo M_j
- M_{xj} - componente do momento resultante M do ensaio " j " na direção do eixo Ox
- M_{yj} - componente do momento resultante M do ensaio " j " na direção do eixo Oy
- M_{zj} - componente do momento resultante M do ensaio " j " na direção do eixo Oz
- M_{kj} - componente do momento resultante aplicado no dinamômetro M_j , na direção de um eixo O_k , no respectivo ensaio " j "
- O - origem do sistema de referência de eixos x , y e z no dinamômetro
- P - ponto de aplicação de M_j
- P_1 - é o ponto de junção da coluna 1 com o plano Oxy na plataforma do transdutor
- P_2 - é o ponto de junção da coluna 2 com o plano Oxy na plataforma do transdutor
- P_3 - é o ponto de junção da coluna 3 com o plano Oxy na plataforma do transdutor
- P_4 - é o ponto de junção da coluna 4 com o plano Oxy na plataforma do transdutor
- P_5 - é o ponto de junção da coluna 5 com o plano Oxy na plataforma do transdutor
- P_6 - é o ponto de junção da coluna 6 com o plano Oxy na plataforma do transdutor
- θ_j - ângulo obtido no registro das leituras a_{ij} , ao ensaio " j " F_{kj} do anel " i " no dinamômetro
- θ_x - ângulo de \vec{F}_j com o eixo Ox
- θ_y - ângulo de \vec{F}_j com o eixo Oy
- θ_z - ângulo de \vec{F}_j com o eixo Oz

θ_{px} - ângulo de (P-O) com o eixo Ox

θ_{py} - ângulo de (P-O) com o eixo Oy

θ_{pz} - ângulo de (P-O) com o eixo Oz

x - eixo do sistema de referência no plano horizontal Oxy; cuja direção é ortogonal às direções das colunas 1 e 3, e cujo sentido é da coluna 6 para a coluna 4 do dinamômetro

y - eixo do sistema de referência no plano horizontal Oxy; cuja direção é ortogonal às direções das colunas 1 e 3, e cujo sentido é da coluna 4 para a coluna 2 do dinamômetro

z - eixo do sistema de referência, perpendicular ao plano horizontal Oxy e cujo sentido é da base para a plataforma do dinamômetro

Os sensores de esforços - forças e momentos - possuem grandes aplicações em manipuladores robóticos, no controle de processos industriais que envolvam conformação plástica de materiais, no balanceamento de máquinas, etc. Esta disseertação apresenta um tipo de dinamômetro, relativamente compacto, à base de extensômetros elétricos, para medição de forças e momentos, representando um total de 6 componentes de esforço. Sua forma lembra a de uma plataforma de Stewart, com colunas de comprimento fixo. As suas características construtivas lhe conferem um desempenho bastante promissor em termos de rigidez, sensibilidade e capacidade de carga. Um modelo computacional do dinamômetro foi desenvolvido para a execução do seu dimensionamento, bem como para verificação da sua conformidade com as medições experimentais. O trabalho também trata da calibração do transdutor, do levantamento da matriz característica estática e da avaliação de sua capacidade.

Resumo

Force and moment transducers are extremely useful in many applications like robotic manipulators, industrial process control dealing with plastic conformation, machine balancing, etc. This dissertation presents a type of strain-gage dynamometer relatively compact for measuring 3-component force and 3-component moment. Its shape resembles a Stewart platform, with fixed length columns. Its assembled structure presents a very promising performance in terms of rigidity, sensibility and load capacity. A computational model was developed to carry out its dimensioning, as well as the verification of agreement with experimental measurements. Through execution of many tests, the work deals also with transducer calibration, static characteristic matrix calculation, and load capacity evaluation.

Abstract

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações preliminares

A situação atual, de internacionalização dos mercados no mundo inteiro, provocou uma enorme concorrência entre todos os países, os quais procuram cada vez mais, uma maior competitividade para os seus produtos. Sendo assim, tornou-se realmente fundamental a redução dos custos e tempos de fabricação dos produtos, de forma a oferecer ao cliente artigos de grande qualidade a preços mais acessíveis.

Como resposta a estas necessidades, observa-se que a automação de alguns processos de fabricação mecânica, tais como, usinagem, conformação plástica e montagem, vem contribuindo significativamente para a viabilização destes árduos objetivos.

Diante deste quadro, não se pode negar que os transdutores sejam um componente básico e estratégico para o controle destes processos industriais, de modo a garantir para os mesmos, eficácia e eficiência.

Dentre os diversos tipos de transdutores, os dinamômetros possuem inúmeras aplicações nestes processos. Apenas a título de exemplo, podem ser citadas a monitoração de esforços de usinagem na interação entre a ferramenta e a peça a ser trabalhada (Figs. 1.1, 1.2 e 1.3), o controle dos esforços de montagem, na interação entre duas peças diferentes para formação de um novo conjunto (Fig. 1.4); além do controle das forças atuantes em cilindros laminadores de chapas (Fig. 1.5).

Ha situações, como é o caso da monitoração de esforços de usinagem, em que é necessária a medição de esforços em mais de uma direção e o transdutor, assim torna-se multicomponente (Fig. 1.3).

Os transdutores multicomponentes para medição de força e momento também encontram diversas aplicações no balanceamento de sistemas mecânicos, tais como, rotores e mecanismos.

O balanceamento destes sistemas proporciona-lhes um funcionamento isento de vibrações e ruídos, evitando que seus componentes sofram um desgaste prematuro, ou ainda que falhem por fadiga.

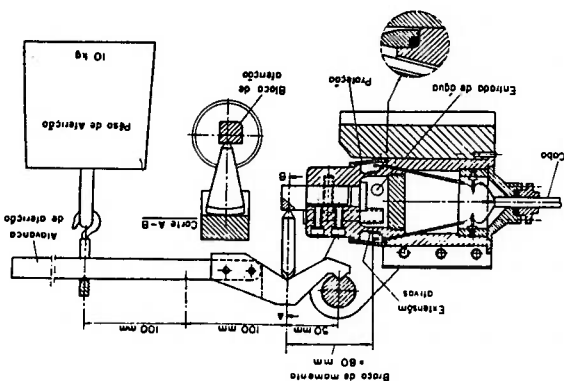


Fig. 1.1 - Dinamômetro de TEN HORN e SCHURMANN com a balança de alívio. (FERRARESI, 1970).

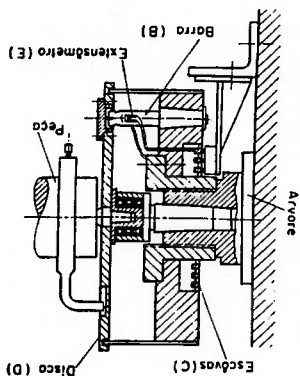


Fig. 1.2 - Dinamômetro O. KIENZLE para medição da força principal de corte. (FERRARESI, 1970).

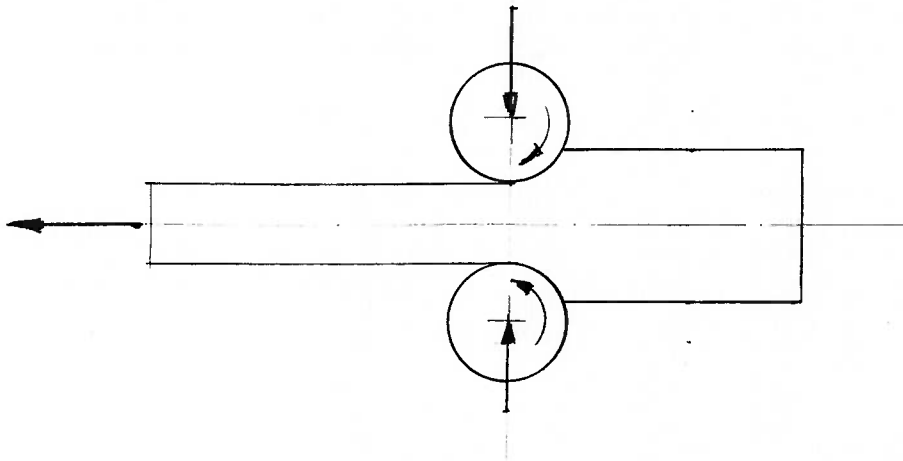
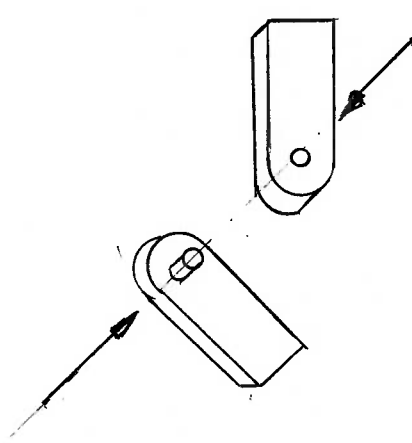


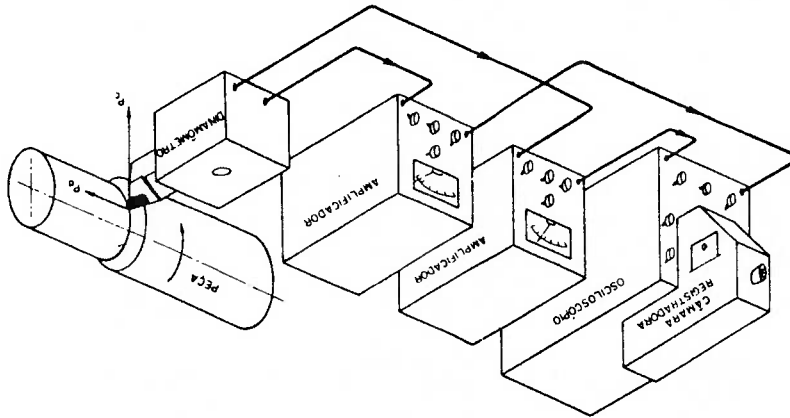
Fig. 1.5 - Cilindros laminadores de chapas.

Fig. 1.4 - Montagem de duas peças de um conjunto.



(FERRARESI, 1970).

Fig. 1.3 - Aparelhagem empregada na medição de 2 componentes da força de usinagem.



1.2 - Objetivos

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um transdutor multicomponente de esforços atuantes em sistemas mecânicos. Estes esforços compreendem três componentes de um vetor-força e três componentes de um vetor-momento.

A metodologia empregada neste trabalho envolve a definição da geometria do transdutor, o desenvolvimento dos seus modelos teórico e computacional, a construção do seu protótipo, a montagem de uma bancada de ensaios, a sua calibração e a determinação da sua capacidade.

1.3 - Sobre a divisão do trabalho

O capítulo 2 inicia com a revisão da literatura, apresentando os sistemas de medição e os diferentes tipos de transdutores de força e momento.

O capítulo 3 apresenta a definição da geometria do transdutor e o desenvolvimento do seu modelo teórico, além da verificação de resistência de um componente estrutural do dinamômetro.

O capítulo 4 contém informações sobre o protótipo do transdutor construído, a descrição da bancada experimental, além do detalhamento de cada um dos ensaios realizados. Os resultados obtidos, que envolvem fundamentalmente a calibração do transdutor, também são apresentados neste capítulo.

O capítulo 5 traz o levantamento da capacidade do transdutor em função dos valores dos esforços utilizados nas calibrações da célula de carga e dos anéis do transdutor.

O capítulo 6 apresenta a discussão, onde são comentadas as características do transdutor desenvolvido, bem como os procedimentos seguidos para sua calibração.

O capítulo 7 trata das conclusões gerais e das principais contribuições deste trabalho, bem como sugere possíveis temas para pesquisas futuras a serem realizadas nos tópicos abordados.

O capítulo 8 traz todas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

Finalmente foram incluídos neste trabalho, uma série de anexos e apêndices, que trazem o modelo computacional desenvolvido, gráficos e desenhos do transdutor.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - Introdução

A revisão da literatura trata de dois assuntos básicos relacionados com o tema desta dissertação : sistemas de medição e transdutores de força e momento.

Os sistemas de medição são apresentados na seção 2.2, onde são descritos os seus componentes e suas principais características.

A seção 2.3 aborda as configurações e características de diferentes tipos de transdutor de força e momento.

A seção 2.4 trata de considerações básicas sobre extensometria, apresentando-se seu princípio de funcionamento, suas características normais de desempenho, além de incluir comentários sobre parte da instrumentação associada aos extensômetros elétricos.

A seção 2.5 apresenta publicações importantes e recentes sobre transdutores de força e momento.

2.2 - Sistemas de Medição

Um sistema de medição é um instrumento cuja finalidade é medir uma grandeza associada a um meio e apresentá-la a um observador. Os sistemas de medição são constituídos por um conjunto de componentes apresentados de forma esquemática na figura 2.1.

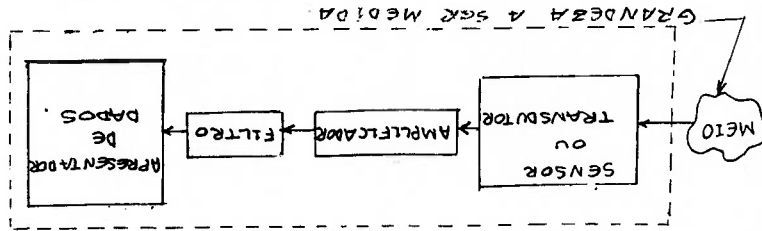


Fig. 2.1 - Componentes de um sistema de medição.

Estes componentes são sensor ou transdutor, amplificador, filtro e apresentador de dados. As principais características destes componentes são descritas a seguir.

2.2.1 Sensor ou transdutor

É o elemento que, ao sensibilizar-se por um sinal físico externo, o transforma em um outro de natureza diferente. O transdutor adquire parte da energia do meio em que está em contato. Esta energia é convertida num outro tipo de energia ao passar por ele, caracterizando a sua capacidade de transdução. Os transdutores com aplicação em engenharia mecânica, normalmente convertem uma grandeza mecânica (pressão, temperatura, aceleração) numa grandeza elétrica (voltagem, intensidade de corrente).

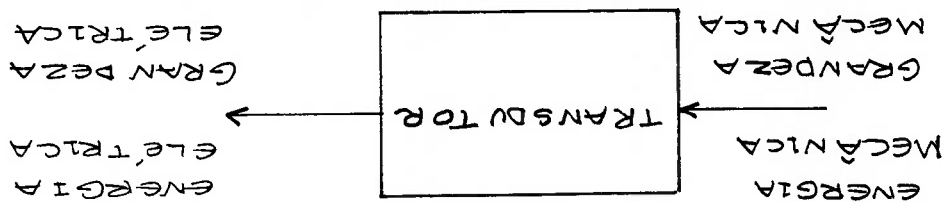


Fig. 2.2 - Característica de um transdutor.

Como exemplos podem ser citados, um acelerômetro piezoelétrico que mede aceleração e a converte em carga, o termopar que converte temperatura em diferença de potencial. Os transdutores são avaliados por suas características de desempenho, tais como, a sensibilidade, a linearidade, o fator de calibração, capacidade, etc. A sensibilidade de um transdutor está diretamente ligada à relação entre a grandeza elétrica lida (saída) e a grandeza mecânica medida (entrada) :

$$\text{sen sibilidade} = \frac{\text{grandeza elétrica lida}}{\text{grandeza mecânica medida}}$$

2.2.2 Amplificador

É o elemento do sistema que recebe o sinal do transdutor, geralmente de baixa intensidade, e o eleva para uma ordem de grandeza compatível com o nível de leitura do apresentador de dados.

2.2.3 Filtro

O sinal adquirido pelo transdutor normalmente é um sinal misto, composto pelo sinal desejado (grandeza mecânica a ser medida) e por sinais indesejáveis, também conhecidos como ruídos. O filtro é o elemento responsável pela eliminação ou atenuação dos ruídos. Há diversos tipos de filtros : passa-alta, passa-baixa, passa-faixa, etc.

2.2.4 Apresentador de dados

É o elemento responsável pela apresentação ou registro dos valores da grandeza elétrica lida. O modo de apresentação dependerá do tipo de instrumento utilizado para esta função. Como exemplos podem ser citados, multímetros, registradores (x-t, x-y), osciloscópios ou ainda microcomputadores com placas de aquisição de dados.

2.3 - Transdutores de força e momento

Com relação às configurações e tipos comuns de transdutores de força, podem ser mencionados (DOEBELIN, 1983) :

(a) BALANÇA, que funciona a partir do equilíbrio da força a ser medida com uma força gravitacional conhecida, peso, através de um sistema de alavancas .

(b) ACELERÔMETRO, em que a determinação da força se dá a partir da medição da aceleração aplicada a uma massa de valor conhecido.

(c) BALANÇA ELETROMAGNÉTICA, que opera a partir do equilíbrio da força aplicada por uma força de natureza magnética proveniente da interação entre uma bobina com corrente elétrica e um ímã.

(d) CÉLULA DE CARGA PNEUMÁTICA OU HIDRÁULICA, que opera a partir da conversão da força aplicada em uma pressão de fluido a ser medida.

(e) TRANSDUTORES ELÁSTICOS, em que a determinação da força aplicada a um elemento elástico se dá a partir da medição de sua deflexão.

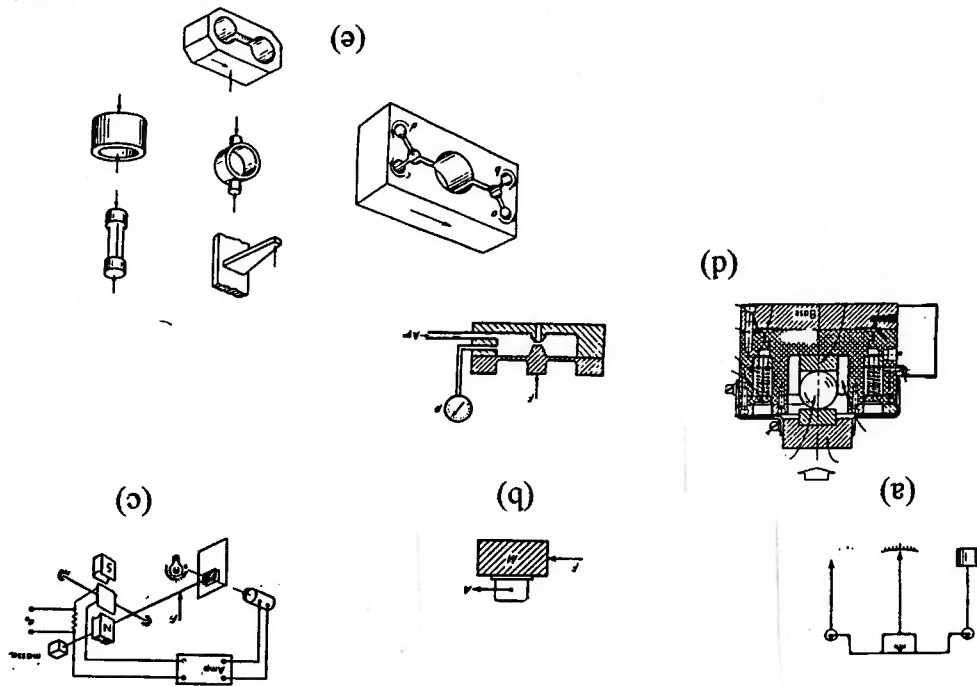
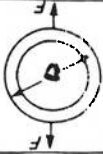

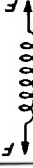
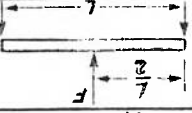

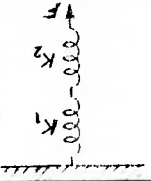


Fig. 2.3 - Configurações e tipos básicos de transdutores de força: (a) Balança; (b) Acelerômetro; (c) Balança eletromagnética; (d) Células de carga hidráulica e pneumática; (e) transdutores elásticos (DOEBELIN, 1990).


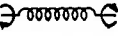
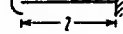

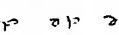



No caso dos transdutores elásticos de força, BECKWITH; MARANGONI (1990) apresentam as tabelas 2.1 e 2.2 em que descrevem a relação entre a força e a deflexão dependendo da forma geométrica do transdutor.

Tabela 2.1 - Configurações possíveis de transdutores elásticos de força e suas relações entre força e deflexão (DOEBELIN, 1990).

	$y = \frac{F D^3}{16 E I} \left(2 \frac{R}{4} - \frac{R}{4} \right)$	$K = \frac{16}{(N/2) - (4/R)} \left(\frac{D^3}{E I} \right)$
	$y = \frac{F}{K_1 + K_2}$	$K = K_1 + K_2$
	$y = \frac{8 F D^3 N}{E_s D^4}$	$K = \frac{E_s D^4}{8 D^3 N}$
	$y = \frac{F L^3}{48 E I}$	$K = \frac{48 E I}{L^3}$
	$y = \frac{F L}{\Delta E}$	$K = \frac{A E}{L}$
	$y = F \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right)$	$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}}$

A - área da seção transversal do elemento elástico
D - diâmetro externo do anel
Dm - diâmetro médio do elemento de mola
Dw - diâmetro do arame de mola
E - módulo de Young (elasticidade longitudinal)
Es - módulo de cisalhamento (elasticidade transversal)
F - força aplicada
I - momento de inércia
K - constante de deflexão de mola
K1 - constante de deflexão da mola 1
K2 - constante de deflexão da mola 2
L - comprimento do elemento elástico
N - número de molas
y - deflexão resultante

Tabela 2.2 - Configurações possíveis de transdutores elásticos de momento e suas relações entre momento e deflexão (DEN HARTOG, 1956).

	<p>Torção de mola espiral; diâm. do arame = d; Diâm. da espiral: $n = n$ de voltas $k = \frac{E d^4}{64 n D^3}$</p>
	<p>Flexão de mola espiral $k = \frac{E d^4}{32 n D^3} \cdot \frac{1}{1 + \frac{E}{2G}}$</p>
	<p>Mola espiral; l = comprimento total; l = momento de inércia da seção transversal $k = \frac{l}{EI}$</p>
	<p>Torção de eixo circular perfurado; D = diâm. externo; d = diâm. interno; l = comprimento $k = \frac{GI_p}{l} = \frac{\pi G(D^4 - d^4)}{32 l}$</p>
	<p>Balanco $k = 1,18 \times 10^6 \times \frac{l}{D^4 - d^4}$ $k = \frac{l}{EI}$</p>
	<p>Balanco $k = \frac{25I}{l^2}$</p>
	<p>Viga simplesmente apoiada; momento no centro $k = \frac{l}{12EI}$</p>
	<p>Viga duplamente engastada; momento no centro $k = \frac{l}{16EI}$</p>

k - constante de flexão
 E - módulo de elasticidade longitudinal
 G - módulo de elasticidade transversal
 $I_p = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32}$

2.4 - Considerações básicas sobre extensometria

Os transdutores elásticos, conforme mencionado na seção anterior, constituem-se em elementos elásticos para correlacionar o esforço aplicado (força ou momento) com a deflexão resultante (deflexão linear ou angular).

Os extensômetros elétricos são elementos que uma vez colados em posições convenientes sobre estes elementos elásticos, permitem que o novo conjunto se torne efetivamente um transdutor de esforço.

Os extensômetros são, na verdade, resistores elétricos, que pela 2a. lei de Ohm, permitem a transdução de sua deformação elástica para a variação relativa de sua resistência elétrica.

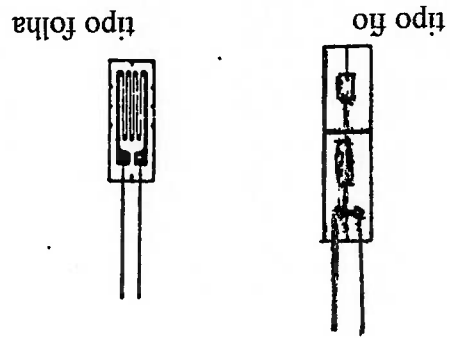


Fig. 2.4 - Tipos de extensômetros.

O extensômetro elétrico é um transdutor, logo :

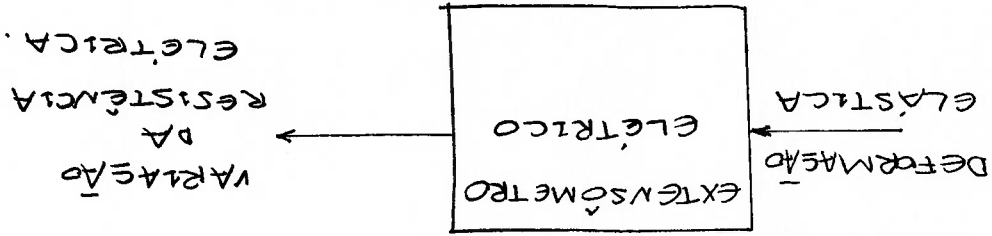


Fig. 2.5 - Transdução do extensômetro elétrico.

Sejam :

l = comprimento original do fio , sem deformação

R = resistência elétrica do fio

ρ = resistividade do material do fio

A = área da seção transversal do fio

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

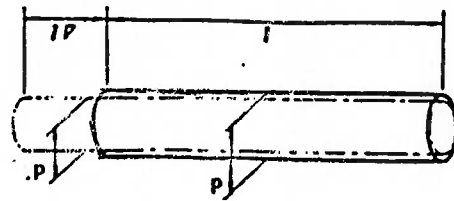


Fig. 2.6 - Deformação sob tração. (KYOWA, 1996)

Fig. - 2.7 Resistividade de metais. - (KYOWA, 1996)

Metal	Resistiv. (x10 ⁻⁶ Ω·m)
Al	2.4
Au	1.6
Ag	1.6
Tungstênio	5.5
Fe	9.8
Ni	7.2
Prata	10.6

A seguir, apresenta-se a dedução do valor da característica sensibilidade do extensômetro a partir da equação da 2a. lei de Ohm (KYOWA, 1996).

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon$$

$$\therefore \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon = (1+m) + 2 \cdot \nu \cdot (1-m)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = (1-2 \cdot \nu) \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

onde m é a constante proporcional experimentalmente obtida e ν é o coeficiente de Poisson.

$$\text{mas } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \text{deformação} \quad \text{e } \Delta p = m \cdot p \cdot \frac{\Delta V}{V}$$

$$\therefore \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta t}{t}$$

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \cdot \frac{\Delta d}{d} = -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{e}$$

$$d'' \leq d$$

se a deformação for por tração e a seção for circular,

$$A = b \cdot t$$

e se A for retangular,

$$\Rightarrow A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

Se A for circular

No caso do material para o fio do extensômetro ser liga de Cu - Ni, m é igual a 1.

$$\frac{\Delta R}{R} / \epsilon = 2 = GF = \text{sensibilidade ou "gage factor"} (GF).$$

Os elementos constituintes de um extensômetro são um fio de pequeno diâmetro de metal resistivo (espessura da ordem de micrômetros) e uma base de material isolante elétrico, como a poliamida.

As resistências típicas dos extensômetros variam desde 120 Ω até 1.000 Ω .

Sobre o desempenho geral do extensômetro, algumas características devem ser consideradas, tais como, não-linearidade, intensidade máxima de corrente, resposta em frequência, limite à fadiga.

Não linearidade : As deformações na ordem de 3.000 a 4.000 $\cdot 10^{-6}$, têm aproximadamente 1% de não linearidade. A não-linearidade de 3 a 5% ocorre para deformações de 6.000 a 8.000 $\cdot 10^{-6}$. No caso de deformações na faixa de 10.000 a 30.000 $\cdot 10^{-6}$ haverá o rompimento do extensômetro.

Corrente : No máximo aplica-se 20 mA e, como consequência, a voltagem máxima na ponte será 5V para extensômetros com resistência de 120 Ω , e 14V para 350 Ω .

Resposta de frequência : Em fenômenos dinâmicos, a transmissão da deformação do extensômetro é rápida; entretanto, em fenômenos de choques, a distribuição de deformações no extensômetro não é uniforme, então, de acordo com experiências realizadas, os períodos de transmissão serão de 1,6 e 0,47 μ s, para extensômetros com comprimento de 10 e 3 mm respectivamente (ao menos nas frequências de 170 e 360 KHz).

Fadiga : Se a deformação for muito grande e frequente, teremos a desconexão do extensômetro, e com isso ele não funcionará mais, isto é denominado de fadiga. A resistência à fadiga do extensômetro dependerá do tipo de deformação aplicada com o seu respectivo ciclo, bem como, do tipo, forma e tamanho do extensômetro. Em geral os extensômetros têm fadiga em cerca de 10^5 ciclos.

Devido às dificuldades de leitura direta da variação de resistência do extensômetro, recorre-se a um circuito elétrico formado por uma ponte de Wheatstone. A variação típica da resistência elétrica do extensômetro, pela sua deformação é da ordem de 10^{-6} a $10^{-3} \Omega$.

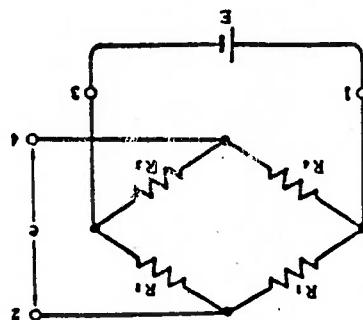


Fig. 2.8 - Circuito da ponte. (KYOWA, 1996).

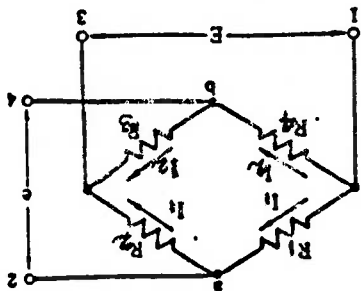


Fig. 2.9 - Saída do circuito da ponte. (KYOWA, 1996).

O circuito consiste de 4 resistores, de resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_4 . A ponte é excitada nos pontos 1 e 3, e os pontos 2 e 4 são os terminais de saída da ponte.

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

quando $e = 0$, neste caso a ponte estará balanceada.

Quando a corrente flui de R_1 para R_2 , e de R_4 para R_3 , serão chamadas respectivamente, de I_1 e I_2 .

$$I_1 = \frac{V_0}{R_1 + R_2} \quad e \quad V_a = R_2 \cdot I_1 \Rightarrow V_a = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot V_0$$

$$I_2 = \frac{V_0}{R_3 + R_4} \quad e \quad V_b = R_3 \cdot I_2 \Rightarrow V_b = \frac{R_3 + R_4}{R_3} \cdot V_0$$

$$V = V_{24} = V_a - V_b = V_0 \cdot \left[\frac{R_2 \cdot (R_3 + R_4) - R_3 \cdot (R_1 + R_2)}{(R_2 \cdot R_4 - R_1 \cdot R_3)} \right] = V_0 \cdot \frac{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$

admitindo-se que as resistências iniciais dos resistores 1 a 4 sejam iguais a R_0 , pode-se demonstrar que :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1}{4 \cdot R_0} \cdot (-\Delta R_1 + \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4)$$

Como para um extensômetro elétrico a sua sensibilidade ("gage factor", G.F.) vale :

$$\frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} = G.F.,$$

onde ε é a deformação sofrida pelo extensômetro .

Se as sensibilidades dos extensômetros forem iguais, tem-se :

$$\Delta V = \frac{G.F.}{4} \cdot (-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \cdot V_0$$

No caso de uma célula de carga à tração, com os extensômetros colados conforme indicado na figura 2.10 e circuito da ponte indicado na figura 2.11 :

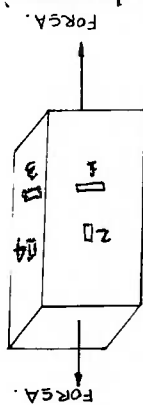


Fig. 2.10 - Célula de carga à tração

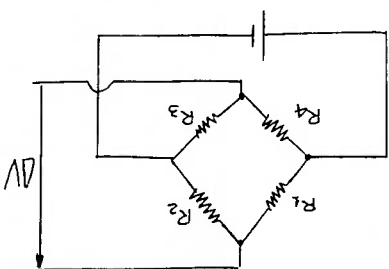


Fig. 2.11 - Circuito da ponte da célula de carga.

$$\epsilon_1 = \epsilon_3 = -\nu \cdot \epsilon \quad \epsilon \quad \epsilon_2 = \epsilon_4 = \epsilon$$

$$\Delta V = V_0 \cdot \frac{GF}{4} \cdot 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \epsilon$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \epsilon \quad \sigma = \frac{F}{A}$$

$$\Delta V = V_0 \cdot \frac{GF}{2} \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{E}{\sigma}$$

$$\Delta V = \frac{V_0}{GF} \cdot \frac{E}{2} \cdot (1 + \nu) \cdot \frac{F}{A}$$

$$\Delta V = \frac{F}{(1 + \nu)} \cdot \frac{E}{V_0} \cdot \frac{GF}{A}$$

onde a relação $\frac{F}{\Delta V}$ representa a sensibilidade estática da célula de carga considerada. Pode-se concluir que $\frac{F}{\Delta V}$ depende diretamente da tensão de alimentação da ponte, da sensibilidade do extensômetro e do coeficiente de Poisson do material da célula e, indiretamente, do módulo de elasticidade do material da célula e de sua área de secção transversal.

2.5 - Revisão de publicações mais recentes

KOREN (1985) apresenta um tipo de transdutor desenvolvido pela empresa SRI International visando a medição de esforços atuantes em garras robóticas. A forma construtiva do dinamômetro, a posição e orientação angular dos extensômetros são indicados na fig. 2.12. Este transdutor permite a medição de três componentes de força e três componentes de momento. As suas características geométricas lhe conferem um bom desempenho em termos de sensibilidade e rigidez na aplicação mencionada. Os extensômetros foram selecionados devido ao baixo custo, alta resolução e boa confiabilidade.

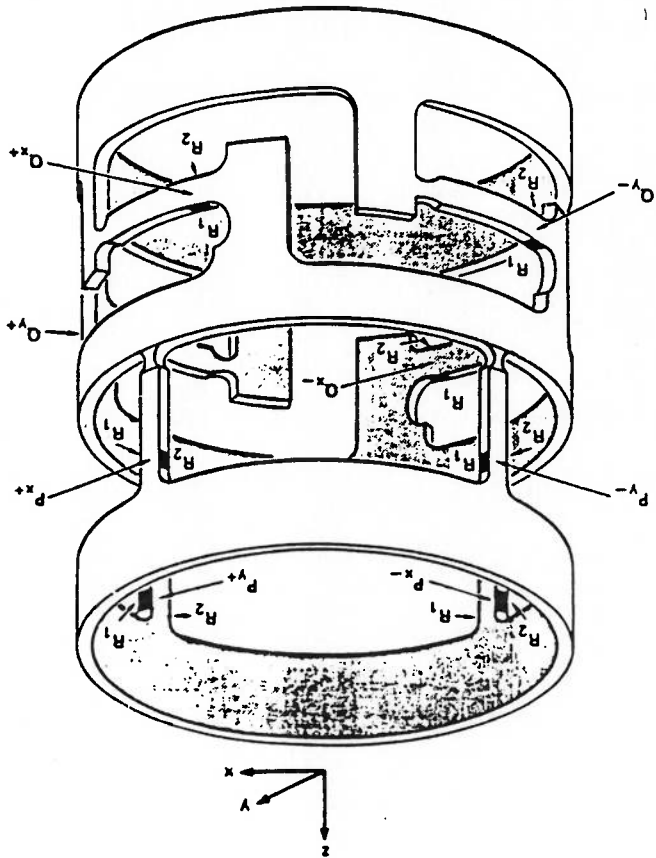


Fig. 2.12 - Sensor de pulso de seis componentes baseado em extensômetros. KOREN (1985).

QUINN ; MOTE (1990) apresentaram um transdutor de 6 componentes para medição de força e momento, constituído por uma gaiola sustentada por 6 ou mais vigas que, por sua vez, se ligam a uma base. A gaiola é a região de aplicação dos esforços. As vigas, que possuem alma e flange de pequena espessura, eram chamadas de "Shear panel elements" (SPE). A figura 2.13 contém indicações da forma construtiva do transdutor, suas partes, as posições de colagem dos extensômetros e suas orientações angulares. A otimização das dimensões do transdutor de elementos SPE, se dá de tal maneira que apresentem alta sensibilidade e, ao mesmo tempo, possuam resistência mecânica e capacidade de carga. A função-objetivo visa maximizar a deformação por cisalhamento lida pelos extensômetros.

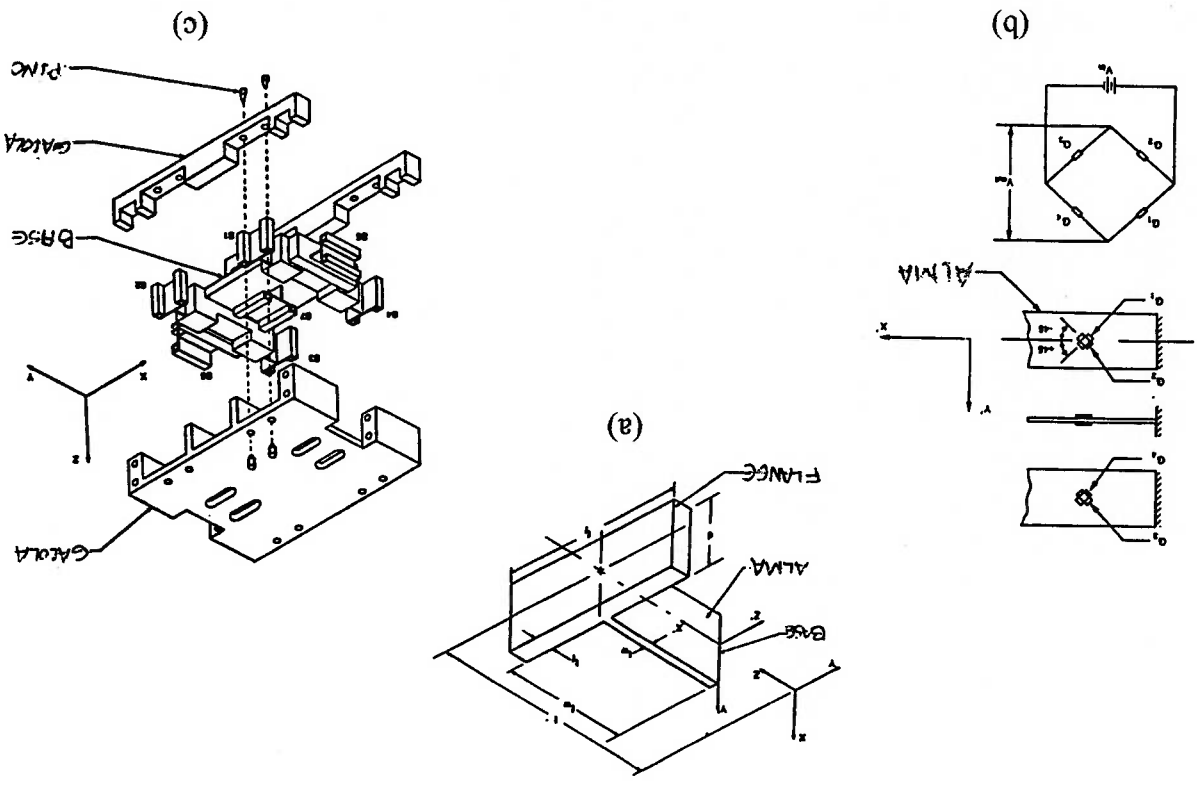


Fig. 2.13 - Transdutor de elementos SPE : (a) Elemento ; (b) Os extensômetros (G₁, G₂, G₃, G₄) no elemento ; (c) Montagem do conjunto. (QUINN ; MOTE, 1990).

Em algumas situações, não é viável inserir uma célula de carga no sistema em que se pretende medir os esforços aplicados. Nestes casos, seria conveniente usar uma região da própria estrutura do sistema como um transdutor de força.

WICKAM ; RILEY (1992), observaram que a precisão das estimativas das cargas aplicadas depende do número de extensômetros elétricos empregados e de seus locais de colagem na estrutura . A questão é descobrir as regiões mais solicitadas e, nestes locais, instalar os extensômetros para medição de esforços atuantes. Para tanto, os autores empregaram um programa de análise de tensões e deformações pelo método dos Elementos Finitos, para fornecer uma boa indicação destas variáveis (ver a fig. 2.14).

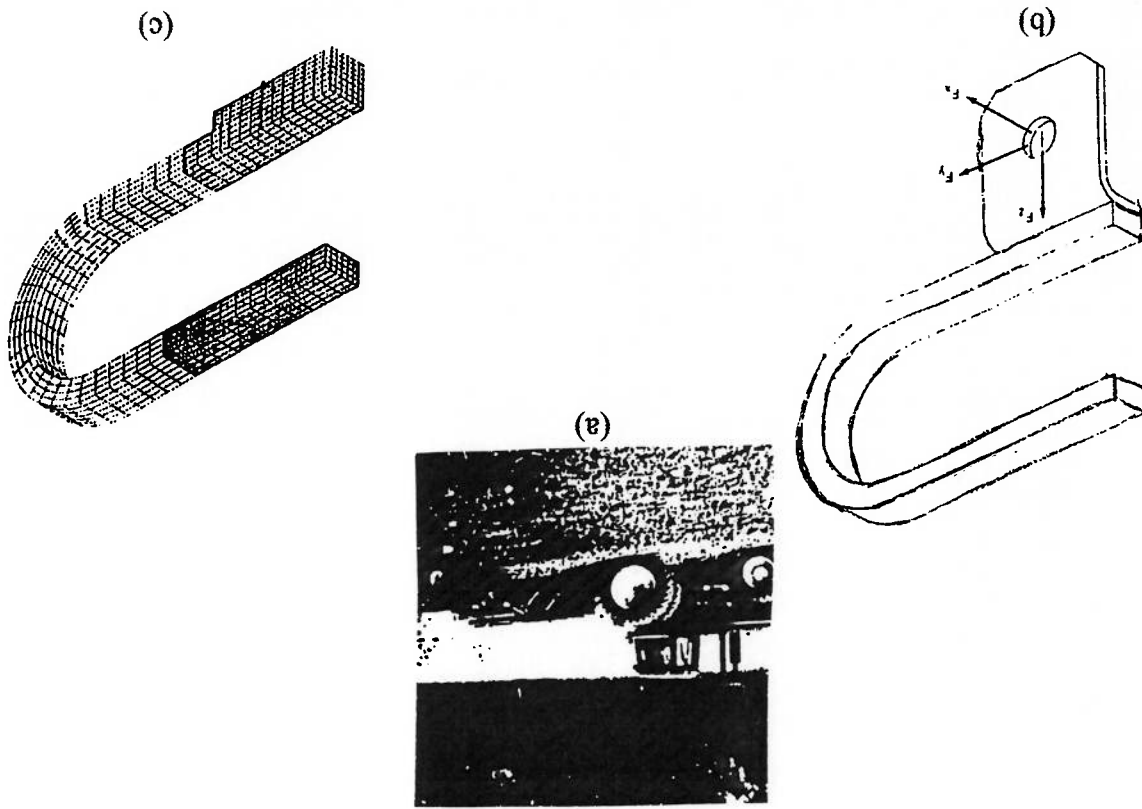


Fig.2.14 - Mola (transdutor de força) :

(a) Disco com molas ; (b) Mola com 3 cargas ; (c) Modelo de análise de elementos finitos. (WICKAM ; RILEY, 1992).

A qualidade da instrumentação, via de regra, tem um papel fundamental na produção, devido à necessidade de uma certificação das características metrológicas, procedimentos de utilização e de manutenção destes instrumentos. Os procedimentos de qualidade consistem em requisitos específicos aplicáveis às calibrações e verificações periódicas de modo a detectar possíveis irregularidades na medição. Apesar do custo inerente a estes procedimentos, as calibrações podem ser reduzidas mediante um plano apropriado de ensaios periódicos parciais de modo a assegurar o correto funcionamento destes sistemas de medição.

BARBATO,FRANCESCINI (1994) recomendaram procedimentos convenientes, definindo também indicadores de desempenho, para ensaios auto-consistentes de avaliação e desempenho de instrumentos, com referência especial para transdutores multicomponentes. Em alguns casos, métodos de compensação de medição foram desenvolvidos de modo a eliminar a interferência entre componentes de força e momento, medidas naqueles transdutores.

Um sensor de força e de torque de seis componentes, com uma estrutura baseada na arquitetura de plataforma articulada de STEWART, foi desenvolvido por SORLI; PASTORELLI (1994), indicado na fig. 2.15. Formado por seis colunas, que tinham a função de sustentar a plataforma sobre a base, e eram, na verdade, seis transdutores de força comerciais. Os comprimentos de cada coluna, bem como suas orientações foram determinadas pelos autores de modo a garantir rigidez, leveza e capacidade de carga à estrutura do transdutor.

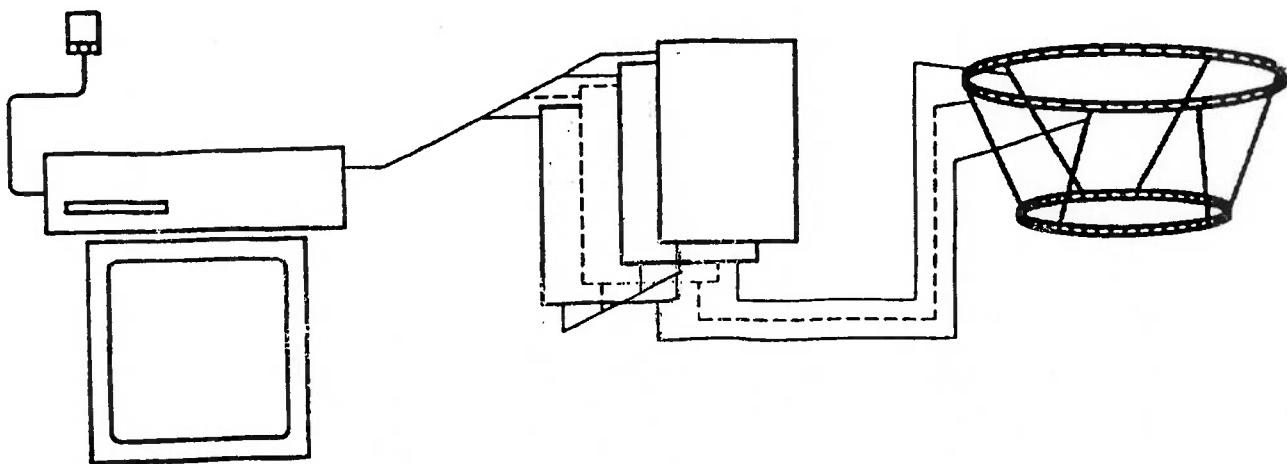
WEN LIN ; VENUVINOD (1995), apresentaram um método, que consistia na utilização de um circuito elétrico de compensação ligado à ponte de Wheatstone. Desta forma, eliminava-se a necessidade de um projeto estrutural complexo de transdutor, bem como de uma alta precisão de fabricação.

Um outro projeto de dinamômetro multicomponente foi apresentado por COELHO (1997), sendo uma parte integrante de seu trabalho, que abrangia a otimização no balanceamento de mecanismos tri-dimensionais do tipo RSSR.

Este dinamômetro consistia de uma plataforma, aonde era instalada uma peça de um par de revolução do mecanismo mencionado; uma base; e seis colunas onde a plataforma se apoiava sobre a base. A conexão das extremidades das colunas com a base e a plataforma era feita através de pares esféricos. Como não havia qualquer esforço atuante que provocasse movimento de rotação na direção longitudinal das colunas, verificou-se que a estrutura poderia ser considerada isostática, assim, naquele dinamômetro poderiam atuar até seis esforços, 3 forças e 3 momentos nas direções x , y e z , chamados de esforços de entrada.

Os esforços de saída eram as 6 forças atuantes nas 6 colunas. Logo, empregando as equações de equilíbrio da estática, o autor determinava, indiretamente, os esforços de entrada. Deve-se mencionar também que cada coluna do dinamômetro consistia de um anel, onde eram colados 4 extensômetros elétricos, sendo que a força nele atuante era medida através da variação da voltagem numa ponte de Wheatstone, (ver fig 2.16).

Fig. 2.15 - Medições do sensor de SORLI; PASTORELLI (1994).



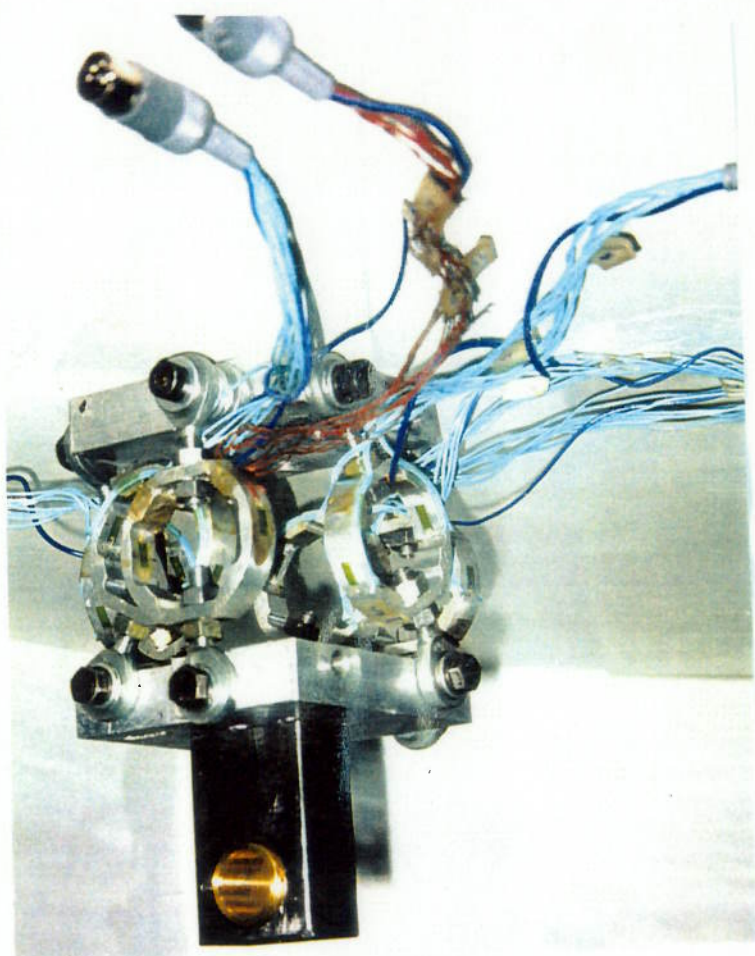


Fig. 2.16 - Dinamômetro de múltiplas componentes de COELHO. (1997).

3 - ESTRUTURA DO DINAMÔMETRO

3.1 - Introdução

Neste capítulo são descritas as características do tipo de estrutura selecionada para o dinamômetro. Apresentam-se a sua forma geométrica, seus elementos e verifica-se também, se a mesma é hipostática, isostática ou hiperestática.

A seguir, aborda-se o modelo matemático do transdutor, onde são desenvolvidas as equações que relacionam os esforços a serem medidos com os esforços efetivamente lidos pelo dinamômetro. O capítulo termina com a verificação da resistência de um componente do dinamômetro, considerado crítico.

3.2 - Tipo de estrutura do dinamômetro

A sua forma geométrica lembra a de uma plataforma de Stewart, com colunas de comprimento fixo (fig. 3.1). É formada por uma base, um elemento suspenso ou plataforma onde se aplicam os esforços a serem medidos, seis colunas, além das conexões que unem estas peças. Cada uma das seis colunas é constituída por um anel com 4 extensômetros elétricos colados. Com relação à instrumentação associada a estes extensômetros, ela é descrita no capítulo 4. Quanto às conexões, elas são, na verdade, hastes de aço de pequeno diâmetro, que unem as extremidades das colunas ao elemento suspenso e à base, e possuem uma certa flexibilidade.

O dinamômetro selecionado é semelhante ao desenvolvido por COELHO (1997), onde procurou-se neste trabalho, um dinamômetro mais leve com conexões flexíveis , mas sem folga (fig.3.2).

Fig. 3.2 - Detalhe da coluna.

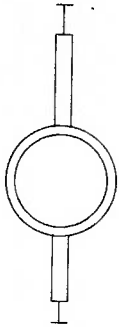
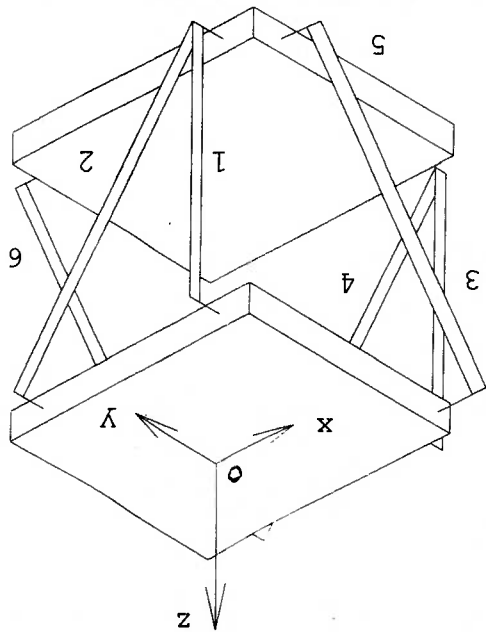


Fig. 3.1 - Estrutura do Dinamômetro.



Para verificação da situação desta estrutura em termos de hipostaticidade, isostaticidade ou mesmo de hiperstaticidade, pode-se determinar o seu número de graus de mobilidade (GM), empregando o critério de Kutzbach-Grübler (SHIGLEY, WICKER, 1981), que estabelece:

$$GM = 6 \cdot (n - 1) - \sum_{j=1}^5 (n - j) \cdot np_j$$

onde n é o número de peças e np_j , o número de conexões que permitem j graus de liberdade.

As conexões presentes na estrutura devido ao seu diâmetro ser pequeno em relação ao seu comprimento, possuem pouca rigidez à flexão em duas direções e também pouca rigidez à torção, conforme indicado na fig. 3.3.

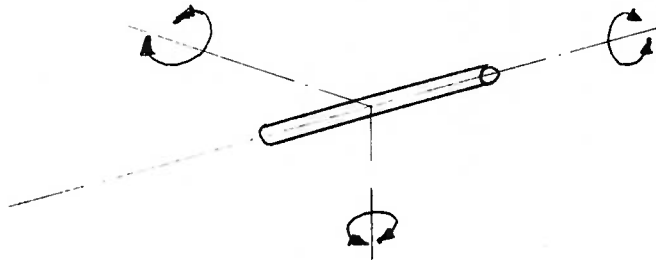


Fig. 3.3 - Conexão da estrutura.

Desta forma, cada uma destas conexões permitem 3 graus de liberdade. Aplicando-se a equação acima, n vale 8 e np_3 é igual a 12, o que resulta em 6 graus de mobilidade.

Estes graus correspondem à rotação de cada coluna em torno de seu próprio eixo longitudinal. Como não há qualquer momento de torção aplicado às colunas nestas direções, conclui-se que estes 6 graus não existem de fato. Portanto, GM é igual a zero, provando que a estrutura é isostática.

3.3 - Modelagem matemática

O objetivo da modelagem matemática é obter as equações que relacionem os esforços a serem medidos com os esforços nas colunas da estrutura (esforços efetivamente lidos).

Devido à hipótese de isostaticidade, admite-se que os esforços atuantes nas colunas se reduzam a forças nas direções axiais das mesmas.

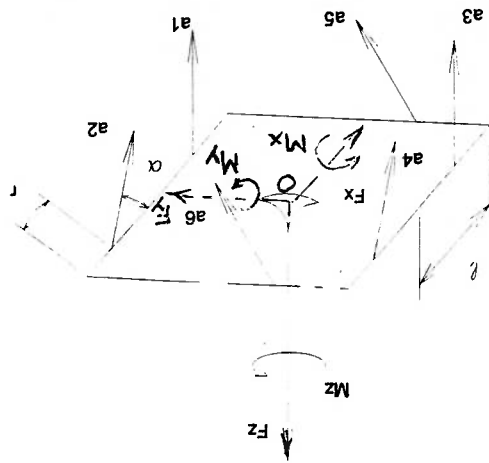


Fig. 3.4 - Diagrama de corpo livre da plataforma do dinamômetro.

Sejam $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \vec{a}_4, \vec{a}_5$ e \vec{a}_6 , as forças atuantes nas colunas 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente, e F_x, F_y, F_z , as componentes da força resultante e M_x, M_y, M_z , as componentes do momento resultante atuantes no elemento suspenso ou plataforma. As direções x, y e z são aquelas definidas por um sistema de referência Oxyz apresentado na fig. 3.4. Realizando a análise estática obtêm-se as equações (3.1) a (3.6).

$$F_x + (a_2 + a_4) \cdot \cos \alpha = 0 \quad (3.1)$$

$$F_y + (a_5 + a_6) \cdot \cos \alpha = 0 \quad (3.2)$$

$$F_z - (a_1 + a_3) - (a_2 + a_4 + a_5 + a_6) \cdot \sin \alpha = 0 \quad (3.3)$$

$$M_x + (a_3 - a_1) \cdot \frac{l}{2} + (a_4 - a_2) \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin \alpha + (a_5 + a_6) \cdot \left(\frac{l}{2} - r \right) \cdot \sin \alpha = 0 \quad (3.4)$$

$$M_y + (a_1 + a_3) \cdot \left(\frac{l}{2} - r \right) - (a_2 + a_4) \cdot \left(\frac{l}{2} - r \right) \cdot \sin \alpha + (a_5 - a_6) \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin \alpha = 0 \quad (3.5)$$

$$M_z + (a_4 - a_2) \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos \alpha + (a_5 - a_6) \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos \alpha = 0 \quad (3.6)$$

As equações (3.4) a (3.6) foram obtidas, considerando-se como pólo o

ponto O do elemento suspenso.

Portanto,

$$F_x = -(a_2 + a_4) \cdot \cos \alpha \quad (3.7)$$

$$F_y = -(a_5 + a_6) \cdot \cos \alpha \quad (3.8)$$

$$F_z = (a_1 + a_3) + (a_2 + a_4 + a_5 + a_6) \cdot \sin \alpha \quad (3.9)$$

$$M_x = (a_1 - a_3) \cdot \frac{l}{2} + (a_2 - a_4) \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin \alpha - (a_5 + a_6) \cdot \left(\frac{l}{2} - l \right) \cdot \sin \alpha \quad (3.10)$$

$$M_y = -(a_1 + a_3) \cdot \left(\frac{l}{2} - l \right) + (a_2 + a_4) \cdot \left(\frac{l}{2} - l \right) \cdot \sin \alpha - (a_5 - a_6) \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin \alpha \quad (3.11)$$

$$M_z = (a_2 - a_4) \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos \alpha - (a_5 - a_6) \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos \alpha \quad (3.12)$$

onde $[C]^{-1}$ vale

$$[C]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & -\left(\frac{1}{2} - r\right) & -\left(\frac{1}{2} - r\right) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha & \frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha & \frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha \\ -\text{cos } \alpha & 0 & 0 & \frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha & \frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha & \frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha \\ 0 & 1 & 1 & -\left(\frac{1}{2} - r\right) & -\left(\frac{1}{2} - r\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{2} - r\right) & -\left(\frac{1}{2} - r\right) & 0 \\ -\text{cos } \alpha & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha & -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha & -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha & -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha & -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \alpha \\ -\text{cos } \alpha & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \cdot \text{cos } \alpha & -\frac{1}{2} \cdot \text{cos } \alpha & -\frac{1}{2} \cdot \text{cos } \alpha \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \cdot \text{cos } \alpha & -\frac{1}{2} \cdot \text{cos } \alpha & -\frac{1}{2} \cdot \text{cos } \alpha \end{bmatrix}$$

(3.14)

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = [C]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}$$

ou

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}$$

(3.13)

3.4 - Verificação de resistência de um componente estrutural do dinamômetro.

O componente considerado crítico é o elemento de conexão descrito na seção 3.2. Ele consiste de uma haste de aço de pequeno diâmetro. Os critérios adotados para verificação da resistência foram flambagem e tração / compressão.

3.4.1 - Flambagem .

No caso da flambagem, pode-se empregar a equação de Euler (JUVINALL, 1983),

$$P_n = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l_n^2}$$

onde,

E é o módulo de elasticidade do material da haste ;

J é o momento de inércia de área da seção com relação ao eixo de flexão que apresenta

o menor valor ;

l_n é o comprimento equivalente da coluna.

Escolhendo-se aço como material, a haste como um elemento de diâmetro 1,5 mm e comprimento livre de 17 mm, considerando que a haste esteja engastada nas suas extremidades, obtêm-se

$$E = 210.000 \text{ MPa}$$

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = \frac{\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^4}{64} = 2,49 \cdot 10^{-13} \text{ m}^4$$

D = diâmetro da seção transversal da haste (0,0015 m)
 L = comprimento livre da haste (0,017 m)

$$I_n = 0,5 \cdot L = 0,0085 \text{ m}$$

portanto, $P_n = 7,14 \text{ kN}$

A carga axial de 7,14 kN é muito superior à força que se espera atuante em cada coluna, que é da ordem de 93 N. Deste modo, a haste pode ser considerada resistente à flambagem.

3.3.2 - Tração / Compressão.

No caso de tração / compressão, admitindo as mesmas dimensões anteriormente mencionadas, obtem-se

$$\sigma_t = \frac{P}{S} \Rightarrow \sigma_t = \frac{93}{\frac{\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 52,63 \text{ MPa}$$

P = carga de tração / compressão aplicada à haste (93 N)
 S = área da seção transversal da haste

O valor calculado é inferior à tensão de escoamento do material que é da ordem de 290 MPa (JUVINALL; 1983).

4 - ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA MATRIZ CARACTERÍSTICA

TOTAL DO TRANSDUTOR

4.1 - Introdução

Neste capítulo são descritos os sistemas empregados na bancada experimental, os procedimentos de calibração do transdutor e os ensaios realizados, tendo em vista a determinação das matrizes características do transdutor.

4.2 - Descrição dos sistemas empregados na bancada experimental

A seguir apresentaremos o esquema da instalação da experiência, onde a bancada de ensaio divide-se em 2 sistemas, (ver fig. 4.1) :

a) MECÂNICO :

Onde temos um sistema de aplicação de força e momento, composto de um carregamento de tração, composto por um fuso manual, mais uma estrutura, além de elos de arame, (ver fig. 4.2).

b) MEDIÇÃO :

Onde temos um sistema de calibração estática do dinamômetro, (ver fig. 4.3), composto de ,

- uma célula de carga calibrada, para aferição da força aplicada pelo sistema anterior,
- um transdutor multicomponente, que é o dinamômetro de seis anéis,

• um registrador, sendo um aparelho da marca HEWLETT PACKARD, modelo 7090A, de 3 canais, com memória. e opção de funcionamento em modo X-t e X-Y. Com este aparelho podemos plotar todas as curvas características dos anéis, tanto na calibração, quanto no carregamento de força e /ou momento; e, simultaneamente, podemos controlar os sinais de entrada, da célula de carga e do anel do transdutor em monitoração. As especificações deste aparelho são encontradas no apêndice B.

• uma unidade de chaveamento e balanceamento, sendo um aparelho da marca BALDWIN LIMA HAMILTON (B L H), modelo 225, ligado ao dinamômetro, de modo que permite a conexão de todos os seis anéis do transdutor, com o nosso amplificador; este modelo possui 10 canais; o que vai nos possibilitar fazer apenas um balanceamento individuais para todos os anéis, e obter as medições das variações de voltagem, na aplicação de forças para cada anel, diretamente no osciloscópio; assim, esta unidade permite a seleção do anel do transdutor que vai transmitir o sinal; ou seja, é um sinal lido de cada vez. As especificações deste aparelho podem ser vistas no apêndice B,

• um amplificador, sendo um aparelho da marca HEWLETT PACKARD modelo 311 A, que amplifica ou atenua o sinal de saída da ponte de Wheatstone e ao mesmo tempo, fornece a tensão de alimentação para a própria ponte. As especificações deste aparelho podem ser vistas no Apêndice B,

• um osciloscópio, que é um elemento de apresentação de dados, digital, da marca GOULD, série 400 de 2 canais, com recursos de memória de tela e cursor para leitura dos canais. As especificações deste aparelho podem ser encontradas no Apêndice B,

Fig. 4.3 - Sistema de Medição

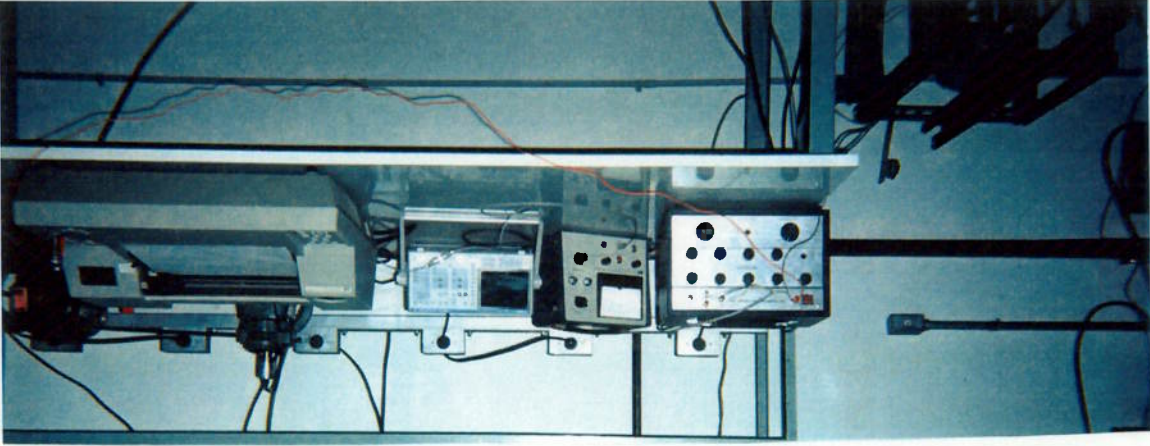


Fig. 4.2 - Sistema Mecânico

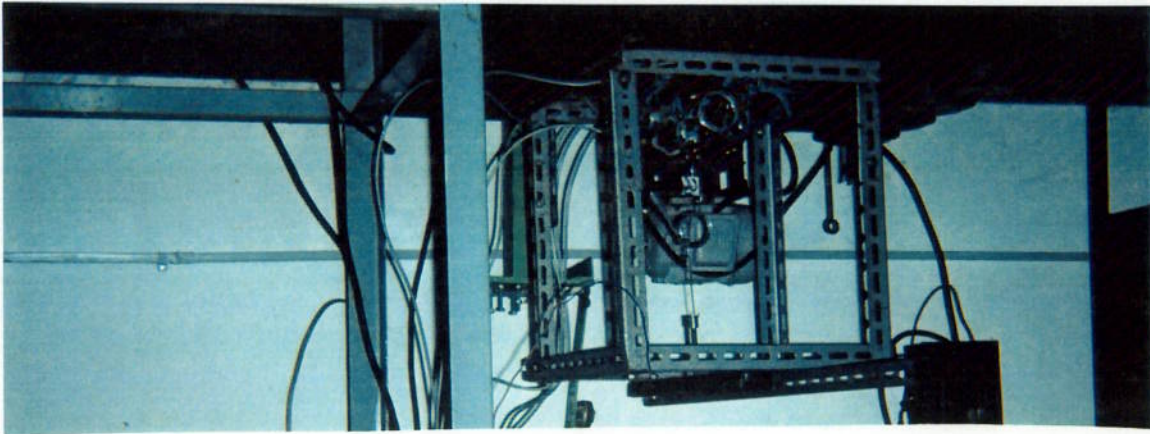
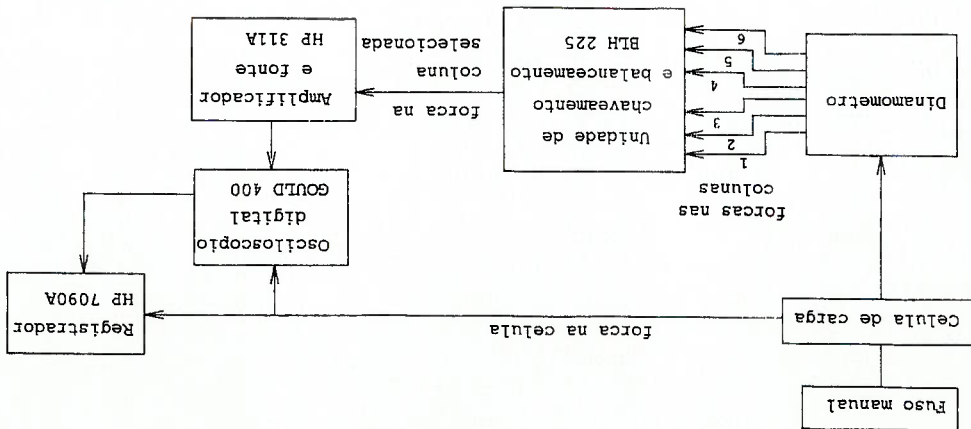


Fig. 4.1 - Bancada de ensaios



4.3 - Calibrações preliminares da célula de carga e dos seis anéis do transdutor

4.3.1 - Calibração da célula de carga

Ver o Anexo A, onde descrevemos um procedimento que utiliza massas calibradas.

4.3.2 - Calibração dos seis anéis do transdutor desmontados do dinamômetro.

Ver o Anexo B, onde descrevemos um procedimento que utiliza a célula de carga calibrada. É importante destacar que os 6 anéis foram calibrados empregando a célula de carga calibrada, segundo o sub-item anterior.

4.4 - Calibração do transdutor

4.4.1 - Descrição genérica dos ensaios realizados

No caso das forças, tivemos no total, 3 solicitações somente por forças, aplicadas cada uma, nas direções x , y e z , respectivamente, cujo valor em módulo foi 74,7 N correspondente a um sinal do anel de força de 10 mV.

No caso dos momentos tivemos no total, 3 solicitações, por forças, gerando momentos (M_x , M_y e M_z). Tivemos que descontar a leitura da força, para obtermos o momento puro, utilizando o respectivo sinal obtido da força no primeiro caso, o que podemos comprovar na matriz experimental (forças de 74,7 N).

No caso de forças e momentos tivemos no total, 6 solicitações, onde 3 delas são forças cujas linhas de ação passam próximas da origem dos eixos, e as outras 3, são forças cujas linhas de ação passam longe da origem dos eixos.

4.4.2 - Descrição completa do procedimento experimental de um ensaio genérico.

Em todos os casos acima enunciados, o procedimento de determinação das curvas experimentais características de cada anel do transdutor, sob tracionamento pelo anel de força numa determinada posição de carga, é igual para todos os casos.

O procedimento de obtenção das curvas experimentais de cada dos 6 anéis do transdutor de força através de um carregamento de tração para uma posição determinada de carga P com origem em P1 do anel de força, é sempre obtido assim :

* Fixa-se a trave do suporte num local desejado no suporte.

* Posiciona-se o fuso manual numa posição determinada em relação à origem eixos O x y z da plataforma do transdutor de força.

* Liga-se através do anel de força, a extremidade inferior do fuso manual referente a um arame de ligação com o outro correspondente do anel de força ; assim determinando a posição de carga P do transdutor.

* Liga-se a outra extremidade do anel de força, o outro arame de ligação, com o gancho da plataforma do transdutor ; assim determinando a posição de origem de carga P1 do transdutor.

* Liga-se o anel de força, antes calibrado, à fonte de alimentação de 9 V, e daí conectamos com uma das entradas do registrador HP 7090 A, onde vamos a estabelecer que a carga aplicada ao transdutor não exceda 12 mV, porque adotaremos como leitura padrão para todos os anéis do transdutor um sinal de 10 mV, correspondente aproximadamente a uma carga de 74,7 N no transdutor.

- * Ligar-se todos os anéis do transdutor às suas correspondentes entradas na unidade de balanceamento e chaveamento BLH 225, ou seja, cada anel com a sua respectiva entrada numerada na unidade.
- * Balanceiam-se todos os anéis do transdutor novamente, selecionando cada um deles pelo seletor da unidade e usando o amplificador HP 311A para verificar o equilíbrio na ponte deles, pela aplicação de uma pequena carga no anel de força.
- * O Amplificador HP 311A ligado à unidade de balanceamento e chaveamento BLH 225, permite aumentar consideravelmente o sinal vindo de cada anel do transdutor, sob uma determinada experiência de carregamento pelo anel de força, numa certa posição do fuso manual; através de suas múltiplas atenuações (x2, x5, x10, x20, x50, x100 e x200) possíveis.
- * Então o amplificador ligou-se ao registrador HP 7090A, onde plotaremos para cada anel do transdutor a sua curva característica experimental, ou seja o seu sinal de resposta a uma experiência de carregamento, pelo anel de força numa certa posição do fuso manual, que não ultrapasse 12mV no anel de força, pois a leitura adotada para todos os cálculos de determinação da matriz experimental característica do transdutor, ou seja padrão, é de 10 mV, correspondente a uma carga de 74,7 N do anel de força, de tração no transdutor de força.
- * A seguir temos diversas posições de carregamento efetuados pelo anel de força, por meio do giro do fuso manual no sentido anti-horário :

Fig. 4.5 - Dinamômetro, sistema mecânico e célula de carga (carga no eixo Ox).

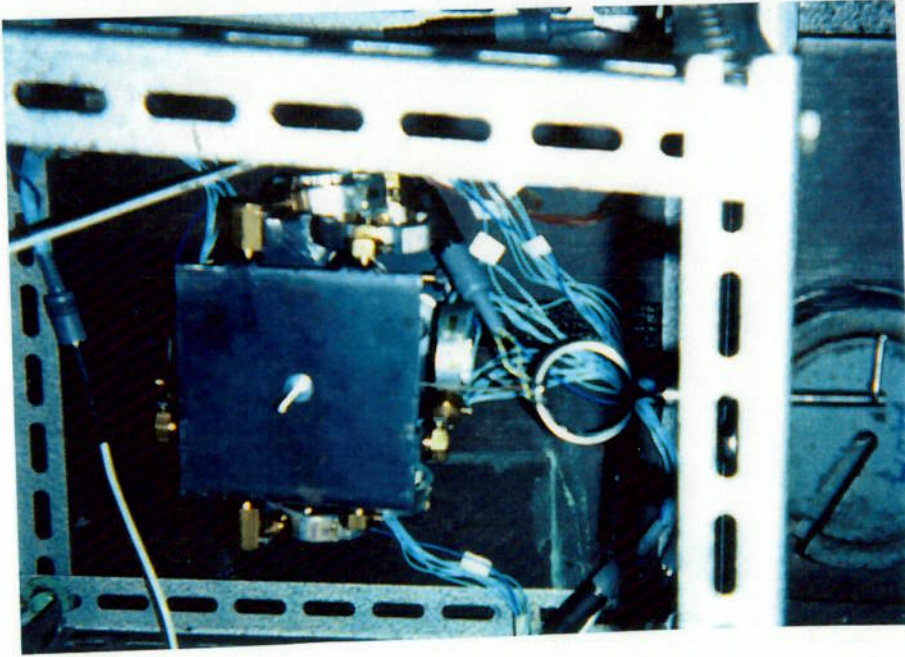


Fig. 4.4 - Dinamômetro, sistema mecânico e célula de carga. (carga no eixo Oz)

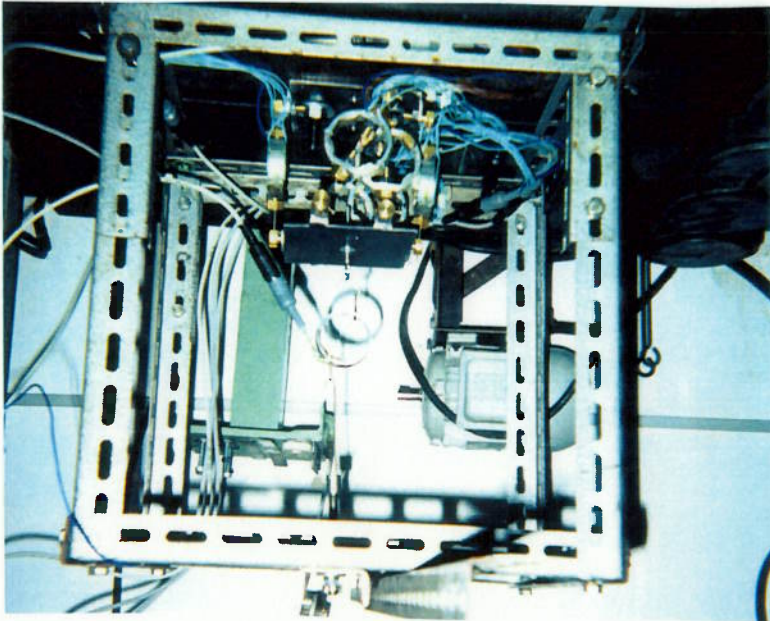


Fig. 4.7 - Dinamômetro, sistema mecânico e célula de carga (carga no eixo Oy) na lateral.

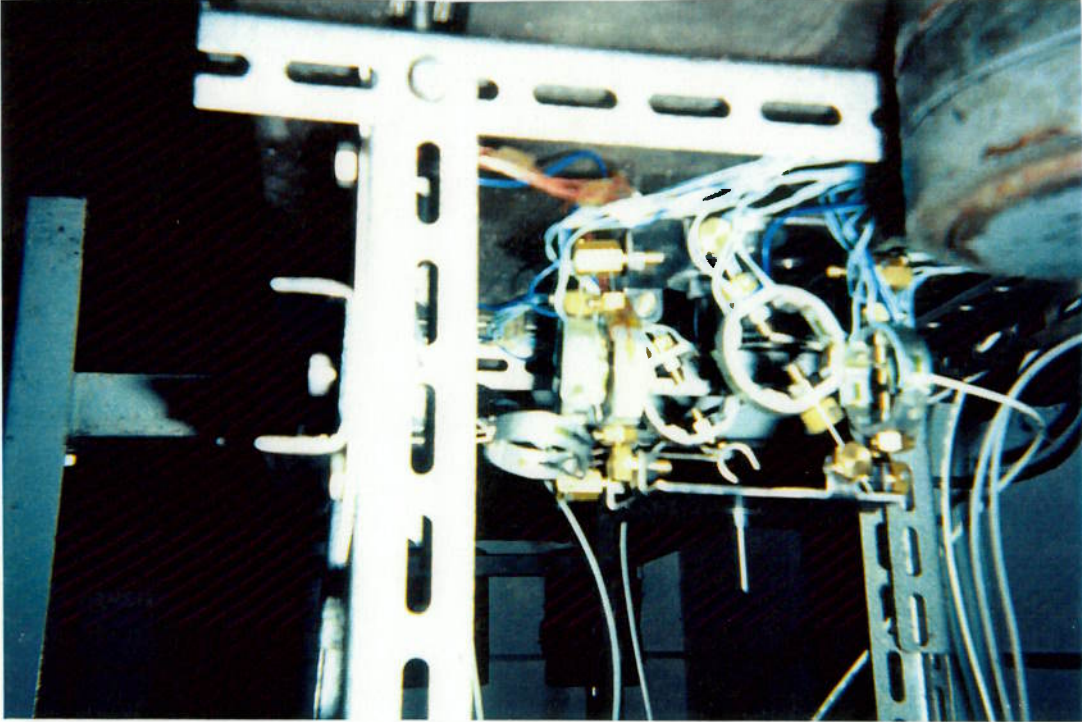
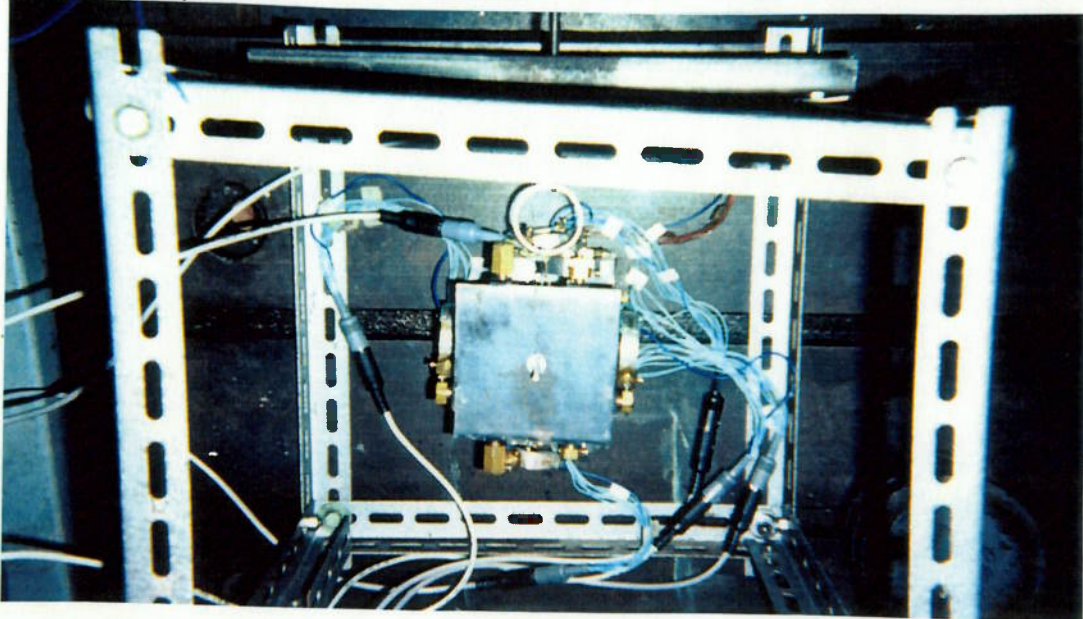


Fig. 4.6 - Dinamômetro, sistema mecânico e célula de carga (carga no eixo Oy) de cima.



* O carregamento no dinamômetro é efetuado girando-se manualmente o fuso de forma contínua, de modo a variar a força aplicada pela célula de carga calibrada do dinamômetro, até atingir a leitura adotada de 10 mV (74,7 N), que é a nossa carga padrão, observar o esquema completo na fig. 4.8.

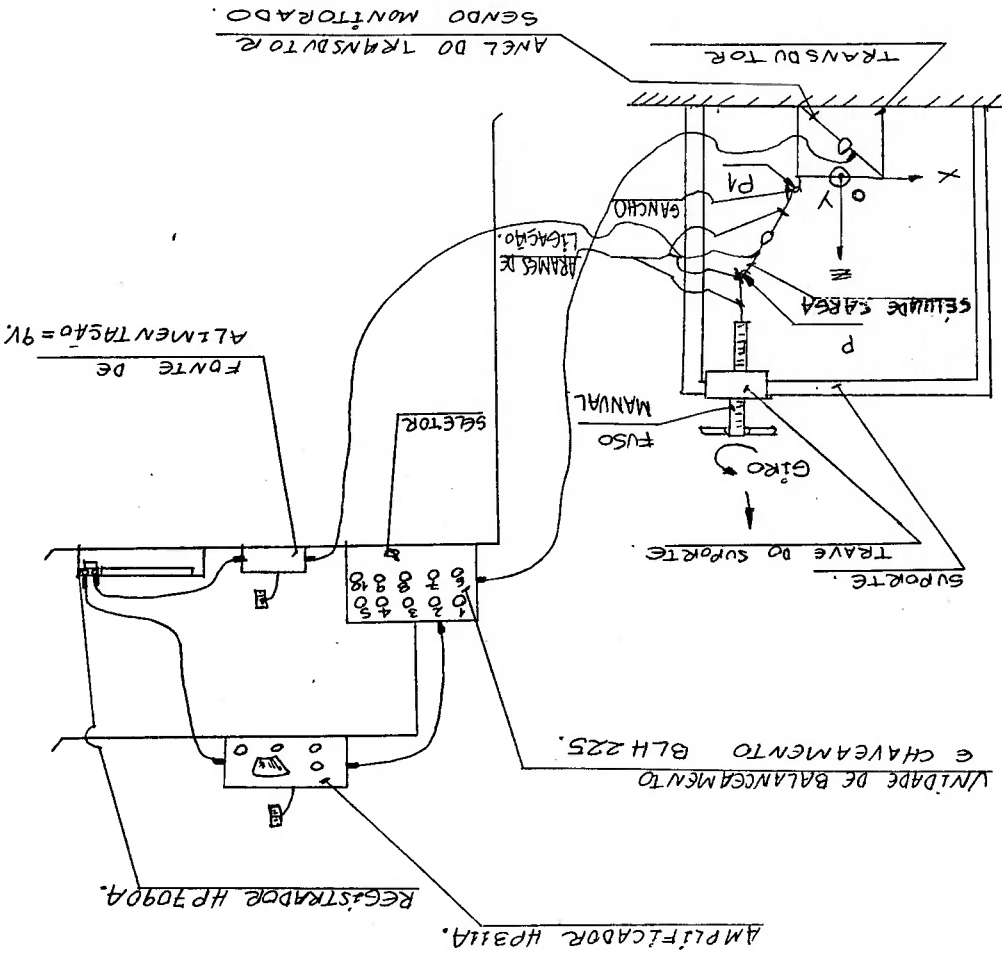


Fig 4.8 - Esquema de carregamento do dinamômetro pela célula de carga para obtenção das curvas experimentais de cada anel em uma determinada posição de carga no ponto P com origem em P1.

A seguir apresentaremos os resultados experimentais obtidos pelo ensaio

de forças e de momentos no transdutor e representados pelas leituras dos seus anéis, nas seguintes posições do fuso manual P e do anel de força P1, em relação à origem O x y z na plataforma do transdutor de força, (ver as figs. 4.9 a 4.11).

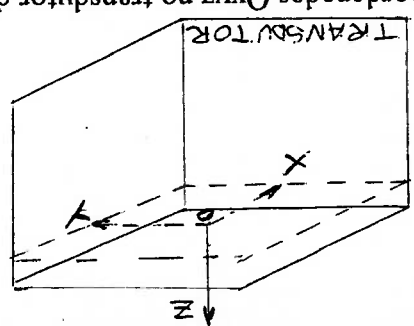


Fig. 4.9 - Sistema de coordenadas Oxyz no transdutor de força (Origem para P e P1).

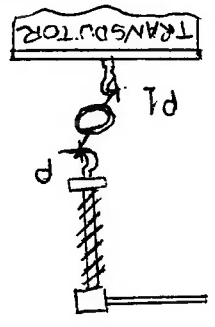


Fig. 4.10 - Posição de P e de P1 em relação ao transdutor para um carregamento.

Representação da direção e do sentido do vetor \vec{F} (F_{vet}) : $F_{vd} = \vec{F} = \|\vec{F}\| = \frac{\|\vec{P} - \vec{P1}\|}{\|\vec{P} - \vec{P1}\|}$

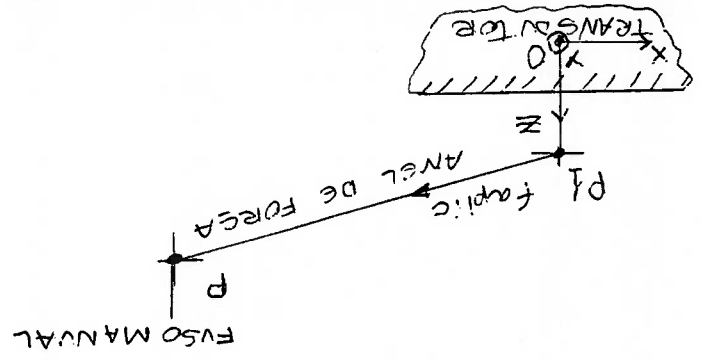


Fig. 4.11 - Força aplicada no dinamômetro pela célula de carga.

A sensibilidade média dos anéis do dinamômetro é igual a $\frac{10mV}{74,7N}$.

A nomenclatura vetorial adotada é, o ponto P , é igual ao P (m) da tabela 4.1, é o ponto de fixação da célula de carga à estrutura, de forma externa, e que é definido por :

- p (1) é a coordenada x do ponto externo P de fixação da célula de carga à estrutura
- p (2) é a coordenada y do ponto externo P de fixação da célula de carga à estrutura
- p (3) é a coordenada z do ponto externo P de fixação da célula de carga à estrutura,

e o ponto P_1 , é igual ao P_1 (m) da tabela 4.1, é o ponto de fixação da célula de carga ao transdutor ou dinamômetro, e que é definido por :

- p_1 (1) é a coordenada x do ponto P_1 de fixação da célula de carga ao transdutor
 - p_1 (2) é a coordenada y do ponto P_1 de fixação da célula de carga ao transdutor
 - p_1 (3) é a coordenada z do ponto P_1 de fixação da célula de carga ao transdutor,
- seja O a origem do sistema de eixos xyz , onde $x = y = z = 0$ (m), portanto,

$$\cdot (P - O) = p(1) \bar{i} + p(2) \bar{j} + p(3) \bar{k}, e$$

$$\cdot (P_1 - O) = p_1(1) \bar{i} + p_1(2) \bar{j} + p_1(3) \bar{k}, \text{ logo}$$

$$\cdot (P - P_1) = (P - O) - (P_1 - O), \text{ então}$$

• **versor** = $(P - P_1) / \text{módulo}(P - P_1)$, onde no MATLAB é `módulo(P-P1) = norm(P-P1)`

e `faplic = Anel C, 7,60 N/mV`, na célula de carga onde aplicaremos `74,7 N`, (Anel C), logo

$$\cdot \text{fvet} = \text{faplic} \cdot \text{versor}.$$

No caso de momentos, teremos que :

• $\text{mvet} = (P_1 - O) \times \text{fvet}$, onde no MATLAB o produto vetorial é : `mvet = cross (P1,fvet)`.

• **fvet** = vetor da força aplicada no transdutor numa direção e sentido qualquer

• **mvet** = vetor do momento aplicado no transdutor numa direção e sentido qualquer.

Para o cálculo de **fvet** e de **mvet** e dos seus respectivos módulos, utilizaremos os

programas de MATLAB no **Apêndice I**, denominados, `FORVET.m` e para o cálculo dos

coeficientes da matriz `[C]tot`, o programa `DINAMI.m` ou `MATRIZ2.m`.

4.4.3 - Descrição específica dos ensaios realizados.

A seguir apresentamos para os ensaios realizados, a descrição específica das posições de carga, com os seus respectivos resultados convertidos em forças, nas seguintes tabelas :

Tabela 4.1 - Ensaios de Calibração do transdutor com força e momento individuais e genéricos .

Ensaio	P1(m)	P (m)
1	(0 ; 0 ; 0)	qualquer pto. do eixo x (y=0 , z=0) ; Fx
2	(0 ; 0 ; 0)	qualquer pto. do eixo z (x=0 , y=0) ; Fz
3	(0 ; 0 ; 0)	qualquer pto. do eixo y (x=0 , z=0) ; Fy
4	(0 ; -0,07 ; 0)	qualquer pto. do eixo y = -0,07, paralelo ao eixo z, com z>0.
5	(0,07 ; 0 ; 0)	qualquer pto. do eixo x = 0,07 , paralelo ao eixo z, com z>0.
6	(0,05 ; -0,05 ; 0)	qualquer pto. do eixo que passe por P1 e é paralelo ao eixo x
7	(0,05 ; -0,05 ; 0,04)	(0,035 ; 0,03 ; 0,24) ; genéricos .
8	(-0,05 ; -0,05 ; 0,04)	(0,035 ; 0,03 ; 0,259) ;
9	(0 ; 0 ; 0,04)	(0,105 ; 0,1 ; 0,255) ;
10	(0 ; 0 ; 0,04)	(-0,065 ; 0,1 ; 0,275) ;
11	(0 ; 0 ; 0,04)	(-0,055 ; -0,115 ; 0,27) ;
12	(0 ; 0 ; 0,04)	(0,11 ; -0,105 ; 0,25) ;

Cada ensaio, de 1 a 12, corresponde a uma leitura média em cada um dos seis anéis, com a sua respectiva atenuação, num ponto e numa direção caracterizados na tabela acima, para um carregamento de tração no transdutor de força, que no anel de força registra 10 mV, o que é correspondente a 74,7 N, e para todos os ensaios acima segue a direção e o sentido de (P - P1) .

	a_1 (N)	a_2 (N)	a_3 (N)	a_4 (N)	a_5 (N)	a_6 (N)
1	129,8	-132,6	13,7	-24,2	-66,3	63,1
2	62,6	-19,9	57,8	24,4	-110,6	-45,5
3	51,8	-14,0	19,4	13,3	-17,3	17,5
4	6,9	-9,7	47,5	15,6	-9,0	15,0
5	16,0	19,7	51,6	-18,5	25,5	-25,3
6	67,8	-76,4	58,4	-67,9	-61,6	-57,9
7	-10,3	25,5	111,1	-9,93	-15,6	-34,0
8	112,4	-95,3	38,6	44,4	-109,8	68,4
9	126,0	-79,5	47,7	18,2	-90,5	36,0
10	39,6	9,4	49,5	24,9	-38,3	-16,8
11	1,0	29,1	-11,9	3,3	52,9	19,9
12	89,1	-63,6	-22,7	-1,3	-1,7	74,1

Tabela 4.3 - Valores das forças lidos nos seis anéis do transdutor.

	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_x (N.m)	M_y (N.m)	M_z (N.m)
1	74,7	0	0	0	0	0
2	0	74,7	0	0	0	0
3	0	0	74,7	0	0	0
4	0	0	74,7	-5,23	0	0
5	0	0	74,7	0	-5,23	0
6	74,7	0	0	0	0	3,74
7	-5,2	27,7	69,2	-4,57	-3,67	1,12
8	25,6	24,1	65,9	-4,26	4,32	0,08
9	30,3	28,8	61,9	-1,15	1,21	0
10	-18,4	28,4	66,6	-1,13	-0,74	0
11	-15,6	-32,7	65,3	1,31	-0,63	0
12	31,7	-30,3	60,5	1,21	1,27	0

Tabela 4.2 - Carregamentos aplicados ao dinamômetro.

4.4.4 - Obtenção das matrizes características experimentais estáticas do dinamômetro

A obtenção da matriz característica experimental total do transdutor, obedece a duas etapas sequencialmente bem definidas, a

- primeira etapa, consiste na determinação da matriz característica experimental parcial, onde utilizaram-se os resultados dos seis primeiros ensaios registrados na **tab.4.1**, e a segunda etapa, consiste na determinação da matriz característica experimental total, juntando-se aos resultados dos seis primeiros ensaios os outros seis resultados restantes seis ensaios registrados na **tab.4.1**, resolvendo este sistema final de 36 incógnitas com 72 equações pelo método dos mínimos quadrados.

Os cálculos foram obtidos através das experiências descritas em **4.4.3**, onde fizemos as leituras e medimos os esforços aplicados; então determinaremos primeiramente os coeficientes da matriz experimental, parcial, que foi denominada de [coefexp] no MATLAB ou $inv[C]_{exp}$, através da sua inversa denominada $[C]_{exp}$.

Nesta primeira etapa vamos trabalhar com os primeiros 6 ensaios da **tab. 4.1** daquele sub-item. Nos resultados, onde existe a aplicação pura e simples de esforços (F_x, F_y, F_z), orientados segundo a direção de cada um dos eixos principais x, y e z , teremos os cálculos a determinação direta dos respectivos coeficientes das matrizes características experimentais

Antes dos cálculos das matrizes, convertemos todas as leituras médias obtidas em Volts transformando na atenuação ($x1$), para Newtons usando as sensibilidades dos anéis matriz [sensib], obtidas no **Anexo B**; usando os programas do MATLAB, denominados de MATRIZ2.m, FORVET.m e DINAMI.m.

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ a_{41} \\ a_{51} \\ a_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} M \\ F \end{bmatrix}_{Fx \neq 0}$ = matriz de esforços resultantes nulos, apenas $F_x \neq 0$

i = anel do transdutor (para a leitura da força de determinado anel); i varia de 1 a 6
j = ensaio de carga da tab. 4.1 (para o respectivo ensaio); j varia de 1 a 12

onde $[A] = \{ \text{vetor matriz} \}$ de leituras de forças nos anéis sob apenas um carregamento, (neste caso é o ensaio 1 na tab. 4.1), pois $[A] = [a_{ij}]$; sendo,

$$[a]_{Fx \neq 0} = [C]_{exp} \cdot \begin{bmatrix} M \\ F \end{bmatrix}_{Fx \neq 0}, \quad (4.1)$$

$$[C]_{exp} = \text{inv}[coefexp]^{-1},$$

Como resultado obtemos um vetor coluna, que possibilita calcular a primeira coluna de coeficientes da matriz $[C]_{exp}$, que é a matriz inversa da matriz experimental $[coefexp]$ do nosso transdutor, ou seja de c_{11} a c_{61} . Assim,

• Carregamento com a célula de carga escolhendo apenas $F_x \neq 0$:

que,

Então vamos determinar a primeira matriz característica experimental, assim temos

:
:
:
:
:
:

$$a_{32} = c_{31} \cdot 0 + c_{32} \cdot F_y + c_{33} \cdot 0 + c_{34} \cdot 0 + c_{35} \cdot 0 + c_{36} \cdot 0$$

$$a_{22} = c_{21} \cdot 0 + c_{22} \cdot F_y + c_{23} \cdot 0 + c_{24} \cdot 0 + c_{25} \cdot 0 + c_{26} \cdot 0$$

$$a_{12} = c_{11} \cdot 0 + c_{12} \cdot F_y + c_{13} \cdot 0 + c_{14} \cdot 0 + c_{15} \cdot 0 + c_{16} \cdot 0$$

portanto,

$$[a]_{F_y \neq 0} [C]_{exp} = [C]_{exp} \begin{bmatrix} F \\ M \\ F \end{bmatrix}_{F_y \neq 0}$$

(4.2)

Idem ao caso anterior, obtemos a segunda coluna de [C] exp, ensaio 3 da tab.4.1 :

Carregamento com a célula de carga escolhendo apenas $F_y \neq 0$:

$$c_{11} = a_{11} / F_x; c_{21} = a_{21} / F_x; c_{31} = a_{31} / F_x; c_{41} = a_{41} / F_x; c_{51} = a_{51} / F_x; c_{61} = a_{61} / F_x$$

logo,

$$a_{61} = c_{61} \cdot F_x + c_{62} \cdot 0 + c_{63} \cdot 0 + c_{64} \cdot 0 + c_{65} \cdot 0 + c_{66} \cdot 0$$

$$a_{51} = c_{51} \cdot F_x + c_{52} \cdot 0 + c_{53} \cdot 0 + c_{54} \cdot 0 + c_{55} \cdot 0 + c_{56} \cdot 0$$

$$a_{41} = c_{41} \cdot F_x + c_{42} \cdot 0 + c_{43} \cdot 0 + c_{44} \cdot 0 + c_{45} \cdot 0 + c_{46} \cdot 0$$

$$a_{31} = c_{31} \cdot F_x + c_{32} \cdot 0 + c_{33} \cdot 0 + c_{34} \cdot 0 + c_{35} \cdot 0 + c_{36} \cdot 0$$

$$a_{21} = c_{21} \cdot F_x + c_{22} \cdot 0 + c_{23} \cdot 0 + c_{24} \cdot 0 + c_{25} \cdot 0 + c_{26} \cdot 0$$

$$a_{11} = c_{11} \cdot F_x + c_{12} \cdot 0 + c_{13} \cdot 0 + c_{14} \cdot 0 + c_{15} \cdot 0 + c_{16} \cdot 0$$

portanto,

então,

$$(4.4) \quad [a]_{Mx \neq 0} = [C]_{exp} \cdot \begin{bmatrix} M \\ F \end{bmatrix}_{MxFz \neq 0}$$

Obteremos a quarta coluna de $[C]_{exp}$, ensaio 4 da tab. 4.1 :

• Carregamento com a célula de carga escolhendo apenas $Mx \neq 0$ aplicando $Fz \neq 0$:

$$c_{13} = a_{13} / Fz; c_{23} = a_{23} / Fz; c_{33} = a_{33} / Fz; c_{43} = a_{43} / Fz; c_{53} = a_{53} / Fz; c_{63} = a_{63} / Fz$$

logo,

$$(4.3) \quad [a]_{Fz \neq 0} = [C]_{exp} \cdot \begin{bmatrix} M \\ F \end{bmatrix}_{Fz \neq 0}$$

Idem ao caso anterior, obtemos a terceira coluna de $[C]_{exp}$, ensaio 2 da tab. 4.1 :

• Carregamento com a célula de carga escolhendo apenas $Fz \neq 0$:

$$c_{12} = a_{12} / Fy; c_{22} = a_{22} / Fy; c_{32} = a_{32} / Fy; c_{42} = a_{42} / Fy; c_{52} = a_{52} / Fy; c_{62} = a_{62} / Fy$$

logo,

$$a_{62} = c_{61} \cdot 0 + c_{62} \cdot Fy + c_{63} \cdot 0 + c_{64} \cdot 0 + c_{65} \cdot 0 + c_{66} \cdot 0$$

$$\begin{aligned}
 a_{14} &= c_{13} \cdot F_z + c_{14} \cdot M_x \\
 a_{24} &= c_{23} \cdot F_z + c_{24} \cdot M_x \\
 a_{34} &= c_{33} \cdot F_z + c_{34} \cdot M_x \\
 a_{44} &= c_{43} \cdot F_z + c_{44} \cdot M_x \\
 a_{54} &= c_{53} \cdot F_z + c_{54} \cdot M_x \\
 a_{64} &= c_{63} \cdot F_z + c_{64} \cdot M_x
 \end{aligned}$$

logo,

$$\begin{aligned}
 a_{14} &= c_{11} \cdot 0 + c_{12} \cdot 0 + c_{13} \cdot F_z + c_{14} \cdot M_x + c_{15} \cdot 0 + c_{16} \cdot 0 \\
 a_{24} &= c_{21} \cdot 0 + c_{22} \cdot 0 + c_{23} \cdot F_z + c_{24} \cdot M_x + c_{25} \cdot 0 + c_{26} \cdot 0 \\
 a_{34} &= c_{31} \cdot 0 + c_{32} \cdot 0 + c_{33} \cdot F_z + c_{34} \cdot M_x + c_{35} \cdot 0 + c_{36} \cdot 0 \\
 a_{44} &= c_{41} \cdot 0 + c_{42} \cdot 0 + c_{43} \cdot F_z + c_{44} \cdot M_x + c_{45} \cdot 0 + c_{46} \cdot 0 \\
 a_{54} &= c_{51} \cdot 0 + c_{52} \cdot 0 + c_{53} \cdot F_z + c_{54} \cdot M_x + c_{55} \cdot 0 + c_{56} \cdot 0 \\
 a_{64} &= c_{61} \cdot 0 + c_{62} \cdot 0 + c_{63} \cdot F_z + c_{64} \cdot M_x + c_{65} \cdot 0 + c_{66} \cdot 0
 \end{aligned}$$

portanto,

$$\begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \\ a_{44} \\ a_{54} \\ a_{64} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_z \\ M_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Os coeficientes $c_{13}, c_{23}, \dots, c_{63}$ já foram calculados no caso anterior (apenas $F_z \neq 0$), e portanto, os coeficientes $c_{14}, c_{24}, \dots, c_{64}$ podem ser calculados a partir das equações,

$$\begin{aligned} c_{14} &= (a_{14} - c_{13} \cdot F_z) / M_x \\ c_{24} &= (a_{24} - c_{23} \cdot F_z) / M_x \\ c_{34} &= (a_{34} - c_{33} \cdot F_z) / M_x \\ c_{44} &= (a_{44} - c_{43} \cdot F_z) / M_x \\ c_{54} &= (a_{54} - c_{53} \cdot F_z) / M_x \\ c_{64} &= (a_{64} - c_{63} \cdot F_z) / M_x \end{aligned}$$

Carregamento com a célula de carga escolhendo apenas $M_y \neq 0$ aplicando $F_z \neq 0$:

Como no caso anterior obtemos a quinta coluna de [C] exp, ensaio 5 da tab. 4.1 :

$$[a]_{M_y \neq 0} = [C]_{\text{exp}} \cdot \begin{bmatrix} F \\ M \\ M \end{bmatrix}_{M_y F_z \neq 0} \quad (4.5)$$

então,

$$\begin{bmatrix} a_{15} \\ a_{25} \\ a_{35} \\ a_{45} \\ a_{55} \\ a_{65} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_z \\ M_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$c_{65} = (a_{65} - c_{63} \cdot F_z) / M_y$$

$$c_{55} = (a_{55} - c_{53} \cdot F_z) / M_y$$

$$c_{45} = (a_{45} - c_{43} \cdot F_z) / M_y$$

$$c_{35} = (a_{35} - c_{33} \cdot F_z) / M_y$$

$$c_{25} = (a_{25} - c_{23} \cdot F_z) / M_y$$

$$c_{15} = (a_{15} - c_{13} \cdot F_z) / M_y$$

Pelo mesmo motivo apresentado no caso anterior, os coeficientes $c_{15}, c_{25}, \dots, c_{65}$ podem ser calculados a partir das seguintes equações,

$$a_{65} = c_{61} \cdot 0 + c_{62} \cdot 0 + c_{63} \cdot F_z + c_{64} \cdot 0 + c_{65} \cdot M_y + c_{66} \cdot 0$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$a_{25} = c_{21} \cdot 0 + c_{22} \cdot 0 + c_{23} \cdot F_z + c_{24} \cdot 0 + c_{25} \cdot M_y + c_{26} \cdot 0$$

$$a_{15} = c_{11} \cdot 0 + c_{12} \cdot 0 + c_{13} \cdot F_z + c_{14} \cdot 0 + c_{15} \cdot M_y + c_{16} \cdot 0$$

portanto,

equações,
 $F_x \neq 0$) e, portanto, os coeficientes c_{16}, \dots, c_{66} podem ser calculados a partir das seguintes
 Os coeficientes $c_{11}, c_{21}, \dots, c_{61}$ já foram obtidos no primeiro de todos os casos (apenas

$$\begin{aligned} a_{66} &= c_{61} \cdot F_x + c_{62} \cdot 0 + c_{63} \cdot 0 + c_{64} \cdot 0 + c_{65} \cdot 0 + c_{66} \cdot M_z \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ a_{26} &= c_{21} \cdot F_x + c_{22} \cdot 0 + c_{23} \cdot 0 + c_{24} \cdot 0 + c_{25} \cdot 0 + c_{26} \cdot M_z \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ a_{16} &= c_{11} \cdot F_x + c_{12} \cdot 0 + c_{13} \cdot 0 + c_{14} \cdot 0 + c_{15} \cdot 0 + c_{16} \cdot M_z \end{aligned}$$

portanto,

$$\begin{bmatrix} a_{66} \\ a_{56} \\ a_{46} \\ a_{36} \\ a_{26} \\ a_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ M_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

então,

$$[a]_{Mz \neq 0} = [C]_{exp} \cdot \begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix}_{Mz \neq 0} \quad (4.6)$$

Como no caso anterior, obtemos a sexta coluna de $[C]_{exp}$, ensaio 6 da tab. 4.1 :

Carregamento com a célula de carga escolhendo apenas $M_z \neq 0$ aplicando $F_x = 0$:

$$\begin{aligned}
c_{16} &= (a_{16} - c_{11} \cdot F_x) / M_z \\
c_{26} &= (a_{26} - c_{21} \cdot F_x) / M_z \\
c_{36} &= (a_{36} - c_{31} \cdot F_x) / M_z \\
c_{46} &= (a_{46} - c_{41} \cdot F_x) / M_z \\
c_{56} &= (a_{56} - c_{51} \cdot F_x) / M_z \\
c_{66} &= (a_{66} - c_{61} \cdot F_x) / M_z
\end{aligned}$$

A matriz $[C]^{exp}$ é aquela obtida partir da resolução de todos os casos anteriores e

depois fazendo a inversão desta matriz,

$inv[C]^{exp}$ ou $[C]^{exp^{-1}} = [coef\ exp]$ no MATLAB, que é apresentada na expressão (4.7).

$$[C]^{exp^{-1}} = \begin{bmatrix} -0.0462 & -0.4749 & 0.0546 & -0.4984 & -0.0379 & 0.0375 \\ -0.0334 & -0.0311 & 0.0406 & 0.0563 & -0.4620 & -0.4691 \\ 0.9768 & 0.9107 & 1.1710 & 0.9649 & 0.8422 & 0.9056 \\ 0.0684 & 0.0754 & -0.0766 & -0.0787 & -0.0237 & -0.0208 \\ -0.0302 & 0.0223 & -0.0310 & 0.0258 & -0.0581 & 0.0645 \\ -0.0031 & 0.0349 & 0.0043 & -0.0390 & -0.0283 & 0.0340 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde,

- [A]_{tot} é a matriz geral de todas as leituras nos 6 anéis dos 12 ensaios feitos, constantes na tabela 4.1 .
- [C]⁻¹_{tot} é a matriz característica experimental total do transdutor obtida com os 12 ensaios feitos, constantes na tabela 4.1 .
- [C]⁻¹_{tot} é a matriz inversa de [C]_{tot}, ou inv[C]_{tot} é [C]⁻¹_{tot}.
- [F]_{tot} é a matriz geral de todos os esforços aplicados no transdutor pelos 12 ensaios feitos, constantes na tabela 4.1 .

$$[F]_{tot} = [C]_{tot}^{-1} \cdot [A]_{tot} \quad \text{ou} \quad [A]_{tot} = [C]_{tot} \cdot [F]_{tot} \quad (4.8),$$

Agora iremos completar a calibração do transdutor adicionando aos seis ensaios iniciais (1 a 6) da tabela 4.1, os outros seis ensaios (7 a 12) de força e momento obtendo um sistema composto finalmente por 72 equações e 36 incógnitas, onde justamente essas 36 incógnitas representam os 36 coeficientes da nova matriz experimental característica do transdutor denominada [C]⁻¹_{tot} ([ctoj] no MATLAB) e da sua inversa de nome [C]_{tot} ([ctoi] no MATLAB); ou seja, no caso do carregamento genérico seria suficiente então resolvê-lo com trinta e seis equações e 36 incógnitas, mas acrescentaram-se as informações dos carregamentos iniciais, e daí justificaram-se as 72 equações e 36 incógnitas. Assim temos o seguinte sistema de equações,

Para obtenção da matriz característica experimental total do transdutor, tornou-se necessário ter realizado o cálculo de [C]⁻¹_{exp}, a partir dos resultados dos primeiros seis ensaios obtidos na tabela 4.1, onde tínhamos, basicamente em separado, uma força agindo na direção x, depois y e depois z; e um momento provocado por uma força cuja linha de ação não passava pela origem, agindo paralela, primeiro nas direções z, e depois x .

Portanto teremos nos 12 ensaios a equação (4.8), de forma extensa, assim,

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} & a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} & a_{29} & a_{20} & a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} & a_{39} & a_{30} & a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} & a_{49} & a_{40} & a_{41} & a_{42} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & a_{58} & a_{59} & a_{50} & a_{51} & a_{52} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} & a_{69} & a_{60} & a_{61} & a_{62} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{x1} & F_{y1} & F_{z1} & M_{x1} & M_{y1} & M_{z1} \\ F_{x2} & F_{y2} & F_{z2} & M_{x2} & M_{y2} & M_{z2} \\ F_{x3} & F_{y3} & F_{z3} & M_{x3} & M_{y3} & M_{z3} \\ F_{x4} & F_{y4} & F_{z4} & M_{x4} & M_{y4} & M_{z4} \\ F_{x5} & F_{y5} & F_{z5} & M_{x5} & M_{y5} & M_{z5} \\ F_{x6} & F_{y6} & F_{z6} & M_{x6} & M_{y6} & M_{z6} \\ F_{x7} & F_{y7} & F_{z7} & M_{x7} & M_{y7} & M_{z7} \\ F_{x8} & F_{y8} & F_{z8} & M_{x8} & M_{y8} & M_{z8} \\ F_{x9} & F_{y9} & F_{z9} & M_{x9} & M_{y9} & M_{z9} \\ F_{x10} & F_{y10} & F_{z10} & M_{x10} & M_{y10} & M_{z10} \\ F_{x11} & F_{y11} & F_{z11} & M_{x11} & M_{y11} & M_{z11} \\ F_{x12} & F_{y12} & F_{z12} & M_{x12} & M_{y12} & M_{z12} \end{bmatrix}$$

então, fazendo as respectivas multiplicações da expressão anterior, teremos o seguinte

sistema linear,

$$\begin{aligned} a_{11} &= c_{11} \cdot F_{x1} + c_{12} \cdot F_{y1} + c_{13} \cdot F_{z1} + c_{14} \cdot M_{x1} + c_{15} \cdot M_{y1} + c_{16} \cdot M_{z1} \\ a_{12} &= c_{11} \cdot F_{x2} + c_{12} \cdot F_{y2} + c_{13} \cdot F_{z2} + c_{14} \cdot M_{x2} + c_{15} \cdot M_{y2} + c_{16} \cdot M_{z2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{112} &= c_{11} \cdot F_{x12} + c_{12} \cdot F_{y12} + c_{13} \cdot F_{z12} + c_{14} \cdot M_{x12} + c_{15} \cdot M_{y12} + c_{16} \cdot M_{z12} \\ a_{21} &= c_{21} \cdot F_{x1} + c_{22} \cdot F_{y1} + c_{23} \cdot F_{z1} + c_{24} \cdot M_{x1} + c_{25} \cdot M_{y1} + c_{26} \cdot M_{z1} \end{aligned}$$

$$a_{612} = c_{61} \cdot F_{x12} + c_{62} \cdot F_{y12} + c_{63} \cdot F_{z12} + c_{64} \cdot M_{x12} + c_{65} \cdot M_{y12} + c_{66} \cdot M_{z12}$$

$$F_1 = F_{x1} \quad e \quad F_{y1} = F_{z1} = M_{x1} = M_{y1} = M_{z1} = 0$$

observamos, então, no ensaio I que,

$$\begin{aligned} da_{612} \frac{dF_{12}}{dM_{z12}} &= c_{61} \cdot \frac{dF_{x12}}{dF_{12}} + c_{62} \cdot \frac{dF_{y12}}{dF_{12}} + c_{63} \cdot \frac{dF_{z12}}{dF_{12}} + c_{64} \cdot \frac{dM_{x12}}{dF_{12}} + c_{65} \cdot \frac{dM_{y12}}{dF_{12}} + c_{66} \cdot \frac{dM_{z12}}{dF_{12}} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ da_{112} \frac{dF_{12}}{dM_{z12}} &= c_{11} \cdot \frac{dF_{x12}}{dF_{12}} + c_{12} \cdot \frac{dF_{y12}}{dF_{12}} + c_{13} \cdot \frac{dF_{z12}}{dF_{12}} + c_{14} \cdot \frac{dM_{x12}}{dF_{12}} + c_{15} \cdot \frac{dM_{y12}}{dF_{12}} + c_{16} \cdot \frac{dM_{z12}}{dF_{12}} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ da_{611} \frac{dF_1}{dM_{z1}} &= c_{61} \cdot \frac{dF_{x1}}{dF_1} + c_{62} \cdot \frac{dF_{y1}}{dF_1} + c_{63} \cdot \frac{dF_{z1}}{dF_1} + c_{64} \cdot \frac{dM_{x1}}{dF_1} + c_{65} \cdot \frac{dM_{y1}}{dF_1} + c_{66} \cdot \frac{dM_{z1}}{dF_1} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ da_{111} \frac{dF_1}{dM_{z1}} &= c_{11} \cdot \frac{dF_{x1}}{dF_1} + c_{12} \cdot \frac{dF_{y1}}{dF_1} + c_{13} \cdot \frac{dF_{z1}}{dF_1} + c_{14} \cdot \frac{dM_{x1}}{dF_1} + c_{15} \cdot \frac{dM_{y1}}{dF_1} + c_{16} \cdot \frac{dM_{z1}}{dF_1} \end{aligned}$$

Sejam $F_1, F_2, F_3, \dots, F_{12}$ os esforços aplicados no dinamômetro, respectivamente nos ensaios I a 12, então derivaremos as equações de a_{11} a a_{612} em relação a cada esforço atuante no determinado elemento, a_{11} a a_{612} da matriz de leituras total $[A]_{tot}$,

e no registro do ensaio 1 (anel 1), ver fig. 4.12,

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{da_{11}}{dF_1} \text{ ou } \frac{dF_{x1}}{dF_1} = \alpha$$

$$F_{x1} = \alpha \cdot F_1 \text{ e } \alpha = 1$$

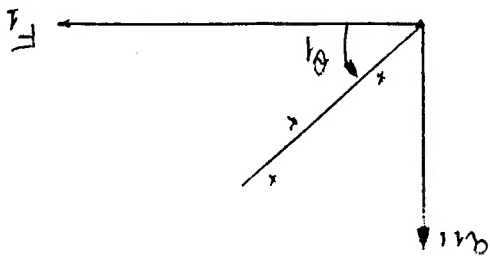


Fig. 4.12 - Registro das leituras no ensaio 1 do anel 1 no dinamômetro.

ou seja a_{11} é função de,

$$a_{11} = F_1 (F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}), \text{ então,}$$

$$\frac{da_{11}}{dF_1} = \frac{\partial F_1}{\partial F_1} \cdot dF_1 \Leftrightarrow \frac{da_{11}}{dF_1} = \frac{\partial F_1}{\partial F_1} = c_{11} \cdot \frac{dF_{x1}}{dF_1} = c_{11}, \text{ da mesma forma, que}$$

$$\frac{da_{21}}{dF_1} = \frac{\partial F_2}{\partial F_1} = c_{21} \cdot \frac{dF_{x1}}{dF_1} = c_{21}$$

$$\frac{da_{61}}{dF_1} = \frac{\partial F_6}{\partial F_1} = c_{61} \cdot \frac{dF_{x1}}{dF_1} = c_{61}$$

$$\frac{da_{12}}{dF_2} = \frac{\partial F_1}{\partial F_2} = c_{12} \cdot \frac{dF_2}{dF_2} = c_{12}$$

$$\frac{da_{22}}{dF_2} = \frac{\partial F_2}{\partial F_2} = c_{22} \cdot \frac{dF_2}{dF_2} = c_{22}$$

$$\frac{da_{62}}{dF_2} = \frac{\partial F_6}{\partial F_2} = c_{62} \cdot \frac{dF_2}{dF_2} = c_{62}$$

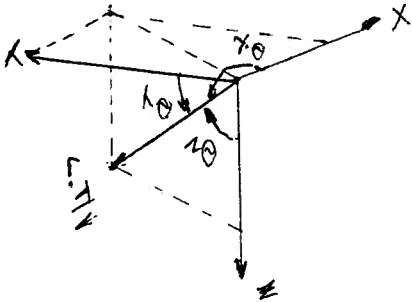
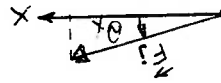


Fig. 4.13 - Projção de \vec{F} no eixo Ox

Fig. 4.14 - Projção de \vec{F} nos eixos Ox, Oy e Oz

$$|\vec{F}_7| \cdot \cos\theta_x = F_{x7} \Rightarrow \cos\theta_x = \frac{F_{x7}}{F_7}$$

$$\frac{dF_7}{da_{17}} = \frac{\partial}{\partial F_7} (c_{11} \cdot F_{x7} + c_{12} \cdot F_{y7} + c_{13} \cdot F_{z7} + c_{14} \cdot M_{x7} + c_{15} \cdot M_{y7} + c_{16} \cdot M_{z7})$$

$$\frac{dF_7}{da_{17}} = c_{11} \cdot \frac{\partial F_{x7}}{\partial F_7} + c_{12} \cdot \frac{\partial F_{y7}}{\partial F_7} + c_{13} \cdot \frac{\partial F_{z7}}{\partial F_7} + c_{14} \cdot \frac{\partial M_{x7}}{\partial F_7} + c_{15} \cdot \frac{\partial M_{y7}}{\partial F_7} + c_{16} \cdot \frac{\partial M_{z7}}{\partial F_7}$$

onde, $\cos\theta_x = \frac{\partial F_{x7}}{\partial F_7}$; $\cos\theta_y = \frac{\partial F_{y7}}{\partial F_7}$; $\cos\theta_z = \frac{\partial F_{z7}}{\partial F_7}$,

com relação ao cálculo de \vec{F}_7 ,

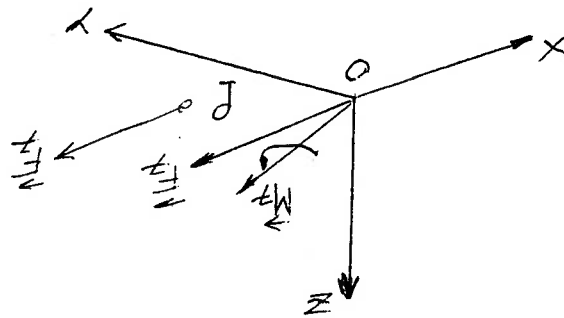


Fig. 4.15 - Aplicação de um esforço \vec{F}_7 em uma direção qualquer.

$$\vec{F}_7 = (\cos\theta_x \vec{i} + \cos\theta_y \vec{j} + \cos\theta_z \vec{k}) \cdot F_7, \text{ onde temos também,}$$

$$\vec{M}_7 = (\vec{P} - \vec{O}) \wedge \vec{F}_7, \text{ que calcula-se}$$

$$\vec{M}_7 = M_{x7} \vec{i} + M_{y7} \vec{j} + M_{z7} \vec{k} = \left[(Px\vec{i} + Py\vec{j} + Pz\vec{k}) \wedge (\cos\theta_x \vec{i} + \cos\theta_y \vec{j} + \cos\theta_z \vec{k}) \right] \cdot F_7$$

$$\vec{M}_7 = \left[\cos\theta_{px} \vec{i} + \cos\theta_{py} \vec{j} + \cos\theta_{pz} \vec{k} \right] \cdot \left\| (\vec{P} - \vec{O}) \right\| \cdot F_7$$

$$M_7 = \left\| (\vec{P} - \vec{O}) \right\| \cdot F_7 \cdot \left[\left(\cos\theta_{py} \cdot \cos\theta_{pz} - \cos\theta_{pz} \cdot \cos\theta_{py} \right) \vec{i} + \left(\cos\theta_{px} \cdot \cos\theta_{pz} - \cos\theta_{pz} \cdot \cos\theta_{px} \right) \vec{j} + \left(\cos\theta_{px} \cdot \cos\theta_{py} - \cos\theta_{py} \cdot \cos\theta_{px} \right) \vec{k} \right], \text{ portanto,}$$

logo, estendendo a derivação do sistema $\left[\frac{da_{ij}}{dF_j} \right] = [c_{ij}] \cdot \left[\frac{dF_{ij}}{dF_j} \right]$ para todos os ensaios, e depois

$$\frac{dM_{z6}}{dF_6} = b \text{ (braço do momento),}$$

$$F_6 = F_{x6} = F_{y6} = F_{z6} = M_{x6} = M_{y6} = 0 \quad \text{e que,}$$

devemos ainda observar, por exemplo no ensaio 6, o significado da derivada $\frac{dM_z}{dF}$

$$\frac{\partial M_{z7}}{\partial F_7} = \|(P-O)\| \cdot (\cos\theta_{px} \cdot \cos\theta_{py} \cdot \cos\theta_x),$$

$$\frac{\partial M_{y7}}{\partial F_7} = \|(P-O)\| \cdot (\cos\theta_{pz} \cdot \cos\theta_x - \cos\theta_{py} \cdot \cos\theta_z)$$

$$\frac{\partial M_{x7}}{\partial F_7} = \|(P-O)\| \cdot (\cos\theta_{py} \cdot \cos\theta_z - \cos\theta_{pz} \cdot \cos\theta_y)$$

temos que os coeficientes no ensaio 7 e de forma geral, dependem somente da geometria :

$$M_{z7} = \|(P-O)\| \cdot F_7 \cdot (\cos\theta_{px} \cdot \cos\theta_{py} - \cos\theta_{py} \cdot \cos\theta_x)$$

$$M_{y7} = \|(P-O)\| \cdot F_7 \cdot (\cos\theta_{pz} \cdot \cos\theta_x - \cos\theta_{py} \cdot \cos\theta_z)$$

$$M_{x7} = \|(P-O)\| \cdot F_7 \cdot (\cos\theta_{py} \cdot \cos\theta_z - \cos\theta_{pz} \cdot \cos\theta_y)$$

invertendo $[c_{ij}]$, obtivemos a matriz $[C]^{-1}$ tot ou $[ctot]$ no MATLAB, mas usamos também para resolver o sistema da equação (4.8), o **método dos mínimos quadrados** no MATLAB, ver resolução de SPIEGEL (1961).

Obteremos a matriz total $[C]_{tot}$, e invertendo, a sua correspondente,

$$[C]^{-1}_{tot} = \begin{bmatrix} -0.0193 & -0.4503 & 0.0230 & -0.5171 & -0.0362 & 0.0481 \\ 0.0055 & 0.0175 & 0.0429 & 0.0656 & -0.4566 & -0.4282 \\ 0.8713 & 0.7207 & 1.0305 & 0.8549 & 0.8285 & 0.7303 \\ 0.0617 & 0.0698 & -0.0695 & -0.0738 & -0.0228 & -0.0191 \\ -0.0275 & 0.0214 & -0.0297 & 0.0216 & -0.0545 & 0.0585 \\ -0.0032 & 0.0346 & 0.0045 & -0.0397 & -0.0280 & 0.0332 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Sendo que a matriz acima foi obtida através do cálculo com as matrizes $[A]_{tot}$ e $[F]_{tot}$, aplicando-se os programas de MATLAB : DINANI.m e MATRIZ2.m.

$$[A]_{tot} = \begin{bmatrix} 129.7761 & 62.6119 & 51.7910 & 6.9403 & 15.9701 & 67.7612 & -10.2985 \\ -132.6277 & -19.8540 & -14.0146 & -9.7080 & 19.7080 & -76.4234 & 25.5474 \\ 13.6986 & 57.8082 & 19.3836 & 47.5342 & 51.5753 & 58.4247 & 111.0959 \\ -24.2254 & 24.4366 & 13.3099 & 15.6338 & -18.4507 & -67.8873 & -9.9296 \\ -66.2903 & -110.6452 & -17.2581 & -9.0323 & 25.4839 & -61.6129 & -15.5645 \\ 63.1405 & -45.4545 & 17.5207 & 15.0413 & -25.2893 & 57.8512 & -33.9669 \end{bmatrix}$$

$$[F]_{tot} = \begin{bmatrix} 112.3881 & 126.0448 & 39.6269 & 0.9701 & 89.1045 \\ -95.3285 & -79.4891 & 9.4161 & 29.1241 & -63.6496 \\ 38.6301 & 47.7397 & 49.4521 & -11.9178 & -22.6712 \\ 44.4366 & 18.1690 & 24.8592 & 3.3099 & -1.2676 \\ -109.7581 & -90.4839 & -38.3065 & 52.9032 & -1.6935 \\ 68.4298 & 36.0331 & -16.7769 & 19.9174 & 74.1322 \end{bmatrix}$$

e a matriz dos carregamentos ou de todos os esforços aplicados no transdutor é

$$[F]_{tot} = \begin{bmatrix} 74.7000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 74.7000 & 74.7000 & 0 & 74.7000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 74.7000 & 74.7000 & 74.7000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 74.7000 & 74.7000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A nomenclatura do sistema representa,

$$\begin{bmatrix} 25.5858 & 30.2457 & -18.4246 & -15.6238 & 31.6919 & 25.5858 & 30.2457 & -18.4246 & -15.6238 & 31.6919 \\ 24.0807 & 28.8054 & 28.3455 & -32.6680 & -30.2513 & 24.0807 & 28.8054 & 28.3455 & -32.6680 & -30.2513 \\ 65.9210 & 61.9317 & 66.6120 & 65.3360 & 60.5027 & 65.9210 & 61.9317 & 66.6120 & 65.3360 & 60.5027 \\ -4.2593 & -1.1522 & -1.1338 & 1.3067 & 1.2101 & -4.2593 & -1.1522 & -1.1338 & 1.3067 & 1.2101 \\ 4.3195 & 1.2098 & -0.7370 & -0.6250 & 1.2677 & 4.3195 & 1.2098 & -0.7370 & -0.6250 & 1.2677 \\ 0.0753 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0753 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\Delta i_j}{\Delta F_j} = \frac{dF_{ki,j}}{\Delta F_j} \quad \text{onde,}$$

$\Delta \Delta i_j$ = é a variação da leitura em Newtons do anel i ($i = 1$ a 6) do transdutor na experiência j da calibração final ($j = 1$ a 12), para um força de módulo 74.7 Newtons. ΔF_j = é a variação do módulo do esforço aplicado pelo conjunto do parafuso em Newtons e / ou Newtons por metro, na experiência j da calibração final ($j = 1$ a 12), temos que

$$\frac{dF_{ki,j}}{\Delta F_j} = \frac{dF_{ki,j}}{\Delta F_j} \quad \text{onde,}$$

$F_{ki,j}$ = é a componente de esforço (força (F) ou momento (M)) na direção k (x, y ou z) na experiência j ($j = 1$ a 12) da calibração final no anel i ($i = 1$ a 6) do transdutor. c_{11} a c_{66} = são os 36 coeficientes (c_{ij}), que definem a matriz $[C]_{tot}$.

5 - CAPACIDADE DO DINAMÔMETRO

Vamos estabelecer o limite de carga para todos os seis anéis do nosso transdutor em 93 N, uma vez que as calibrações realizadas nestes anéis pela célula de carga, ver Anexo B, até este limite, garantiram um comportamento extremamente linear dos anéis.

Então, a partir desse valor determinaremos o anel mais solicitado, segundo combinações de solicitação dos vetores força e momento, e utilizando a matriz $[C]^{-1}$ total (matriz característica experimental obtida pelos 12 ensaios efetuados), encontraremos a capacidade do dinamômetro.

5.1 - Anel do transdutor mais solicitado

Segundo este critério, que é o limite de carga de 93 N para solicitação máxima de um dos anéis do dinamômetro, estudaremos, então, duas situações distintas e que posteriormente combinaremos:

- aplicação exclusiva de força, e
- aplicação exclusiva de momento

5.1.1 Uma força genérica com módulo igual a 1 N

A força genérica está aplicada na origem dos eixos $Oxyz$, e para facilitar os cálculos, definiremos os ângulos θ (TETA) e ϕ (PHI), para indicar a direção de \vec{F} , onde:

θ é o ângulo de inclinação de \vec{F} em relação ao plano horizontal Oxy e varia de $-\frac{\pi}{2}$ a $\frac{\pi}{2}$ radianos, e

ϕ é o ângulo entre a projeção de \vec{F} no plano horizontal Oxy em relação ao eixo x , e varia de $-\pi$ a π radianos.

anel	força máxima (N) para força unitária (1 N)	força máxima (N) para momento unitário (1 N.m)
1	2,0562	19,1366
2	1,7654	15,7570
3	0,8612	15,6707
4	0,4999	13,2363
5	1,7514	8,4953
6	1,0594	9,2271

Tabela 5.1 - Forças nos anéis do dinamômetro para força unitária e momento unitário

deste carregamento,

A tabela 5.1 também apresenta os valores máximos das forças nos anéis em função

descritas na seção 5.1.1.

O momento genérico é aplicado sobre o dinamômetro em condições análogas às

5.1.2- Um momento genérico com módulo igual a 1 N.m

carregamento especificado.

$\Delta\phi$. A tabela 5.1 apresenta os valores máximos das forças atuantes nos anéis para o

A discretização adotada especificou um intervalo $\Delta\theta$ de $\frac{\pi}{20}$ rad., e de $\frac{\pi}{10}$ rad. para

no transdutor (adotado com módulo igual a 1 N).
do transdutor, os valores de força nele atuantes, como resposta ao carregamento efetuado
O programa PLOTAL.m, executado no MATLAB, calcula e registra para cada anel

Considerando somente a influência da força na capacidade do transdutor, obtêm-se que o anel do dinamômetro mais solicitado é o anel 1, com 2,0562 N. Para alcançar o valor limite de 93 N, conforme cálculo de capacidade de força do dinamômetro (C_{fmax}) acima, o valor do módulo do vetor-força aplicado ao transdutor deve ser, no máximo de 45,22 N.

$$C_{fmax} = \frac{19,1366}{93} = 4,85 \text{ N.m} \Rightarrow C_{mmax} = 4,85 \text{ N.m}$$

1 N.m → leitura máxima = 19,1366 N
 C_{mmax} → limite de carga de anel = 93 N

e a capacidade de momento do dinamômetro (C_{mmax}) será,

$$C_{fmax} = \frac{2,0562}{93} = 45,22 \text{ N} \Rightarrow C_{fmax} = 45,22 \text{ N}$$

1 N → leitura máxima = 2,0562 N
 C_{fmax} → limite de carga de anel = 93 N

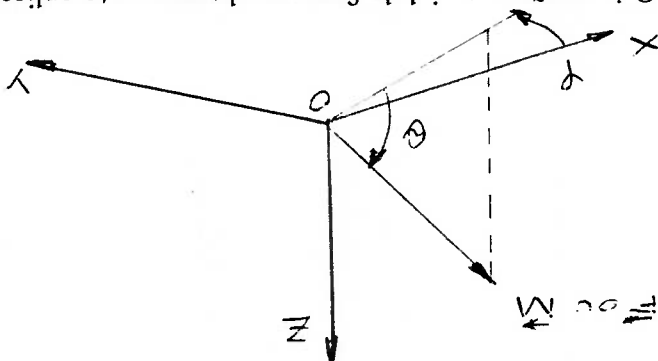
fator limitante, será,

A capacidade de força do dinamômetro (C_{fmax}), considerando o anel 1 como

unitário (1 N.m), é o anel 1.

Observando a tabela 5.1, vemos que o anel mais solicitado do transdutor, tanto no caso da solicitação por força unitária (1 N), como no caso da solicitação por momento

Fig. 5.1 - Orientação vetorial da força ou do momento aplicado no transdutor.



Por outro lado, da análise apenas da influência do momento na capacidade, temos que o resultado aponta também o anel I como sendo o mais solicitado com 19,1366 N. Para alcançar valor limite de 93 N, conforme cálculo de capacidade de momento do dinamômetro (C_{mmax}) acima, o valor do módulo do vetor-momento aplicado ao transdutor deve ser no máximo de 4,85 N.m.

5.1.3-A combinação de força e de momento como esforços solicitantes no dinamômetro

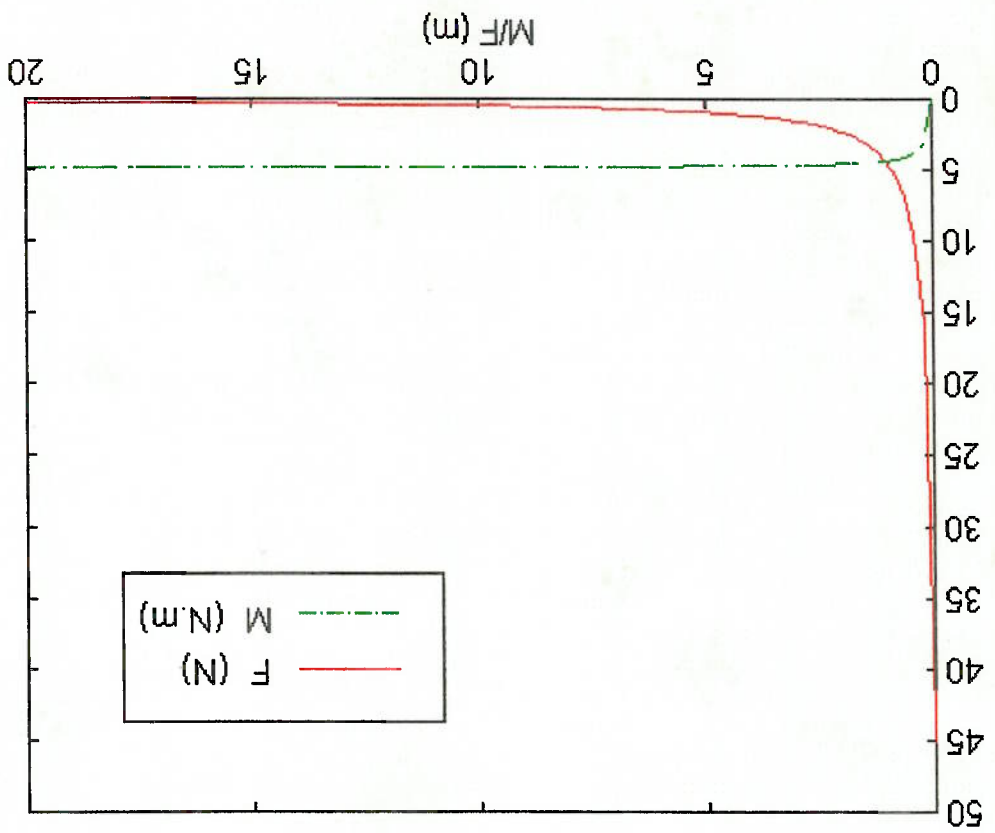
Como o dinamômetro poderá medir simultaneamente força e momento, então a combinação dos resultados das seções 5.1.1 e 5.1.2 fornecem subsídios para um novo critério mais amplo de capacidade.

Desta forma, os módulos do vetor-força, F , e do vetor - momento, M , aplicados no dinamômetro deverão satisfazer a seguinte inequação:

$$2,0562 \cdot F + 19,1366 \cdot M \leq 93 \quad (5.1).$$

A figura 5.2 apresenta graficamente uma análise quantitativa da inequação (5.1). No eixo das abcissas está a relação M / F e nos eixos das ordenadas estão F e M . Desta forma, pode-se analisar a importância relativa de um esforço sobre o outro para diferentes carregamentos.

Fig. 5.2 – Gráfico da força e do momento respeitando o limite de 93 N, definido pela inequação da capacidade do dinamômetro.



6 - DISCUSSÃO

O nosso trabalho de projeto, fabricação e ensaios deste tipo de transdutor multicomponente, baseou-se na escolha da sua geometria, das suas conexões flexíveis, que unem os anéis aos elementos estruturais do transdutor, para posteriormente concentrarmos na determinação experimental da sua matriz característica total.

A forma geométrica do transdutor consiste em uma estrutura isostática, utilizada com base no cálculo dos graus de mobilidade ($GM=0$, pois o transdutor é uma estrutura e não um mecanismo), de modo que as relações entre os esforços aplicados no dinamômetro sejam facilmente determinados a partir das forças (reações) nos anéis. O tipo de estrutura foi o mesmo adotado por COELHO (1997).

A utilização de hastes de aço flexíveis em geral, mas rígidas axialmente, nos anéis do dinamômetro - diferente da configuração daquele dinamômetro (COELHO, 1997), que utilizava juntas esféricas nas conexões dos anéis com a plataforma e a base - teve a contribuição de diminuir as folgas nas conexões dos anéis, que podem apresentar-se neste tipo de configuração com a utilização excessiva do dinamômetro, e, consequentemente a adoção desta solução de hastes de aço flexíveis melhorou o comportamento global do nosso dinamômetro.

A calibração dos anéis desmontados do dinamômetro, consistiu no levantamento das curvas características de cada um dos seis anéis, pela aplicação e medição de uma força crescente através da célula de carga previamente calibrada (ver Anexo B), no dinamômetro, ou seja de zero até o valor determinado de 93 N. Observamos com isso, uma inclinação linearidade nas curvas dos anéis do transdutor, e com isso a repetibilidade dos resultados obtidos nos respectivos anéis do transdutor (ver Anexo B).

Os ensaios realizados com os anéis montados no transdutor, registraram a história dos carregamentos atuantes no dinamômetro, ou seja, da situação sem carga até o seu valor final incluindo os valores intermediários em função das leituras nos anéis; desta forma foram traçadas as curvas contínuas de cada anel do transdutor, ou seja, da sua leitura em função da carga aplicada no dinamômetro, então, obtivemos a representação do carregamento no regime elástico de 0 a 74,7N, (intervalo de carregamento) de cada anel, ao invés de obtermos apenas a leitura de apenas um ponto na aplicação prática de uma carga determinada no dinamômetro.

Nestes ensaios dos anéis do transdutor, ou seja, do dinamômetro montado no laboratório, foi nosso objetivo a obtenção da matriz característica experimental total $[C]_{\text{tot}}^{-1}$, através de duas etapas bem definidas.

Na primeira etapa, o transdutor foi submetido a seis carregamentos puros, F_x, F_y, F_z, M_x, M_y e M_z , onde no caso da geração dos momentos M_x, M_y e M_z tivemos de aplicar uma força F_z para obter M_x e M_y , e F_x para obter M_z ; e desta forma obtivemos um sistema possível e determinado de 36 equações e 36 incógnitas de fácil obtenção dos coeficientes experimentais, componentes deste primeiro resultado parcial que é a matriz,

$$[C]_{\text{exp}}^{-1} = \begin{bmatrix} -0,0462 & -0,4749 & 0,0546 & -0,4984 & -0,0379 & 0,0375 \\ -0,0334 & -0,0311 & 0,0406 & 0,0563 & -0,4620 & -0,4691 \\ 0,9768 & 0,9107 & 1,1710 & 0,9649 & 0,8422 & 0,9056 \\ 0,0684 & 0,0754 & -0,0766 & -0,0787 & -0,0237 & -0,0208 \\ -0,0302 & 0,0223 & -0,0310 & 0,0258 & -0,0581 & 0,0645 \\ -0,0031 & 0,0349 & 0,0043 & -0,0390 & -0,0283 & 0,0340 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A segunda etapa consistiu na avaliação do dinamómetro sob carregamentos genéricos, ou seja, seis componentes presentes diferentes de zero do vetor-esforço ou carregamento $[F]_{tot}$. Realizaram-se mais seis ensaios onde tivemos seis carregamentos quaisquer, porém, ao invés, de obtermos os coeficientes da matriz $[C]^{-1}_{tot}$ utilizando somente as informações originadas por estes ensaios, o que recarria como na etapa anterior num sistema de 36 equações e 36 incógnitas, optou-se por utilizar também as informações fornecidas pelos ensaios de carregamentos puros. Portanto, o novo sistema passou a ser de 72 equações e 36 incógnitas.

Como forma de resolver este sistema, derivaram-se as equações envolvidas pelo módulo do respectivo carregamento. Isto acarretou uma simplificação das matrizes conhecidas $[A]_{tot}$ e $[F]_{tot}$ que foram derivadas. O emprego das derivadas das equações lineares do sistema,

$$[A]_{tot} = [C]_{tot} [F]_{tot} \quad (4.8),$$

evitou o cálculo do vetor carregamento $[F]_{tot}$ para obtenção de $[A]_{tot}$, permitindo uma grande simplificação no cálculo de $[C]_{tot}$, pela utilização das derivadas das equações do sistema que compõem a equação matricial acima, em relação ao esforço aplicado, o que resultou na obtenção das matrizes dependentes somente da orientação daquele vetor, ou seja, por geometria direta.

Finalmente, para obtenção da matriz característica experimental total, utilizou-se o método dos mínimos quadrados e invertemos $[C]_{tot}$, sendo que o resultado total foi a seguinte matriz,

$$[C]^{-1}_{tot} = \begin{bmatrix} -0.0193 & -0.4503 & 0.0230 & -0.5171 & -0.0362 & 0.0481 \\ 0.0055 & 0.0175 & 0.0429 & 0.0656 & -0.4566 & -0.4282 \\ 0.8713 & 0.7207 & 1.0305 & 0.8549 & 0.8285 & 0.7303 \\ 0.0617 & 0.0698 & -0.0695 & -0.0738 & -0.0228 & -0.0191 \\ -0.0275 & 0.0214 & -0.0297 & 0.0216 & -0.0545 & 0.0585 \\ -0.0032 & 0.0346 & 0.0045 & -0.0397 & -0.0280 & 0.0332 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Em relação à capacidade do dinamômetro, podemos dizer que o critério adotado na determinação do anel do transdutor mais solicitado, pela limitação de carga de cada anel para 93 N, obedeceu à faixa de comportamento linear observada nas calibrações dos próprios anéis. Desta forma, utilizou-se $[C]^{-1}_{tot}$, no cálculo da capacidade do dinamômetro, porque esta matriz experimental considera todos os 12 ensaios realizados, e com isso obtivemos resultados práticos que puderam refletir melhor todos os experimentos efetuados.

A comparação entre os coeficientes das matrizes teórica $[C]^{-1}_t$ e a experimental obtida pelo método dos mínimos quadrados $[C]^{-1}_{tot}$, nos revela uma grande proximidade entre os seus valores, e um pequeno erro percentual para os coeficientes diferentes de zero (vide a tabela 6.1), e para a comparação entre os coeficientes de $[C]^{-1}_t$ com os de $[C]^{-1}_{exp}$ a proximidade entre os valores respectivos é maior e os erros percentuais são menores do que no caso anterior (vide a tabela 6.2), observe a nossa $[C]^{-1}_t$,

$$[C]^{-1}_t = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.866 & 0 & 1 & 0.866 & 0.866 & -0.5 \\ -0.0541 & 0.0541 & -0.0625 & -0.0541 & -0.0247 & -0.0247 \\ 0.0247 & -0.0247 & -0.0285 & 0.0247 & -0.0541 & 0.0541 \\ 0 & 0.0313 & 0 & -0.0313 & -0.0313 & 0.0313 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Finalmente, podemos comentar que esses desvios maiores obtidos entre os coeficientes das matrizes características teórica e experimental total do dinamômetro, não significam necessariamente erros experimentais, pelo contrário, eles indicam que a matriz obtida experimentalmente considera os efeitos de assimetria geométrica no posicionamento relativo entre os componentes do transdutor, além de fatores como propriedades dos materiais, fabricação e montagem dos próprios componentes do dinamômetro.

Tabela 6.1- Desvio percentual dos coeficientes da matriz $[C]^{-1}$ tot correspondente a todas as experiências no item 4.4.3 em relação à matriz teórica $[C]^{-1}$ (%).

6	5	4	3	2	1	6
-6,07	10,54	-26,84	—	-10,54	—	—
-8,13	-0,74	12,55	-4,21	13,36	3,51	—
22,67	7,69	-36,41	-11,2	-29,02	1,28	—
15,67	4,33	1,28	-3,05	16,78	12,87	—
14,36	8,68	—	—	—	—	—
—	—	-3,42	—	9,94	—	—

Tabela 6.2- Desvio percentual dos coeficientes da matriz $[C]^{-1}_{exp}$ correspondente às seis primeiras experiências no item 4.4.3 em relação à matriz teórica $[C]^{-1}_t$ (%).

	1	2	3	4	5	6
1	—	5,02	—	0,32	—	—
2	—	—	—	—	7,6	6,18
3	2,32	-5,16	-17,1	-11,42	2,75	-4,57
4	-9,44	-39,37	-22,56	45,47	4,05	15,79
5	-5,97	9,72	-8,77	-4,45	-7,39	-19,22
6	—	-11,5	—	-24,6	9,59	-8,63

Inserindo os valores das sensibilidades de cada anel do transdutor na matriz $[C]_{tot}$, obteremos a matriz de sensibilidade estática do nosso transdutor $[S]$.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0,2277 & 0,1229 & 0,1026 & 1,1157 & 0,9855 & -2,093 \\ -0,2391 & -0,0430 & -0,0268 & 0,0079 & -0,8981 & 1,9652 \\ 0,0235 & 0,1181 & 0,0389 & -0,8993 & -0,992 & 1,8609 \\ -0,0472 & 0,0465 & 0,0278 & -0,0792 & 0,9344 & -1,6334 \\ -0,1071 & -0,1887 & -0,0270 & -0,0967 & -1,0492 & 0,1098 \\ 0,1012 & -0,0705 & 0,0352 & 0,0288 & 1,1104 & -0,1262 \end{bmatrix}$$

7 - CONCLUSÕES

7.1 - Conclusões

Este trabalho apresenta um tipo de dinamômetro, relativamente compacto, à base de extensômetros elétricos, para medição de forças e momentos, representando um total de 6 componentes de esforço.

O trabalho abordou a calibração do transdutor, com a execução de diversos ensaios para o levantamento da matriz característica experimental total do transdutor. Da comparação entre a matriz teórica e a experimental, observa-se uma grande proximidade nos seus elementos.

A partir dos resultados experimentais, apresentou-se um procedimento para avaliação da capacidade do dinamômetro, tanto em termos da grandeza força, quanto em termos de momento. Com a aplicação de apenas força, obteve-se uma capacidade de 45,22 N. Somente com a aplicação de momento, obteve-se a capacidade de 4,85 N.m.

As suas características construídas lhe conferem um desempenho bastante promissor em termos de rigidez, sensibilidade e capacidade de carga.

7.2 - Temas de pesquisa futura

Como temas a serem pesquisados futuramente sugerimos:

• análise do comportamento dinâmico do transdutor, determinação dos seus parâmetros próprios, como frequências naturais e modos de vibração.

• otimização da geometria do transdutor, visando aumento de capacidade, sensibilidade e faixa de medição em termos de frequência da solicitação mecânica, para tanto teríamos o projeto otimizado de um modelo por computador, sua simulação estática e dinâmica por elementos finitos, a construção e os ensaios no laboratório e a comparação dos resultados teóricos com os experimentais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBATO, G.; FRANCESCHINI, F., "Performance indicators for multicomponents dynamometers", Measurement, Inst. di Metr. Tor, Italy, vol. 13n4; pp:297-306, 1994.
- BECKWICK, T.G.; MARANGONI, R.D., "Mechanical Measurements", 4a. ed., USA Reading, Addison-Wesley, pp:463-480, 1990.
- COELHO, T.A.H., "Otimização no balanceamento de mecanismos tri-dimensionais do tipo RSSR", tese de doutoramento, EPUSP, pp 85-92 e pp 157-160, 1997.
- DEN HARTOG, J.P., "Mechanical Vibrations", Mc Graw Hill, New York, USA, 1956.
- DOEBLIN, E.O., "Measurement Systems-application and design", 4th. edition, USA New York, Mc Graw Hill, pp:358-381, 1990.
- FERRARRESI, D., "Usinagem de Metais", Ed. Edgard Blucher, S. Paulo, Brasil, 1970.
- JUVINAL, R.C., "Fundamentals of Machine Component Design", John Wiley & Sons, New York, USA, 1983.
- KOREN, Y., "Robotics for engineers", Mc. Graw Hill book Co., Israel Institute of technology, 1985, pp: 246-248, 1985.
- KYOWA E.I. Co. Ltd., "Strain gage Instruction Manual", pp 1-22, JAPAN, 1996.
- THE MATH WORKS INC., "The student Edition of MATLAB", The Ultimate Computing Environment for Technical Education, PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, NJ 07632, User's Guide, The Matlab Curriculum Series, USA, 1995.
- QUINN, T.P.; MOTE, C.D. JR., "Optimal design of an uncoupled six degree of a freedom dynamometer", Experimental Mechanics, Cal. UnBerkUSA vol. 30n1; pp:40-48, 1990.
- SHIGLEY, J.E.; UICKER, J.J., "Theory of Machines and Mechanisms", International Student Edition, Mc Graw Hill, Singapore, 1981.
- SORLI, M.; PASTORELLI, S., "Six-axis reticulated structure force/torque sensor with adaptable performance", Mechatronics, Politt. Tor. Italy, vol. 5n.6; pp585-601, 1995.
- SPIEGEL, M.R., "Statistics", Schaum Collection, Mc Graw Hill, pp 362-368 e 569, Ed. Brasil 1971.

WEN LIN, J.; VENUVINOD, P. K., Interaction Elimination for multicomponents strain-gauge dynamometers", Sensors and actuators Ph., Nanj. Un., China, vol. A50 n. 1-2, pp 1-6, 1995.

WICKAM, M. J.; RILEY, D. R.; NACHTSHEIM, C. J., "Optimal design of a multi-axis load transducer", Conference number 17555, ASME, Un. of Minnesota MN USA, Computers in engineering, vol. 1, ASME, 1992, pp 175-179, 1992.

A seguir apresentaremos os serviços executados no Laboratório de Medidas de Grandezas Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, relativos à

calibração da célula de carga.

A razão da calibração da célula de carga, anteceder às calibrações dos anéis do transdutor relatadas no Anexo B, é porque com a célula de carga calibrada, é que fazem-se as calibrações dos referidos anéis; então iremos determinar a sensibilidade da célula de carga.

Observar o seguinte esquema :

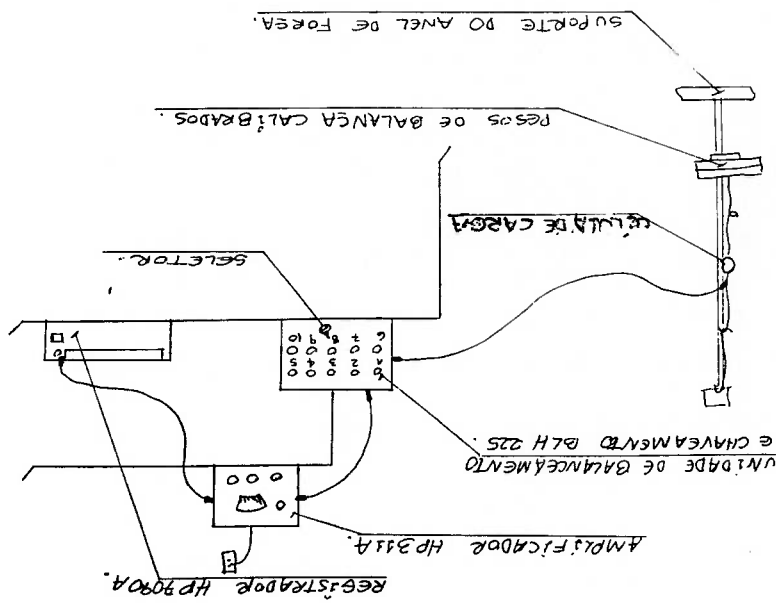


Fig. A.1 - Esquema de calibração da célula de carga.

ANEXO A

CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

A calibração da célula de carga, é feita pelo carregamento sequencial de uma série de pesos calibrados de uma balança, que são colocados um em cima do outro, assim :

Primeiro carregamos o peso de = 2,39 kg ; a seguir adicionamos mais ,

1-) 2,30 kg = 4,69 kg ; em seguida colocamos mais ,

2-) 2,28 kg = 6,97 kg ; e finalmente acoplamos o último peso ,

3-) 2,38 kg = 9,35 kg , depois descarregamos de cima para baixo os pesos empilhados.

Em cada uma das etapas do carregamento acima descrito, procede-se à leitura da milivoltagem no registrador, onde é plotada a curva característica de calibração da célula de carga ; com o resultado encontrado de 7,60 N/mV ou 0,132 mV/N.

Para esta calibração, foram usados os seguintes aparelhos de instrumentação, que estão especificados no capítulo 4 .

UNIDADE DE BALANÇAMENTO E CHAVEAMENTO BLH 225

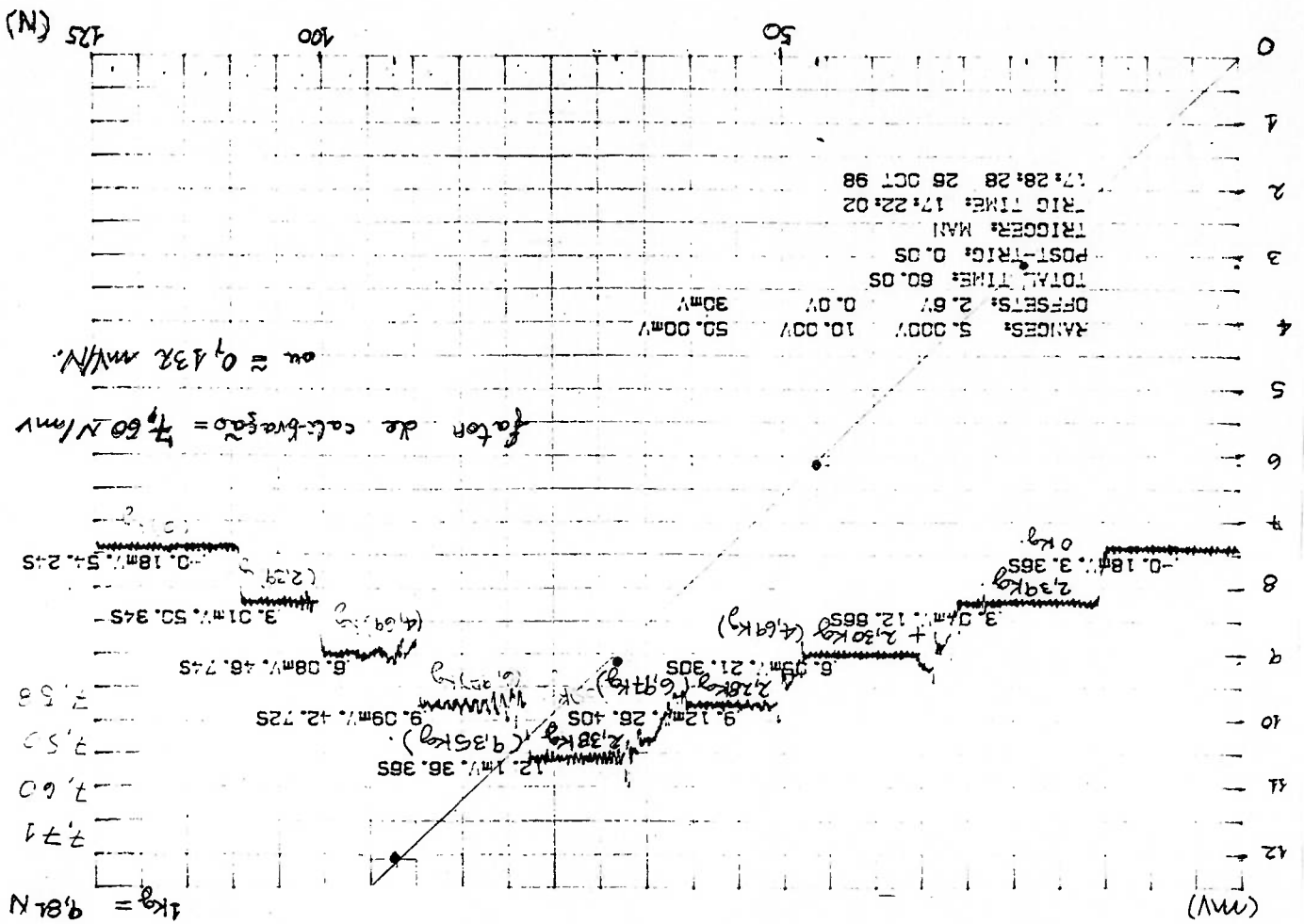
AMPLIFICADOR HP 311 A

REGISTRADOR HP 7090 A

e os PESOS DE BALANÇA CALIBRADOS .

O gráfico da calibração está na fig. A.2,

Fig A 2 - Gráfico da calibração da célula de carga.



CALIBRAÇÕES DOS SEIS ANÉIS DESMONTADOS DO DINAMÔMETRO

ANEXO B

A seguir, apresentaremos os serviços executados no Laboratório de Medidas de Grandezas Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, para a calibração dos seis anéis desmontados do transdutor multicomponente.

Em relação à calibração dos anéis, 6 no total, determinaremos a sensibilidade de um anel, de forma individual, da seguinte maneira. Escolhemos o primeiro anel do transdutor. Este primeiro anel será carregado através da célula de carga que anteriormente foi calibrada, de modo a obter a curva característica de calibração deste primeiro anel.

Esta curva característica de calibração do anel, apresenta-se no formato de uma reta crescente, passando pela origem; devido à resposta linear que possui o anel, um fato já esperado, na aplicação pela célula de carga, de forças crescentes de tração.

Esta calibração feita é para os 6 anéis, onde temos as forças aplicadas, através da célula de carga (na forma de uma milivoltagem e conhecendo-se anteriormente a sensibilidade da célula de carga), versus, a voltagem obtida na reta para cada um dos 6 anéis; 6 retas com inclinações semelhantes, de maneira a obter as 6 sensibilidades dos 6 respectivos anéis do transdutor.

O esquema de calibração dos anéis do transdutor, encontra-se na fig. B.1, onde vemos que o carregamento do anel do transdutor pela célula de carga, é feito via fusomaneira através do seu giro, tracionando os 2 anéis de maneira simultânea, obtendo a curva de calibração do anel do transdutor diretamente no registrador, ver fig. B.2.

Fig. B.1 - Esquema de calibração dos anéis desmontados do transdutor pela célula de carga.

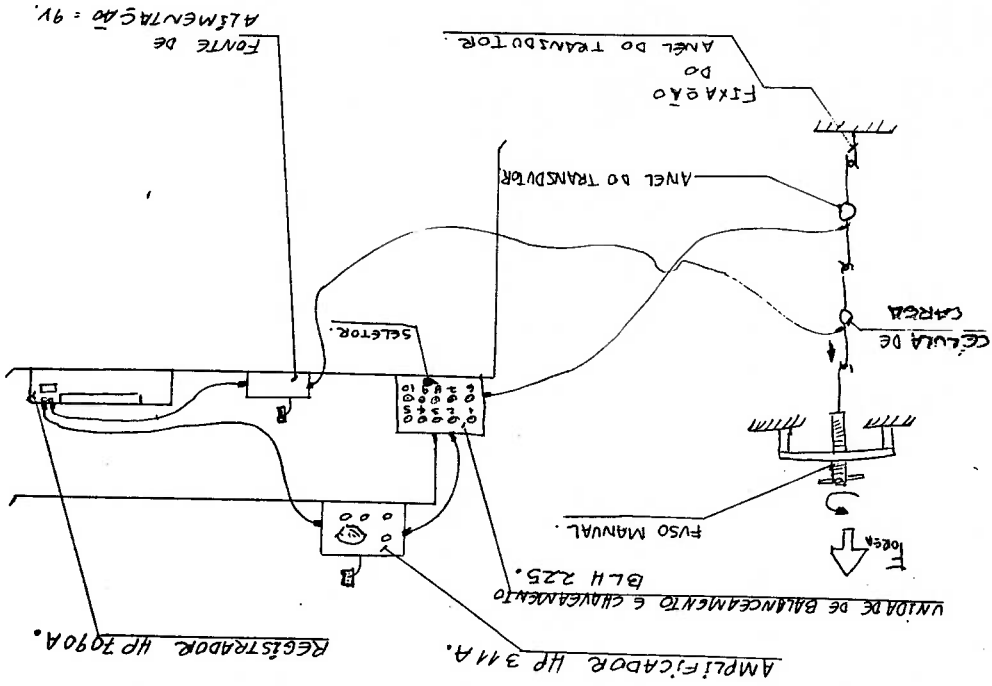
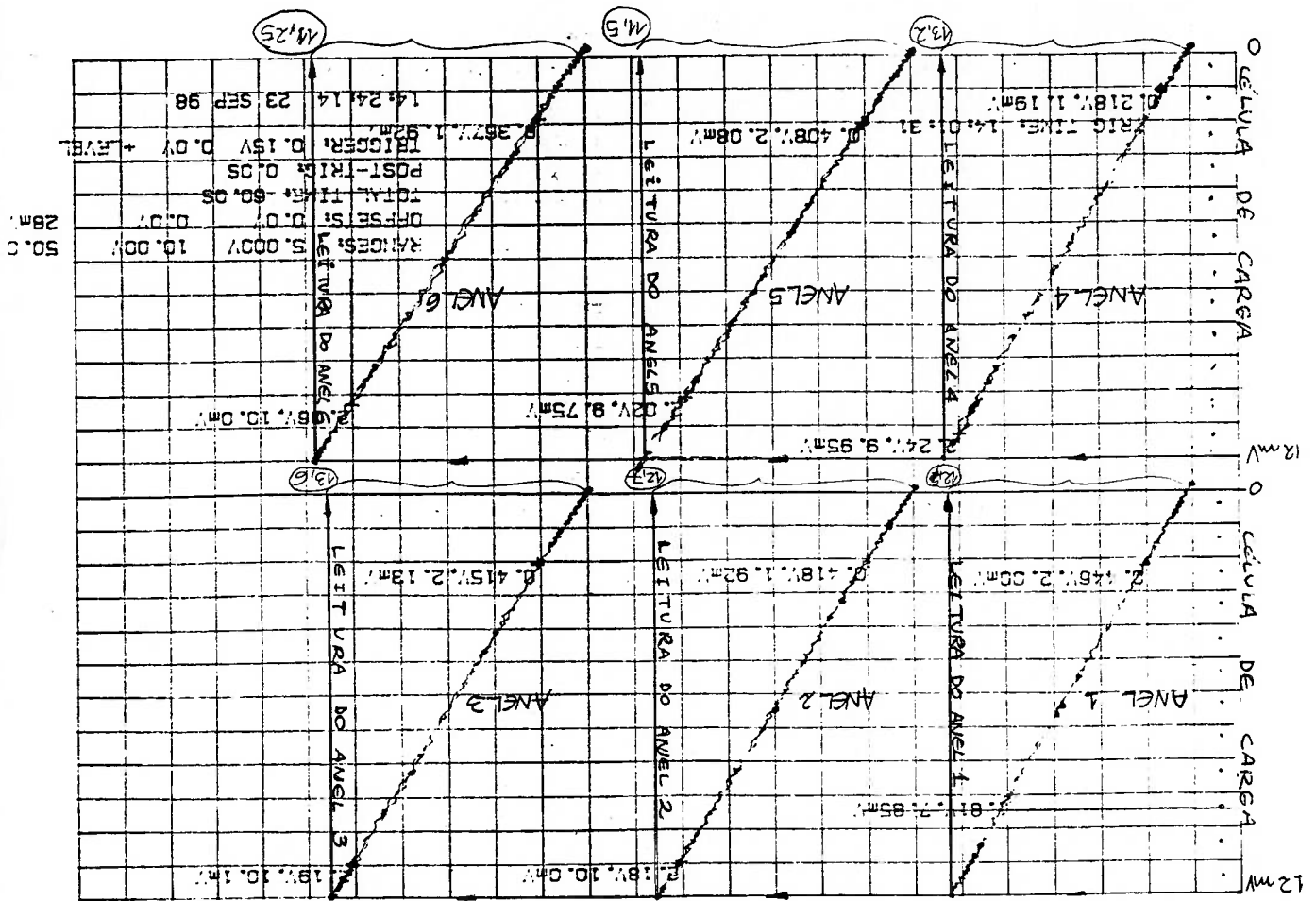


Fig. B.2 - Gráficos das calibrações dos anéis desmontados do transdutor pela célula de carga.



Calibrações dos anéis desmontados do transdutor pela célula de carga :

Anel 1 :

para uma carga de 12 mV ou 93 N na célula de carga temos 12,5 V no anel 1, portanto teremos : $S_1 = \frac{12,5}{93} = 0,134$ ou

$$S^1 = 0,134 \left[\frac{N}{V} \right]$$

Anel 2 :

para uma carga de 12 mV ou 93N na célula de carga temos 12,7 V no anel 2, portanto teremos : $S_2 = \frac{12,7}{93} = 0,137$ ou

$$S^2 = 0,137 \left[\frac{N}{V} \right]$$

Anel 3 :

para uma carga de 12 mV ou 93N na célula de carga temos 13,6 V no anel 3, portanto teremos : $S_3 = \frac{13,6}{93} = 0,146$ ou

$$S^3 = 0,146 \left[\frac{N}{V} \right]$$

$$S_6 = 0,121 \left[\frac{N}{V} \right]$$

Anel 6 :
 para uma carga de 12 mV ou 93 N na célula de carga temos 11,25 V no anel 6,
 portanto teremos : $S_6 = \frac{11,25}{93} = 0,121$ ou

$$S_5 = 0,124 \left[\frac{N}{V} \right]$$

Anel 5 :
 para uma carga de 12 mV ou 93 N na célula de carga temos 11,5 V no anel 5,
 portanto teremos : $S_5 = \frac{11,5}{93} = 0,124$ ou

$$S_4 = 0,142 \left[\frac{N}{V} \right]$$

Anel 4 :
 para uma carga de 12 mV ou 93 N na célula de carga temos 13,2 V no anel 4,
 portanto teremos : $S_4 = \frac{13,2}{93} = 0,142$ ou

LISTAGEM DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

APÊNDICE I

```
%faplic é modulo da força aplicada
faplic=input('modulo da força aplicada (N)=');
%p é o ponto de fixação do anel à estrutura
p(1)=input('x do ponto ext. fixação do anel (m)=');
p(2)=input('y do ponto ext. fixação do anel (m)=');
p(3)=input('z do ponto ext. fixação do anel (m)=');
%p1 é o ponto de fixação do anel no dinamômetro
p1(1)=input('x do ponto de fixação do anel (m)=');
p1(2)=input('y do ponto de fixação do anel (m)=');
p1(3)=input('z do ponto de fixação do anel (m)=');
versor=(p-p1)/norm(p-p1);
fvet=faplic*versor
mvet=cross(p1,fvet)
```

```

% coeficientes da equação forcas=coef*aneis (estática)
% calculo pelas equações da estática
a=pi/3
coef=[0 -cos(a) 0 -cos(a) 0 0; 0 0 -cos(a) -cos(a);
1 sin(a) 1 sin(a) sin(a);
0.065 0.069 -0.065 -0.069 -0.026 -0.026;
-0.03 0.026 -0.03 0.026 -0.058 0.058;
0 0.04 0 -0.04 -0.034 0.034]
% c é tal que aneis=c*forças
c=inv(coef)
% entrar força externa aplicada
forçet;
% calculo das leituras nos aneis para uma força aplicada
fx=fvet(1);
fy=fvet(2);
fz=fvet(3);
mx=mvet(1);
my=mvet(2);
mz=mvet(3);
dado=[fx;fy;fz;mx;my;mz]
fanel=coef\dado;
% contribuição de cada anel nas direções x,y e z
compstx=coef(1,:).*fanel;
compsty=coef(2,:).*fanel;
compstz=coef(3,:).*fanel;
% dados experimentais das leituras nos aneis
anel(1)=input('anel1=');
anel(2)=input('anel2=');
anel(3)=input('anel3=');
anel(4)=input('anel4=');
anel(5)=input('anel5=');
anel(6)=input('anel6=');
anel(1:6)=input('colar coluna do excel entre colchetes=');
% sensibilidade dos aneis em Volts/Newton para atenuação XI
sensib=[0.134,0.137,0.146,0.142,0.124,0.121];
% conversão das leituras em Newtons
anelN=anel./sensib;
% calculo dos componentes experimentais da matriz c como
% coeficientes angulares da reta anel x carga aplicada
% contribuição das leituras de cada anel para forças e momentos
compX=coef(1,:).*anelN;
compY=coef(2,:).*anelN;
compZ=coef(3,:).*anelN;
compX=coef(4,:).*anelN;
compY=coef(5,:).*anelN;
compZ=coef(6,:).*anelN;
% calculo matricial das forças e momentos usando matriz teórica
formom=(coef*anelN)';
% coeficientes experimentais da matriz c

```

```

%leituras, em Volts (x1) correspondentes à força aplicada de 74.7N
%força Fx
%força Fy
%força Fz
cepfy=[8.39,-2.72,8.44,3.47,-13.72,-5.50];
%força Fz
cepfz=[6.94,-1.92,2.83,1.89,-2.14,2.12];
%força Fz com momento My
cepfmz=[2.14,2.7,7.53,-2.62,3.16,-3.06];
%força Fz com momento Mx
cepfmx=[.93,-1.33,6.94,2.22,-1.12,1.82];
%força Fz com momento Mz
cepfmz=[9.08,-10.47,8.53,-9.64,-7.64,7.0];
%conversão das leituras em coeficiente angular experimental
cepfx=cepfy./sensib/74.7;
cepfz=cepfz./sensib/74.7;
cepfmx=cepfmx./sensib/74.7;
cepfmy=cepfmy./sensib/74.7;
cepfmz=cepfmz./sensib/74.7;
%descontando o efeito da força no coeficiente dos momentos
cepfmx=(cepfz-cepfmx)*(1/0.07);
cepfmy=(cepfz-cepfmy)*(1/0.07);
cepfmz=(-cepfz+cepfmz)*(1/0.05);
%montagem da matriz experimental inversa
cepf=[cepfx',cepfy',cepfz',cepfmx',cepfmy',cepfmz'];
chibrid=[cepfx',cepfy',cepfz',c(:,4),c(:,5),c(:,6)];
%calculo da matriz de calibração
cefp=inv(chibrid);
%calculo da medida feita pelo transdutor usando a matriz experimen
tal.
transout=coefxp*anelN';
transhid=coefhbrid*anelN';
p
pl
p1
dado=dado
formom
error=[(formom(1:3)-fvet)/norm(fvet),(formom(4:6)-mvet)/norm(mvet)]
]
transout=transout
erroexp=[(transout(1:3)-fvet)/norm(fvet),(transout(4:6)-mvet)/norm(mvet)]
]
transhid=transhid
errohbrid=[(transhid(1:3)-fvet)/norm(fvet),(transhid(4:6)-mvet)/norm(mvet)]
]
anelN
coef

```



```

a=pi/3
% coeficientes da equação Forças=coef*aneis (estática)
coef=[0 -cos(a) 0 -cos(a) 0 0; 0 0 0 -cos(a) -cos(a);
1 sin(a) 1 sin(a) sin(a) sin(a);
0.065 0.069 -0.065 -0.069 -0.026 -0.026;
-0.03 0.026 -0.03 0.026 -0.058 0.058;
0 0.04 0 -0.04 -0.034 0.034]
% c é tal que aneis=c*Forças
c=inv(coef)
% calculo das leituras nos aneis para uma força aplicada
fx=input('força aplicada em x=');
fy=input('força aplicada em y=');
fz=input('força aplicada em z=');
mx=input('momento em x=');
my=input('momento em y=');
mz=input('momento em z=');
b=[fx;fy;fz;mx;my;mz]
fanel=coef\b
% contribuição de cada anel nas direções x, y e z
compfx=coef(1,:).*fanel
compfy=coef(2,:).*fanel
compfz=coef(3,:).*fanel
% dados experimentais das leituras nos aneis
anel(1)=input('anel1=');
anel(2)=input('anel2=');
anel(3)=input('anel3=');
anel(4)=input('anel4=');
anel(5)=input('anel5=');
anel(6)=input('anel6=');
% sensibilidade dos aneis em Volts/Newton para atenuação X1
sensib=[0.134,0.137,0.146,0.142,0.124,0.121]
% conversão das leituras em Newtons
anel=anel./sensib
% calculo dos componentes experimentais da matriz c como
% coeficientes angulares da reta anel x carga aplicada
% contribuição das leituras de cada anel para forças e momentos
compx=coef(1,:).*anel;
compy=coef(2,:).*anel;
compz=coef(3,:).*anel;
compwx=coef(4,:).*anel;
compwy=coef(5,:).*anel;
compwz=coef(6,:).*anel;
% soma das contribuições
medx=0;
medy=0;
medz=0;
medmx=0;
medmy=0;
medmz=0;
for i=1:6

```

```

medx=medx+compz (i) ;
medy=medy+compz (i) ;
medz=medz+compz (i) ;
medmx=medmx+compmx (i) ;
medmy=medmy+compmy (i) ;
medmz=medmz+compmz (i) ;
end
%valores das forcas e momentos calculados a partir das
%leitura dos aneis e dos coeficientes teóricos
medx
medy
medz
medmx
medmy
medmz
coeficientes experimentais da matriz c
cepfz=[17.39,-18.17,2.00,-3.44,-8.22,7.64]
cepfy=[8.39,-2.72,8.44,3.47,-13.72,-5.50]
cepfz=[6.94,-1.92,2.83,1.89,-2.14,2.12]
cepfy=[2.4,2.8,7.8,-2.72,3.32,-3.2]
cepmx=[.92,-1.4,7.0,2.4,-1.1,2.0]
cpmz=[9.1,-10.5,9,-9.5,-7.5,7.5]
cepfz=cepfz./sensib/74.7
cepfy=cepfy./sensib/74.7
cepmx=cepmx./sensib/74.7
cpmy=cpmy./sensib/74.7
cepmz=cepmz./sensib/74.7
cepmx=(cepfz-cepmx)*(1/0.07)
cpmy=(cepfz-cpmy)*(1/0.07)
cpmz=(-cepfz+cpmz)*(1/0.05)
cepf=[cepfz,cepfy,cepfz,cepfz,cepfz,cepfz,cepfz,cepfz,cepfz,cepfz]
cepf=inv(cepf)
transout=coefexp*aneis

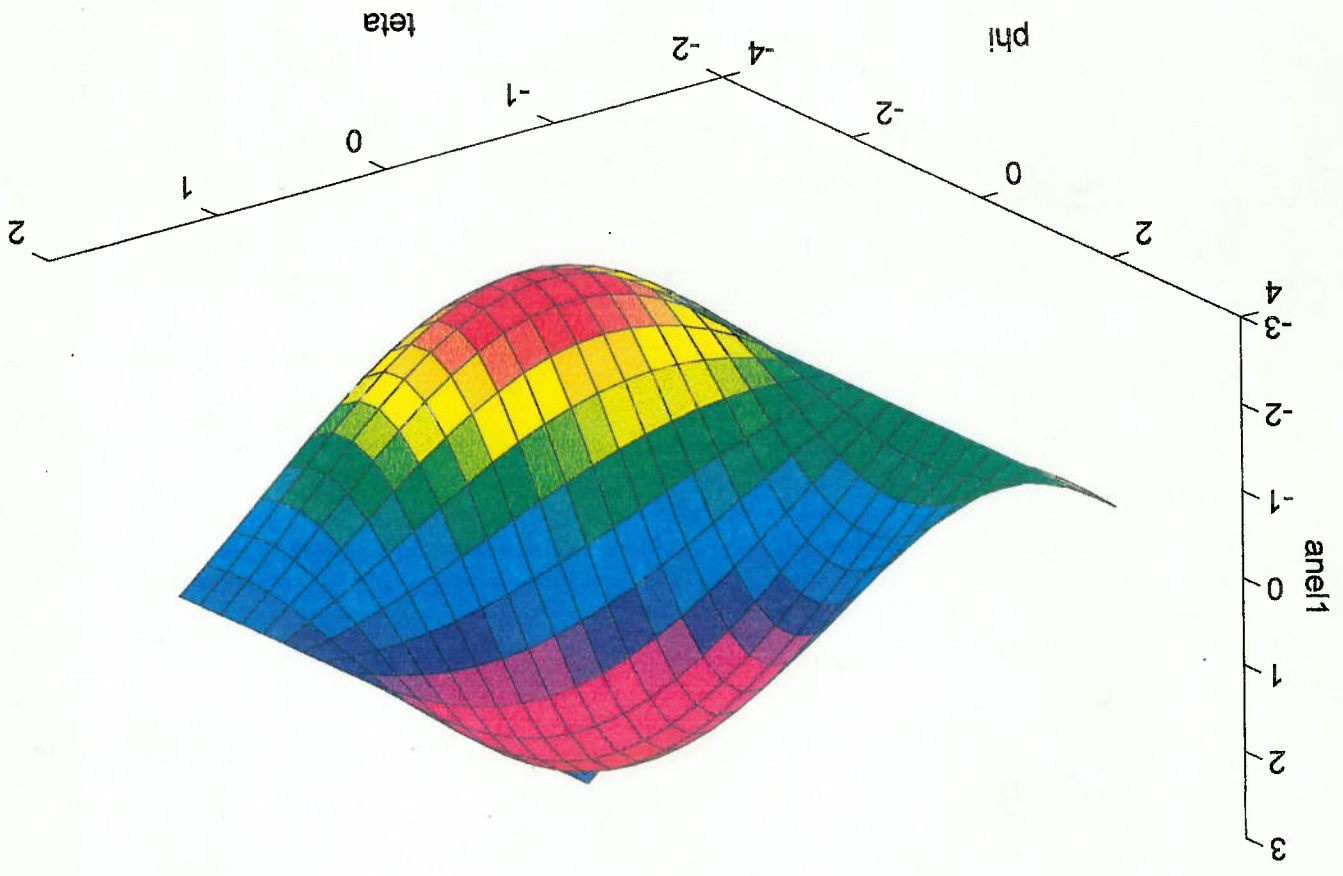
```

```

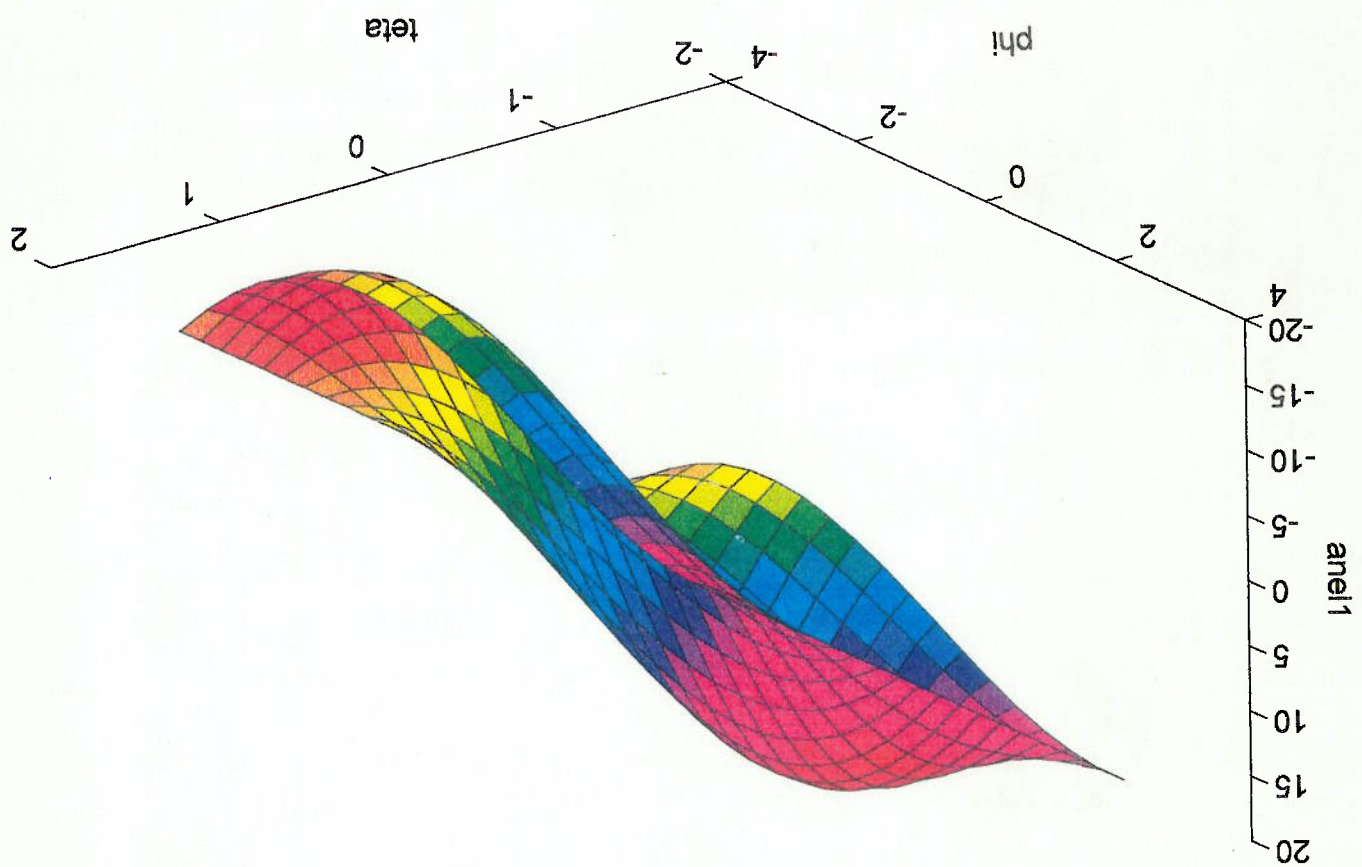
TEFTA=-pi/2:pi/20:pi/2
PHI=-pi:pi/10:pi
[X, Y]=meshgrid(TEFTA, PHI);
funix=cos(X).*cos(Y);
funiy=cos(X).*sin(Y);
funiz=sin(X);
for i=1:length(TEFTA);
    for j=1:length(PHI);
        funi=[funix(i,j);funiy(i,j);funiz(i,j)];
        am=ctotl*funi;
        ZF(i,j)=af(i);
        ZM(i,j)=am(i);
    end
end
figure(1)
[fm1, i1]=max(ZF);
[fm2, i2]=max(fm1);
surf(X, Y, ZF);
hold on
plot3(TEFTA(i1:i2), PHI(i1:i2), ZF(i1:i2), i2)
xlabel('anel1');
ylabel('teta');
xlabel('phi');
title('força no anel 1 para força unitária genérica');
figure(2)
mmax=max(ZM);
mmin=min(ZM);
surf(X, Y, ZM);
xlabel('anel1');
ylabel('teta');
xlabel('phi');
title('força no anel 1 para momento unitário genérica');

```

força no anel 1 para força unitária genérica



força no anel 1 para momento unitário genérica

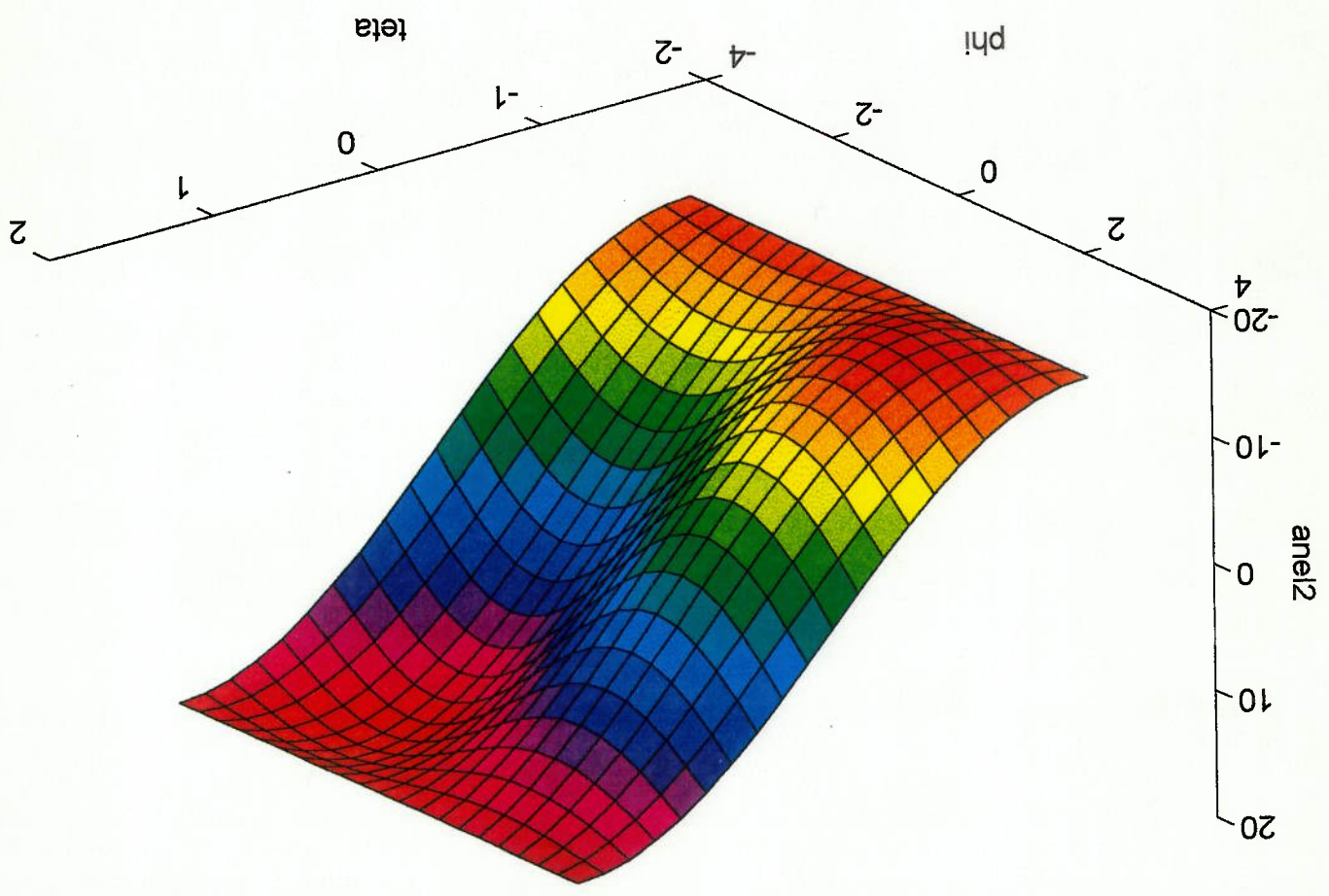


```

TEFTA=-pi/2:pi/20:pi/2
PHI=-pi:pi/10:pi
[X, Y]=meshgrid(TEFTA, PHI);
funix=cos(X).*cos(Y);
funiy=cos(X).*sin(Y);
funiz=sin(X);
for i=1:length(TEFTA);
  for j=1:length(PHI);
    funi=[funix(i,j);funiy(i,j);funiz(i,j)];
    am=ctotl*funi;
    ZF(i,j)=af(2);
    ZM(i,j)=am(2);
  end
end
figure(1)
[fmaz, i1]=max(ZF);
[fmaz, i2]=max(fmaz);
surf(X, Y, ZF);
hold on
plot3(TEFTA(i1:i2), PHI(i1:i2), ZF(i1:i2), i2))
xlabel('anel2');
ylabel('teta');
xlabel('phi');
title('força no anel 2 para força unitária genérica');
figure(2)
[fmaz, i1]=max(ZM);
[fmaz, i2]=max(ZM);
surf(X, Y, ZM);
xlabel('anel2');
ylabel('teta');
xlabel('phi');
title('força no anel 2 para momento unitário genérica');

```

força no anel 2 para momento unitário genérica

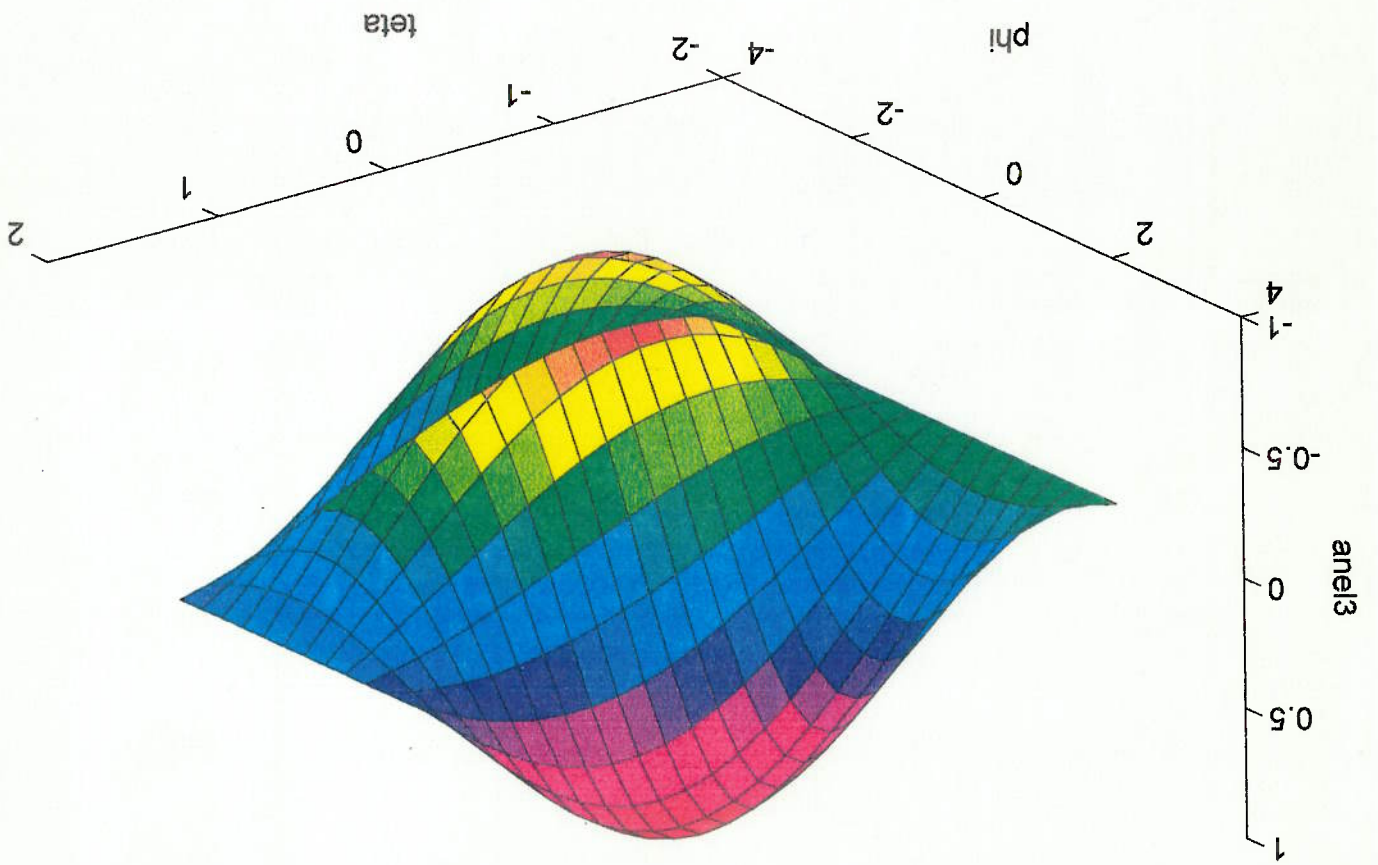


```

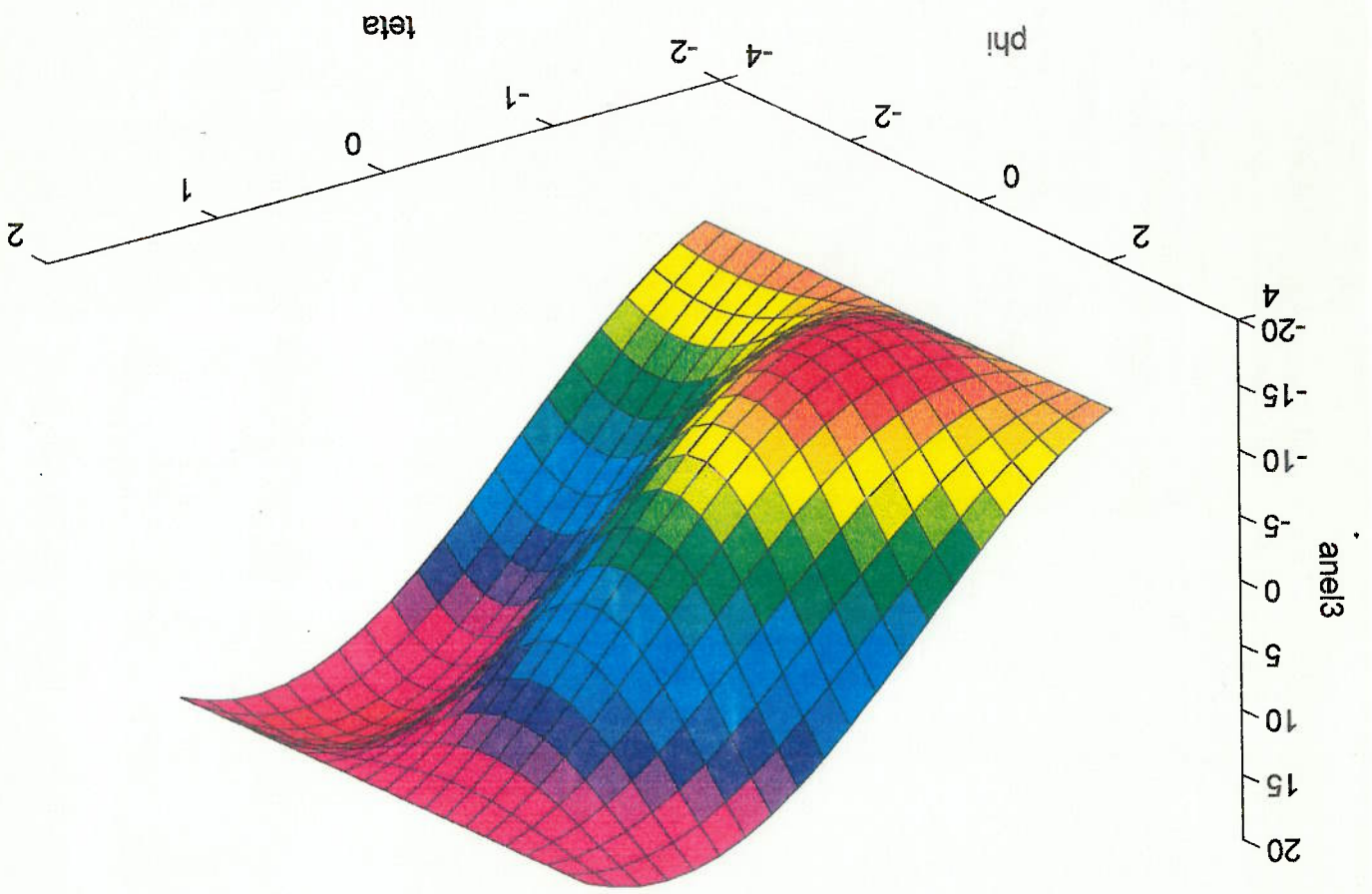
TETA=-pi/2:pi/20:pi/2
PHI=-pi:pi/10:pi
[X,Y]=meshgrid(TETA,PHI);
funix=cos(X).*cos(Y);
funiy=cos(X).*sin(Y);
funiz=sin(X);
for i=1:length(TETA);
    for j=1:length(PHI);
        funi=[funix(i,j);funiy(i,j);funiz(i,j)];
        am=cot(i)*muni;
        ZF(i,j)=af(3);
        ZM(i,j)=am(3);
    end
end
figure(1)
[fmaz,iz]=max(ZF)
[fmaz,i2]=max(fmaz)
surf(X,Y,ZF);
hold on
plot3(TETA(i1:i2),PHI(i1:i2),ZF(i1:i2),i2)
xlabel('anel3');
ylabel('teta');
xlabel('phi');
title('força no anel 3 para força unitária genérica');
figure(2)
mmax=max(ZM)
mmin=min(ZM)
surf(X,Y,ZM);
xlabel('anel3');
ylabel('teta');
xlabel('phi');
title('força no anel 3 para momento unitário genérica');

```


força no anel 3 para força unitária genérica

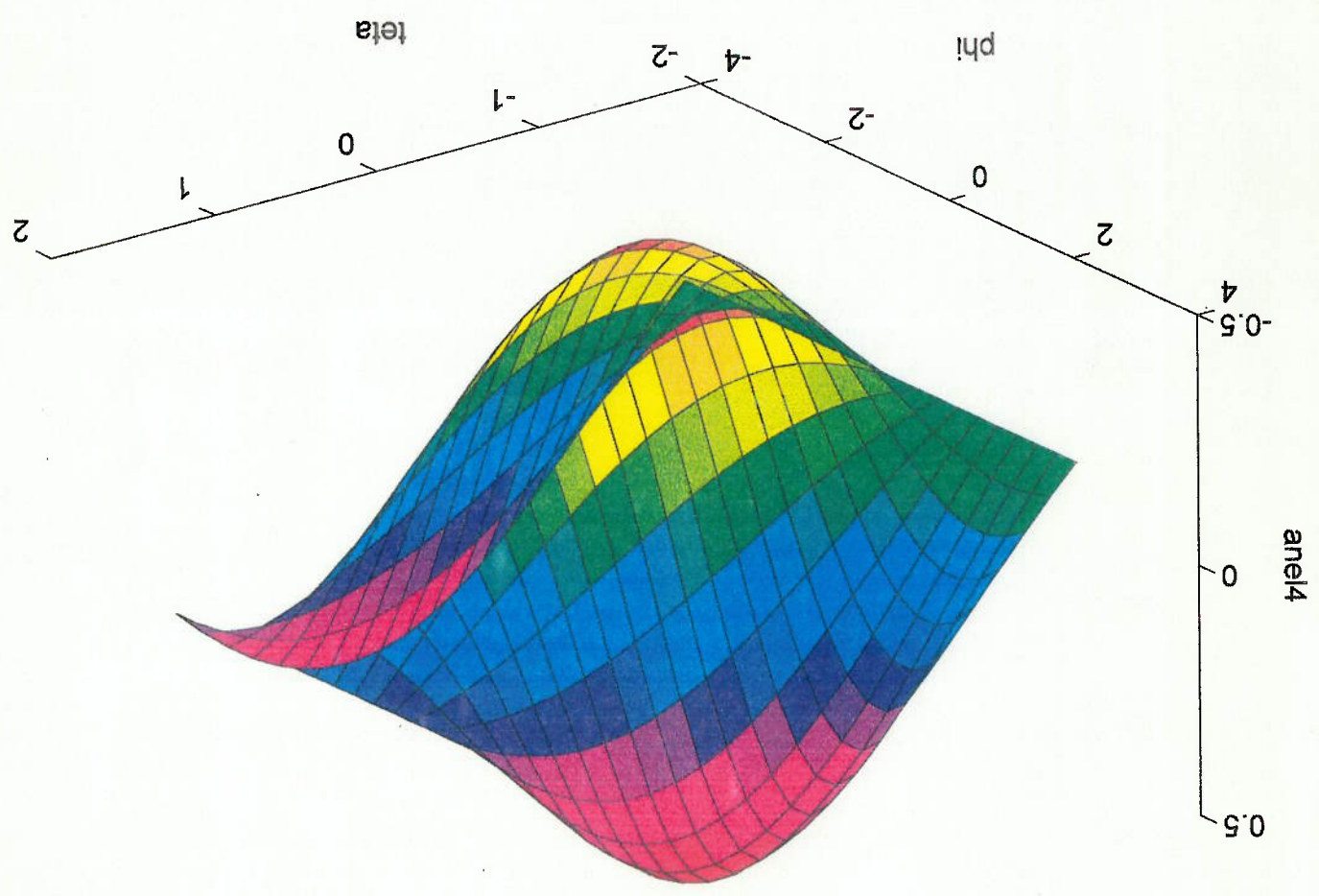


força no anel 3 para momento unitário genérica

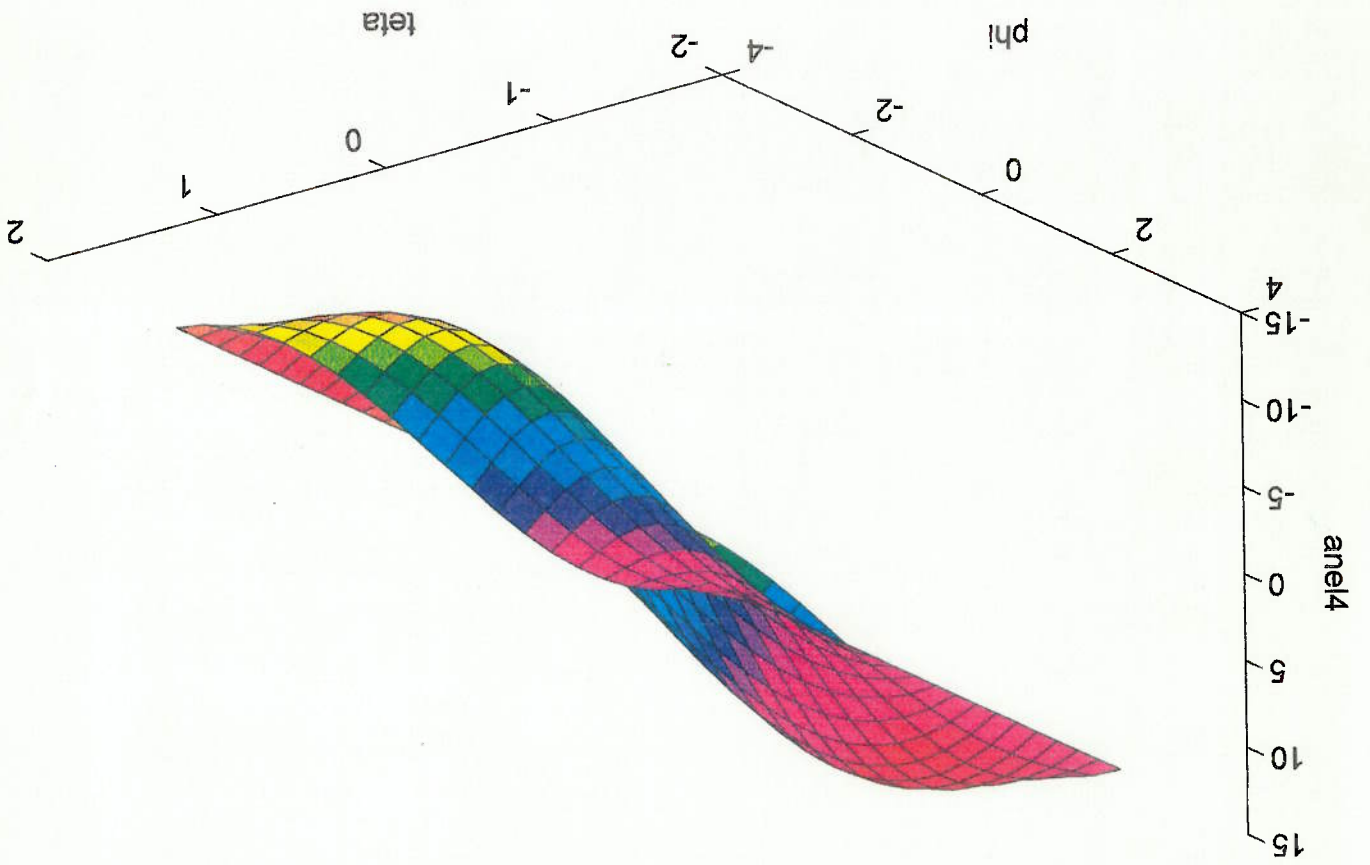


```
TEFTA=-pi/2:pi/20:pi/2
PHI=-pi/10:pi
[X,Y]=meshgrid(TEFTA,PHI);
funix=cos(X).*cos(Y);
funiy=cos(X).*sin(Y);
funiz=sin(X);
for i=1:length(TEFTA);
for j=1:length(PHI);
funi=[funix(i,j);funiy(i,j);funiz(i,j)];
muni=[0;0;0;funix(i,j);funiy(i,j);funiz(i,j)];
am=ctotl*muni;
ZF(i,j)=af(4);
ZM(i,j)=am(4);
end
end
figure(1)
[fmaz,iz]=max(ZF);
[fmay,iy]=max(fmax)
hold on
plot3(TEFTA(iy,iz),PHI(iz),ZF(iy,iz),iz))
xlabel('anel4');
ylabel('teta');
xlabel('phi');
title('força no anel 4 para força unitária genérica');
figure(2)
nmax=max(ZM);
nmin=min(ZM);
surf(X,Y,ZM);
xlabel('anel4');
ylabel('teta');
xlabel('phi');
title('força no anel 4 para momento unitário genérica');
```

força no anel 4 para força unitária genérica



força no anel 4 para momento unitário genérica

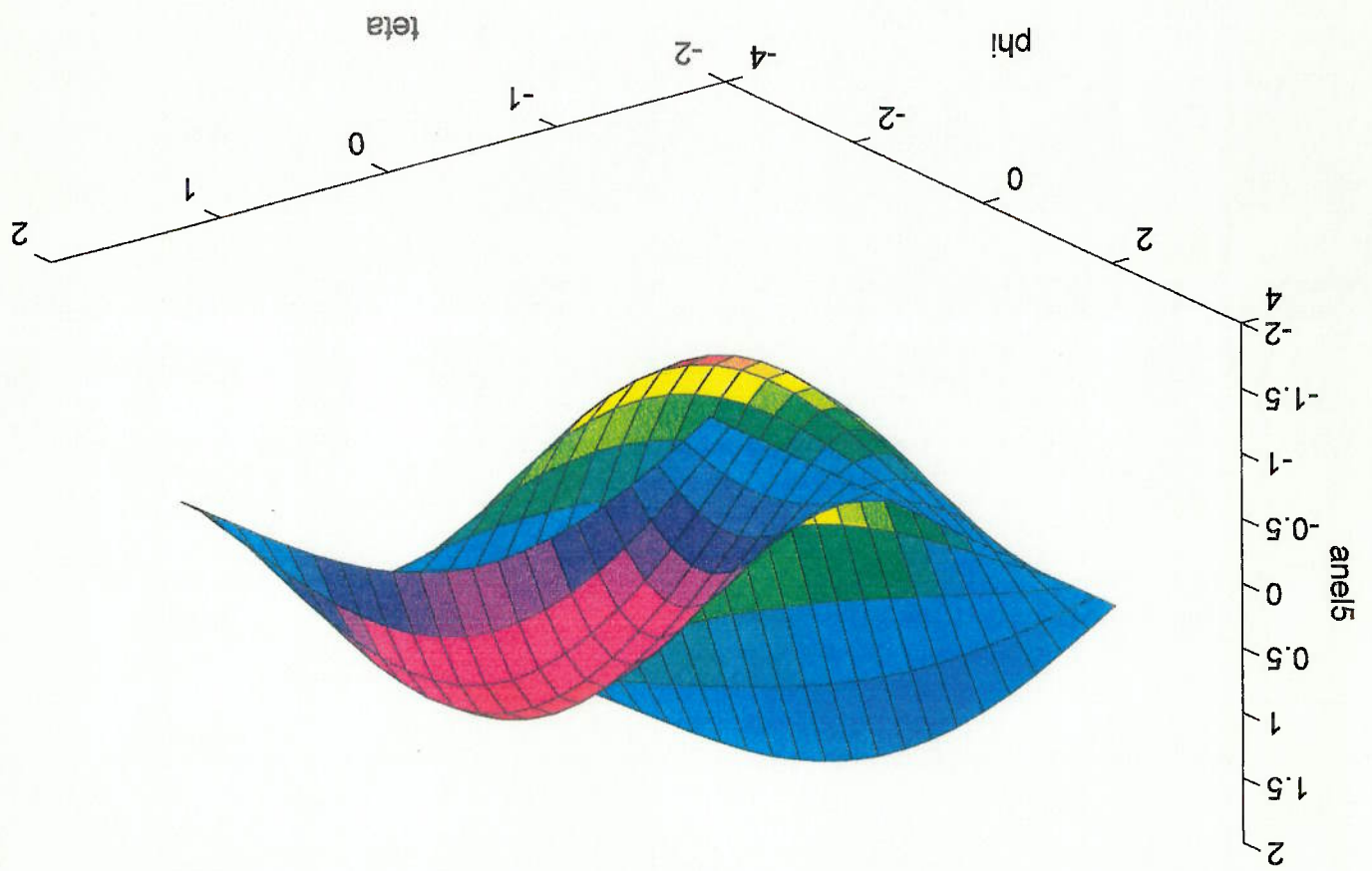


```

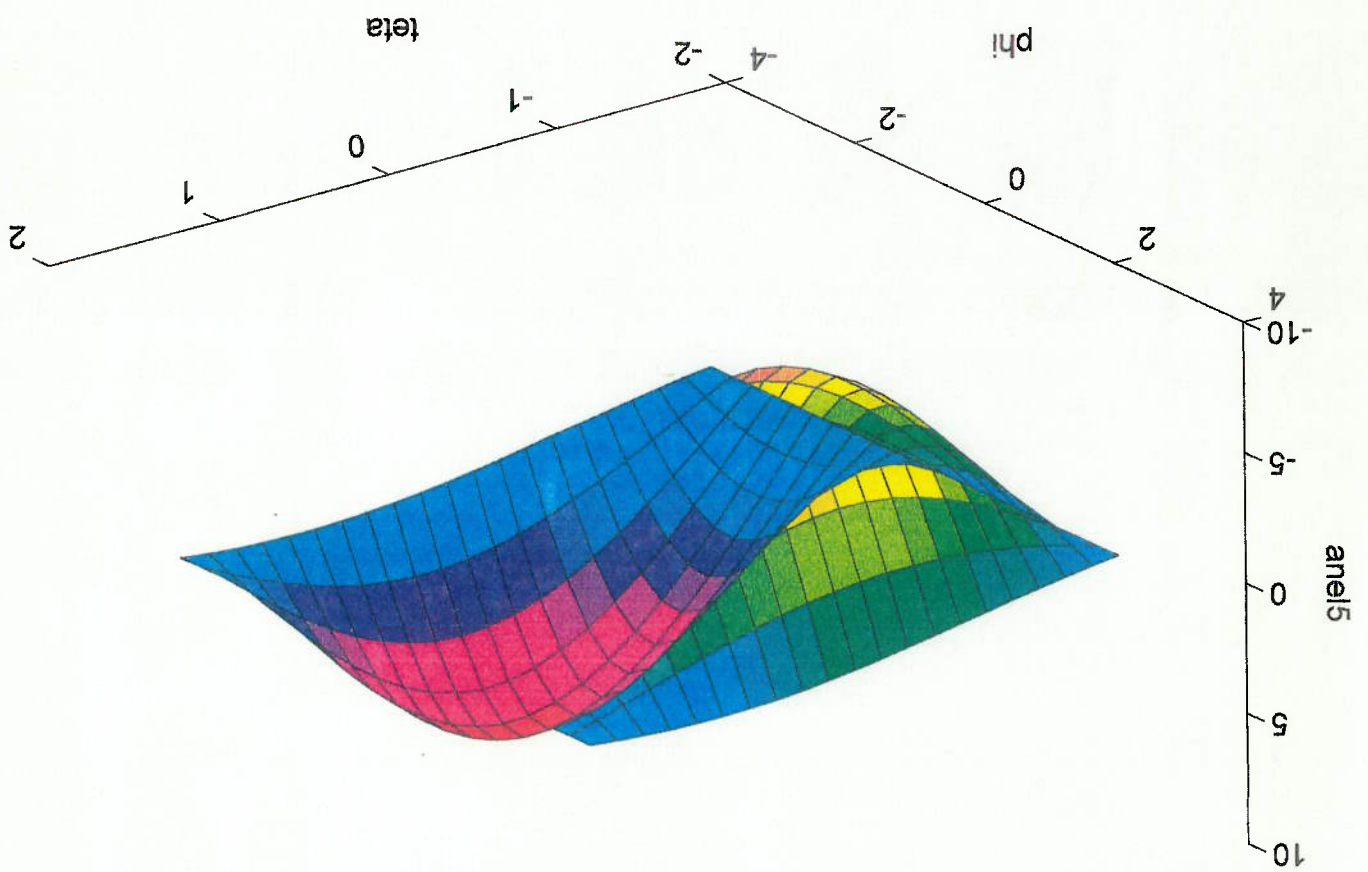
TEFTA=-pi/2:pi/20:pi/2
PHI=-pi/10:pi
[X, Y]=meshgrid(TEFTA, PHI);
funix=cos(X).*cos(Y);
funiy=cos(X).*sin(Y);
funiz=sin(X);
for i=1:length(TEFTA);
  for j=1:length(PHI);
    funi=[funix(i,j); funiy(i,j); funiz(i,j)];
    funi=[0;0;0;funix(i,j); funiy(i,j); funiz(i,j)];
    af=ctotl*funi;
    am=ctotl*munl;
    ZF(i,j)=af(5);
    ZM(i,j)=am(5);
end
end
figure(1)
[imax,i1]=max(ZF);
[fmmax,i2]=max(fmax);
surf(X, Y, ZF);
hold on
plot3(TEFTA(i1:i2), PHI(i1:i2), ZF(i1:i2), i2)
xlabel('teta');
ylabel('phi');
title('Força no anel 5 para força unitária genérica');
figure(2)
[imax,max(ZM)];
[fmmin=min(ZM)];
surf(X, Y, ZM);
xlabel('anel5');
ylabel('teta');
title('Força no anel 5 para momento unitário genérica');

```


força no anel 5 para força unitária genérica



força no anel 5 para momento unitário genérica

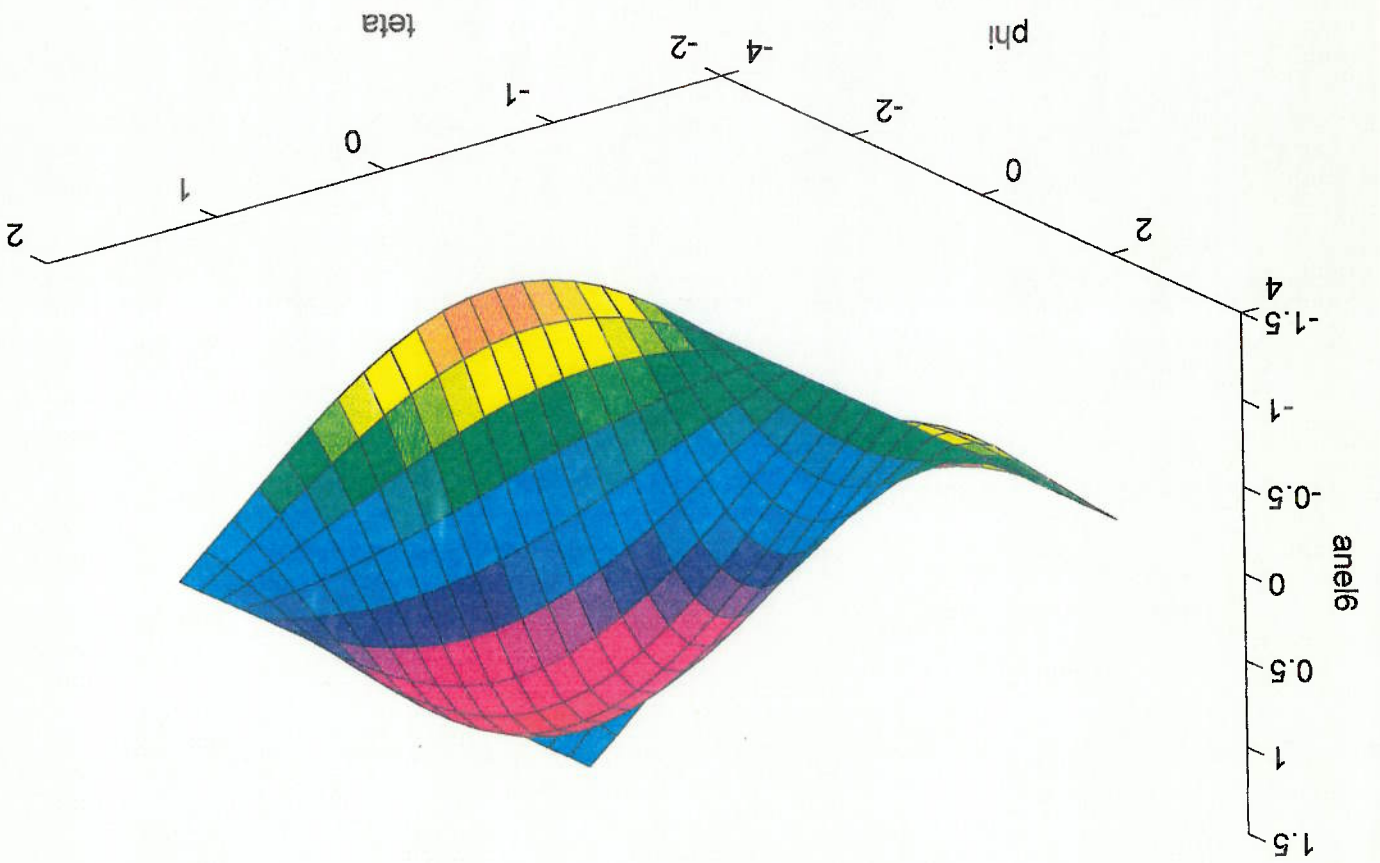



```

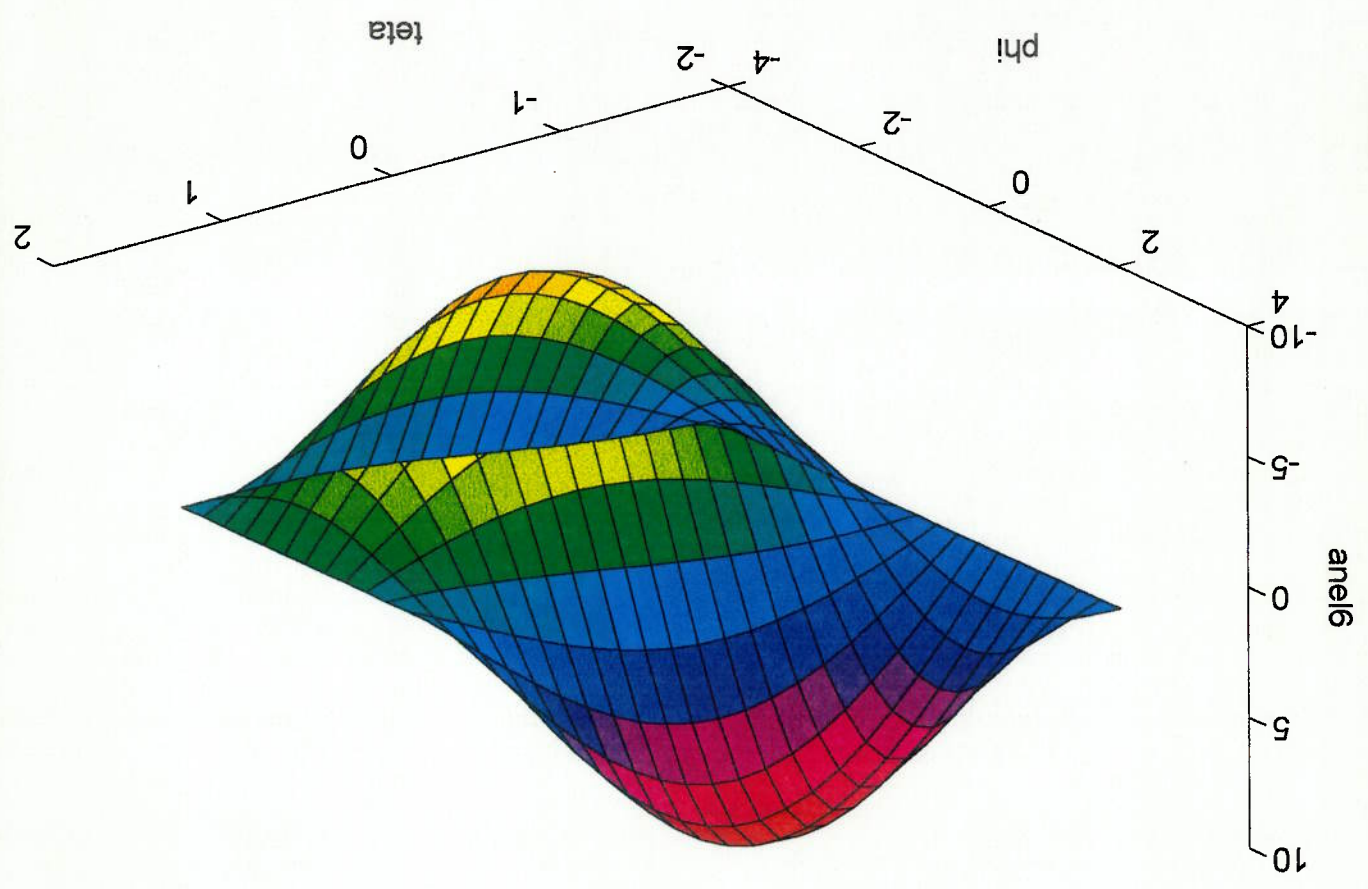
TEFTA=-pi/2:pi/20:pi/2
PHI=-pi:pi/10:pi
[X,Y]=meshgrid(TEFTA,PHI);
funix=cos(X).*cos(Y);
funiy=cos(X).*sin(Y);
funiz=sin(X);
for i=1:length(TEFTA);
for j=1:length(PHI);
funi=[funix(i,j);funiy(i,j);funiz(i,j)];
am=ctotl*funi;
ZF(i,j)=af(6);
ZM(i,j)=am(6);
end
end
figure(1)
[fmax,i1]=max(ZF)
[fmax,i2]=max(fmax)
surf(X,Y,ZF);
hold on
plot3(TEFTA(i1:i2),PHI(i1:i2),ZF(i1:i2),i2)
xlabel('teta');
ylabel('phi');
title('Força no anel 6 para força unitária generica');
figure(2)
mmax=max(ZM)
mmin=min(ZM)
surf(X,Y,ZM);
xlabel('anel6');
ylabel('teta');
title('Força no anel 6 para momento unitário generica');

```

força no anel 6 para força unitária genérica



força no anel 6 para momento unitário genérica

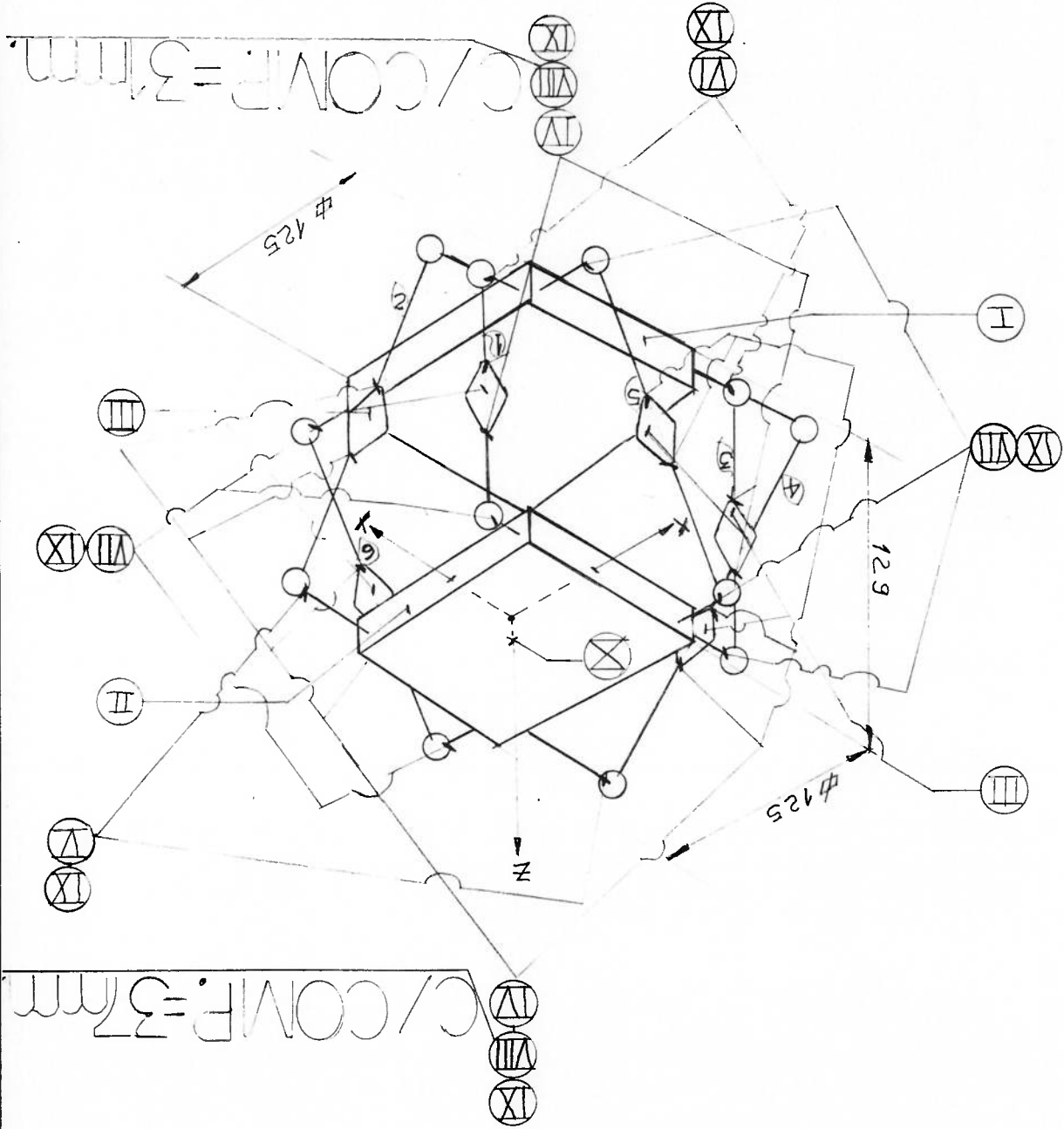


SUB-SISTEMA DE MEDICÇÃO

APÊNDICE II

DINAMOMETRO

IX C/COMP=1mm.



Lista de Peças do Dinamômetro

Nº	Denominação	Material	Quant.
I	Base	Aço	1
II	Plataforma	Aço	1
III	Anel	Alumínio	6
IV	Paraf. cab. sext. + For. sext. / M8x1.25 / COMP. 17mm	Latao	12
V	Paraf. esp. cab. sext. + For. sext. / M8x1.25 / COMP. 17mm	Latao	2
VI	Paraf. esp. cab. sext. + For. sext. / M8x1.25 / COMP. 17mm	Latao	2
VII	Paraf. cab. sext. + For. sext. / M8x1.25 / COMP. 17mm	Latao	6
VIII	Haste / Diam. 4.5mm / COMP. 31mm	Aço	4
IX	Haste / Diam. 4.5mm / COMP. 37mm	Aço	8
X	Paraf. cab. red. fendida / M3 / COMP. 11mm	Aço	24
XI	Gancho / Diam. 4mm + For. sext. / M4	Aço	1

⊕

BASE

ACO

91

3.175

34

57

⌀ 125 x espesor ra = 3.175 (1/4")

118.65

⊕ ⊗

⊕ ⊗

34

91

3.175

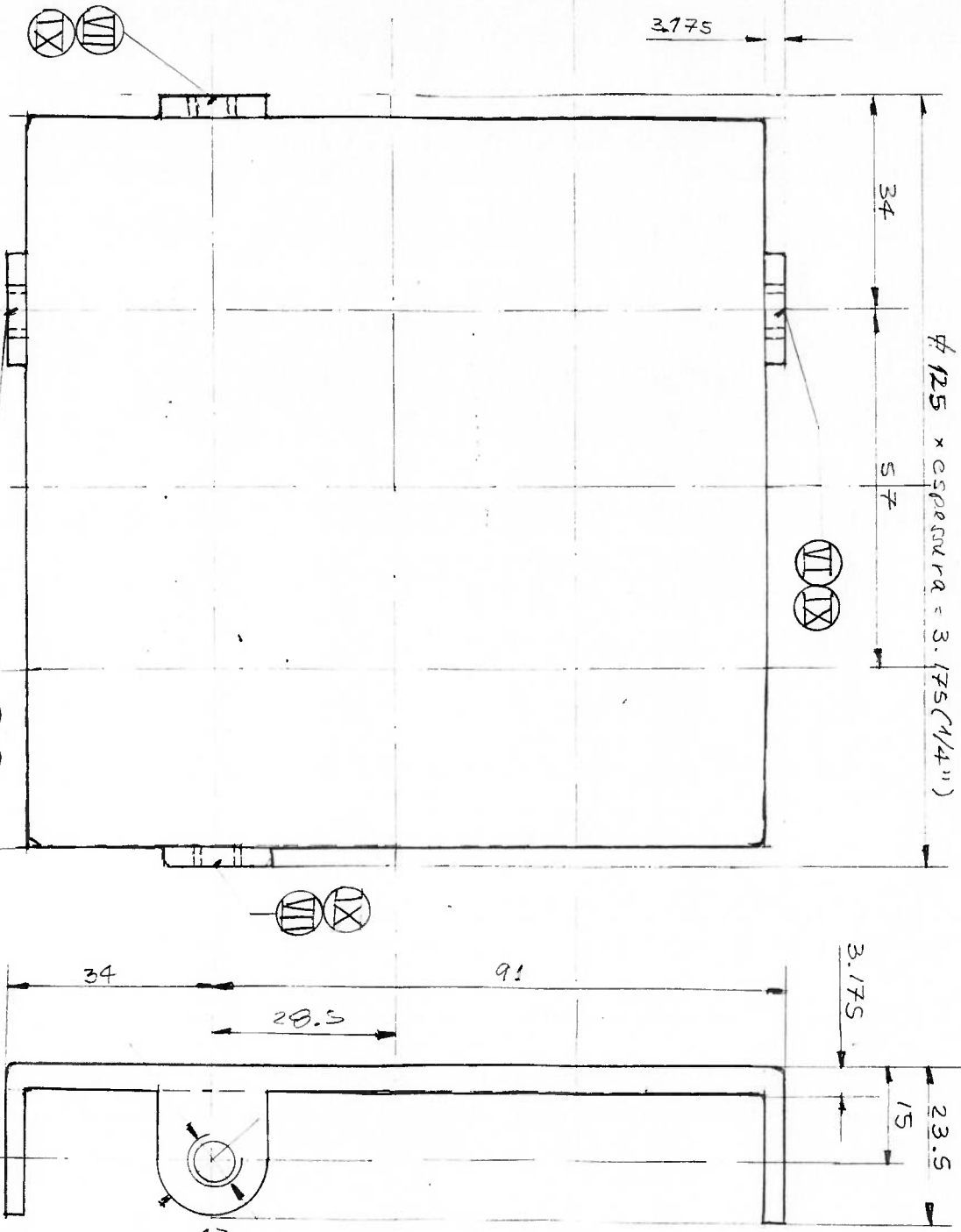
23.5
15

28.5

17

r 8.5

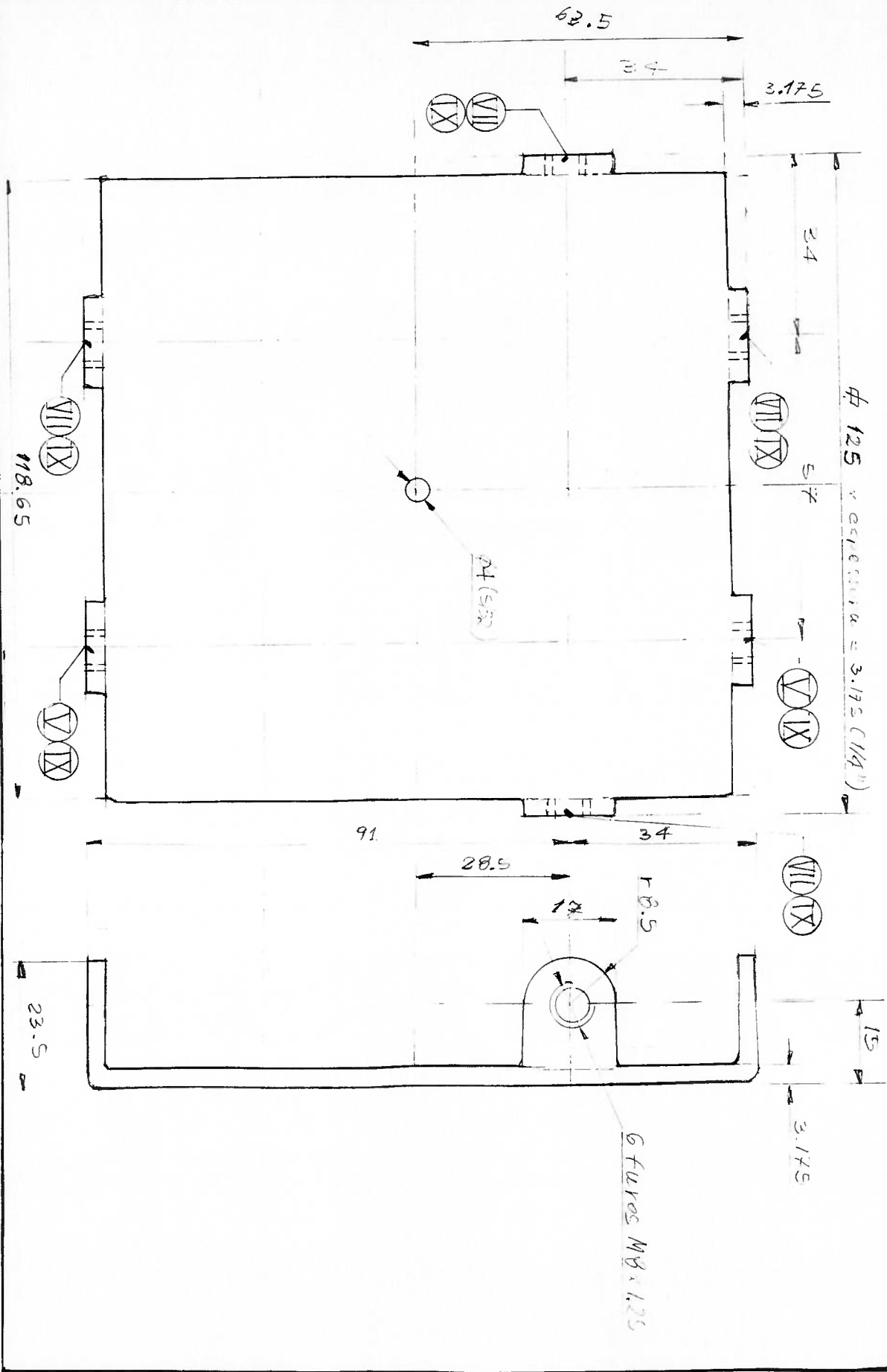
4 FURROS M5.12.5



PLATAFORMA ACO

PLATAFORMA ACO

II



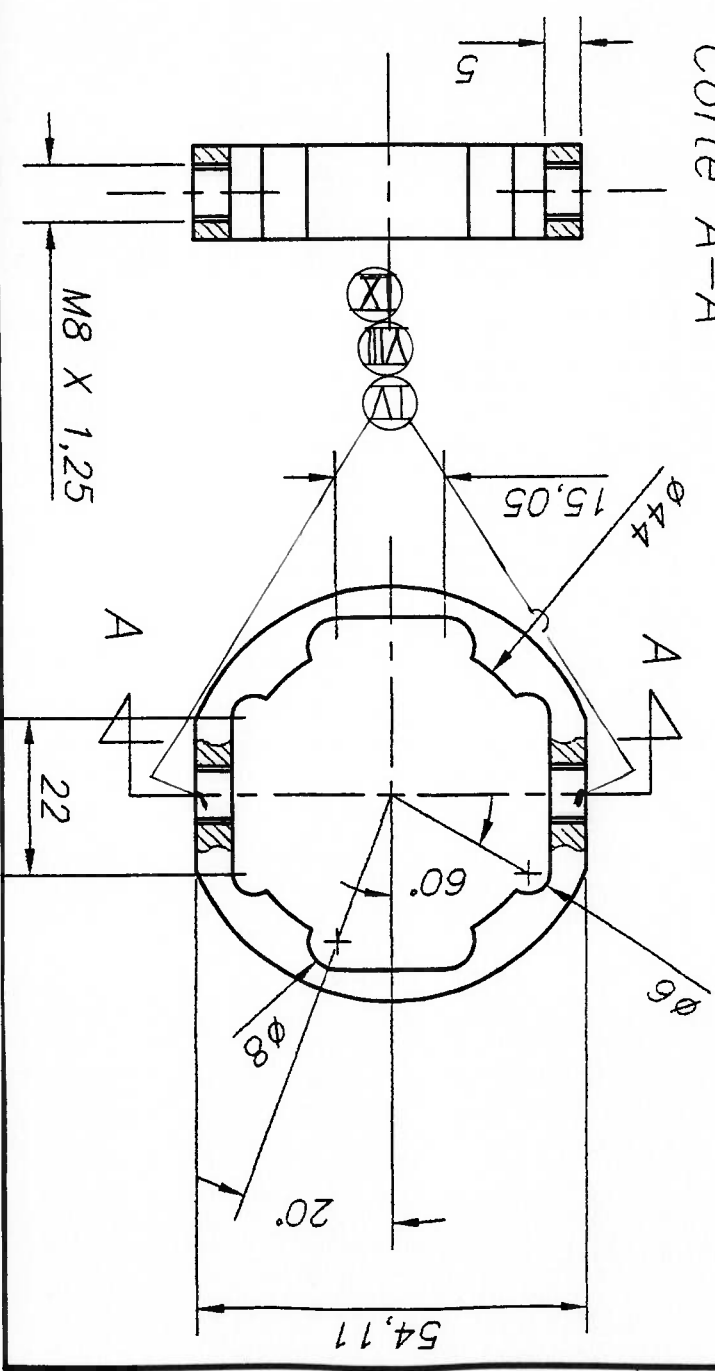
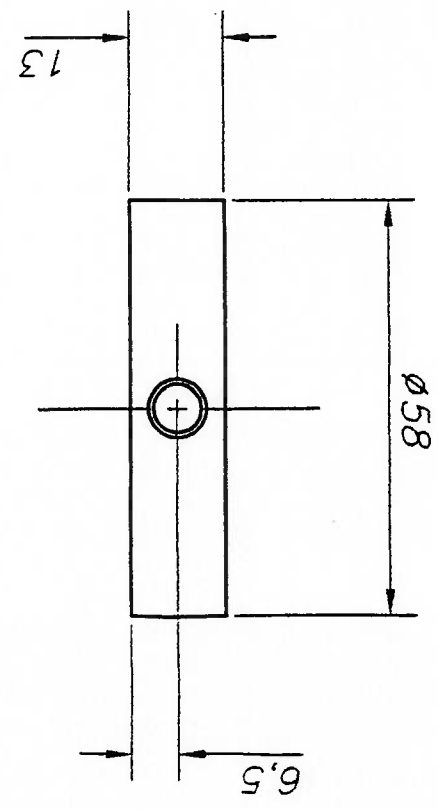


ANEL

ALUM.

Tolerancias Gerais: $\pm 0,03$

Corte A-A



208915-1

BLH
SWITCHING AND
BALANCING UNIT
MODEL 225

A DIVISION OF BALDWIN-LIMA-HAMILTON CORPORATION
42 FOURTH AVENUE, WALTHAM, MASS. 02154 • AREA CODE 617 894-6700

BLH ELECTRONICS



Designed and Manufactured by

FOR BLH
MODEL 225
SWITCHING AND BALANCING
UNIT

INSTRUCTION MANUAL

TABLE OF CONTENTS

Section 1..... General Information

Section 2..... Description

Section 3..... Installation

Section 4..... Operation

Section 5..... Calibration

Section 6..... Maintenance

Section 7..... Trouble Shooting

Section 8..... Specifications

Section 9..... Component Part List

Appendix..... Product Data Sheets

SECTION 1
GENERAL INFORMATION

1.0 GENERAL.

The Model 225 Switching and Balancing Unit, Figure 1, provides a means by which a group of up to ten 2 or 4 arm bridge outputs can be monitored in succession on one strain indicator. When monitoring of more than 10 strain gage outputs is necessary, two or more switching and balancing units can be stacked and their output terminals connected in parallel to the indicating instrument. This provides an additional number of channels. Each channel can be balanced on zero, or a desired reference point, over a nominal range of ± 7000 microinches per inch.

Measurements can be made with both 2 and 4 arm gage bridges in the same test. It is recommended that all operators read Section 3, Installation, and Section 4, Operation, prior to wiring and operating this unit.

The Model 225 Switching and Balancing Unit, Figure 1, provides a means by which a group of up to ten 2 or 4 arm bridge outputs can be monitored in succession on one strain indicator. When monitoring of more than 10 strain gage outputs is necessary, two or more switching and balancing units can be stacked and their output terminals connected in parallel to the indicating instrument. This provides

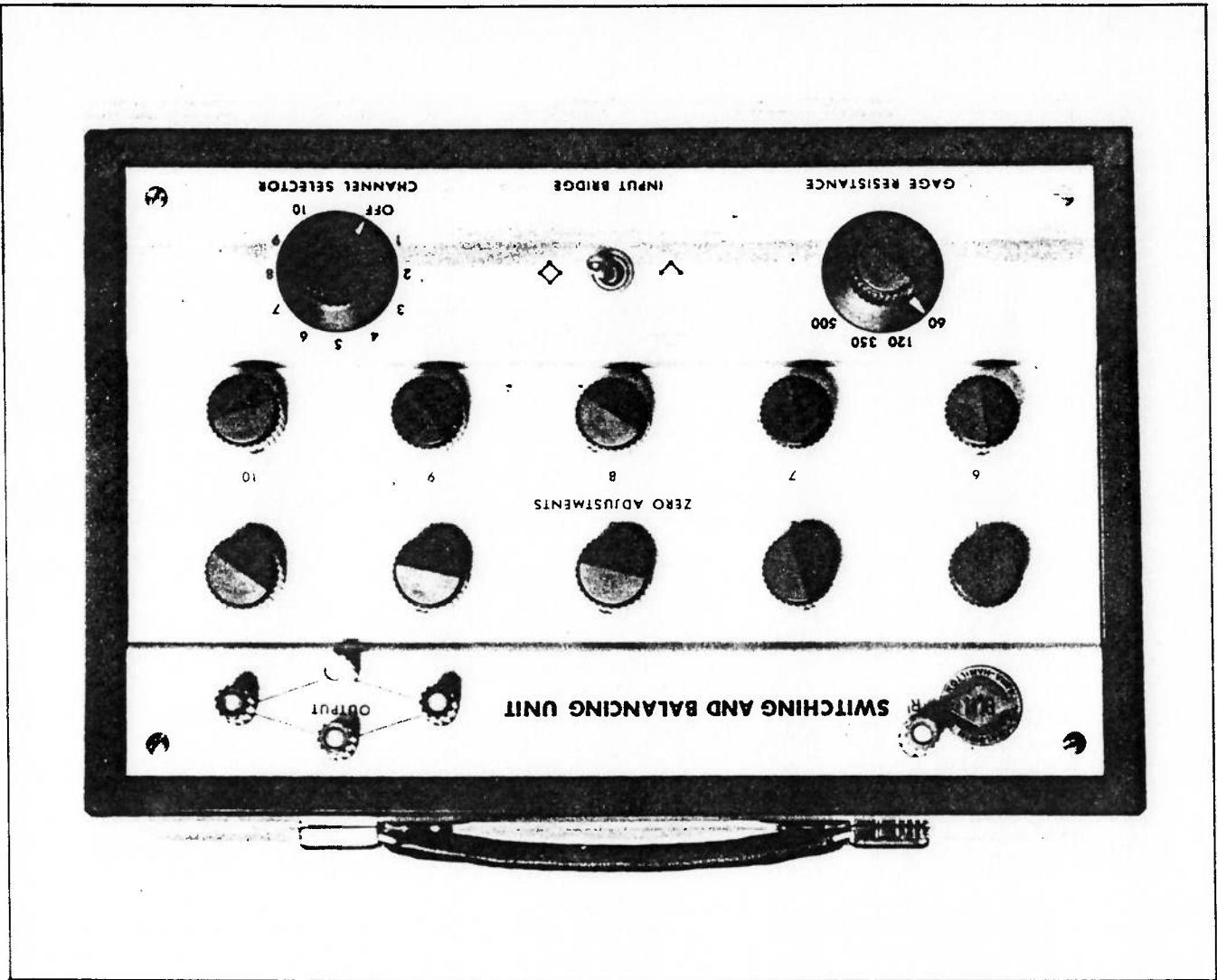


Figure 1. MODEL 225 Switching and Balancing Unit

2.0 DESCRIPTION

2.1 The Model 225 Switching and Balancing unit is contained in a Formica case having a convenient carrying handle. The front panel contains the balancing potentiometers, gage resistance switch, input bridge selector switch, channel selector switch, and a set of 5 output terminals. The rear panel contains 10 groups of 5 terminals each for connecting the various gage configurations. Engraved instructions for three of the most common methods of gage operations are on the lower section of this panel.

2.2 The BALANCING POTENTIOMETER shafts are friction loaded so they will maintain their set position. By adjusting the respective Balancing Potentiometer, each set of gages selected thru the channel selector switch can be either balanced or set to a reference level over a nominal range of ± 7000 microinches per inch. Each potentiometer is connected across the gage excitation thru its respective channel selector switch position. The slider arm output passes thru its respective channel selector switch position to the Gage Resistance switch.

2.3 The GAGE RESISTANCE switch maintains the full balancing range when using strain gages of 60, 120, 350, or 500 ohms for full bridge (four arm) operation. The gage resistance switch should be set to the value of the internal resistors of the strain indicator in use for two arm bridge operation to achieve full balancing range, regardless of the value of the external measured gage resistance.

2.4 The INPUT BRIDGE selector switch selects either two arm bridge input or four arm bridge input. When positioned on two arm input the output of the balancing potentiometer is connected to the center of the internal half bridge of the strain indicator through the 'R' terminal. When positioned on four arm input the 'R' terminal is disconnected from the circuit.

2.5 The CHANNEL SELECTOR switch contains an OFF position and positions for each of the ten channels. Each channel is wired through this selector switch in such a manner that capacitive currents from channels not in use have no path and will not affect the immediate channel in use.

SECTION 2
DESCRIPTION

**SECTION 3
INSTALLATION**

3.0 INSTALLATION

3.1 WIRING. It is advisable to select lead materials which have low, stable resistivity, minimum temperature coefficient of resistance, coated with insulating materials which are equivalent to the electrical insulating quality of the gage carrier and bounding cements employed. The following materials have been found suitable for BLH strain gage use. For other than BLH strain gages consult the manufacturer.

Operating Temperatures °F		Conductors	
		Stable	Maximum
Nickel-clad copper	700	1000	Insulation Temperature Range
Stainless steel-clad copper	800	1300	
Nickel-clad silver	1000	1500	
Nichrome	700	1700	
Nylon	Below -100°F		
Vinyl	-100 to 150°F		Glass impregnated silicone Teflon Polyethylene
	-100 to 200°F		
	-100 to 500°F		
	above 500°F		
	above 500°F		

It is preferable to solder connections to the gage lead wires. Clean, tinned spade type lugs soldered to the lead wires are preferable for connections to the binding posts of the instrument. Stranded wire, if used, should have all strands intact and special care should be taken to see that all strands are soldered.

3.2 When the lead wire lengths are more than 50 feet, special circuits or shielding may be necessary. Where this equipment is being operated in the vicinity of strong electrical disturbances, it may be necessary to use shielded cable for the leads. The shield of this cable should be grounded at only one point.

3.3 PRECAUTIONS. To obtain maximum accuracy and performance, certain precautions should be taken, as follows:

a. Make certain that the lead wires from the active and compensating gages to the Switching and Balancing Unit are the same length.

b. All cable and shields should be connected before any channel is set to zero or a reference.

c. When using shielded leads the shields should be connected to the "W" terminal of their respective channels.

3.4 GAGE CONNECTIONS. In making the following connections to the Switching and Balancing unit refer to the respective engraved bridge configurations of Figure 2.

A. TWO ARM BRIDGE, WITH OWN COMPENSATING GAGE

When the gage configuration consists of a single or a group of active gages each with its own compensating gage, make the gage lead wire connections to the Switching and Balancing unit as follows:

1. Connect a two arm gage configuration to channel 1 input terminals as shown in Figure 2 (TWO ARM).
2. Connect a two arm gage configuration to channel 2, 3, etc. input terminals for as many half bridges as desired up thru channel 10.

B. TWO ARM BRIDGE, COMMON COMPENSATING GAGE

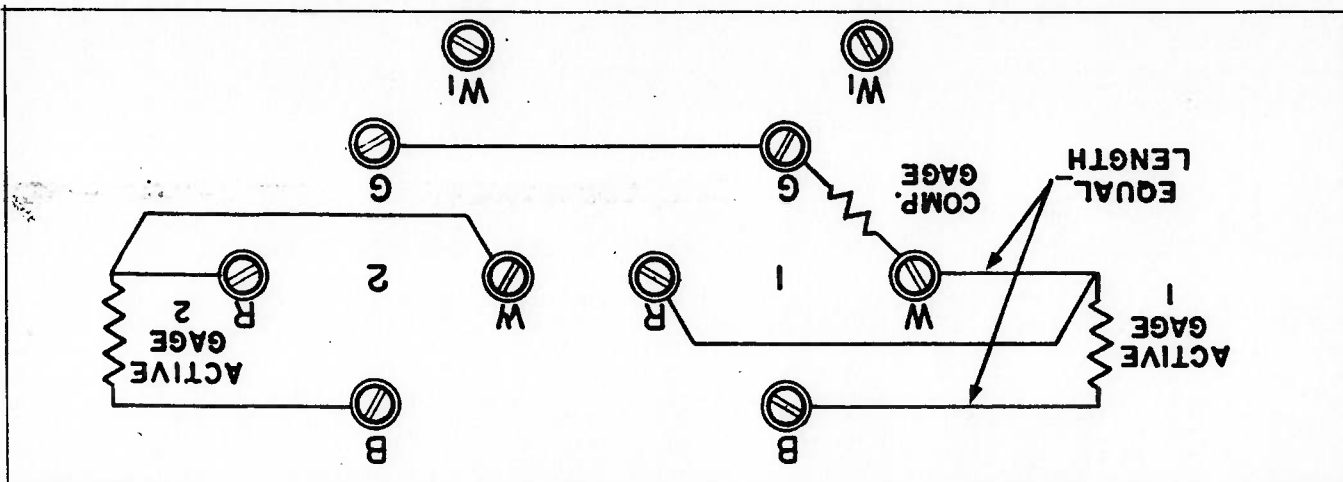
When the gage configuration consists of a group of active gages all served by a common compensating gage, make the gage connections to the Switching & Balancing unit as follows:

- (1) Connect a two arm gage configuration to channel 1 input terminals as shown in Figure 2 (TWO ARM).
- (2) Connect the remaining active gages to the "B" & "W" input terminals of channels 2, 3, 4 etc., as required, up thru channel 10.
- (3) Tie all the "G" terminals of the channels used to the "G" terminal of channel 1.

C. TWO ARM BRIDGE, 3 WIRE

When the gage configuration consists of a single or a group of this type half bridge make the gage connections to the Switching and Balancing unit as follows:

- (1) Connect the active gage lead wires (3 wires) to the "B", "W" & "W" input terminals of channel 1, see Figure 2 (TWO ARM, 3 WIRE).



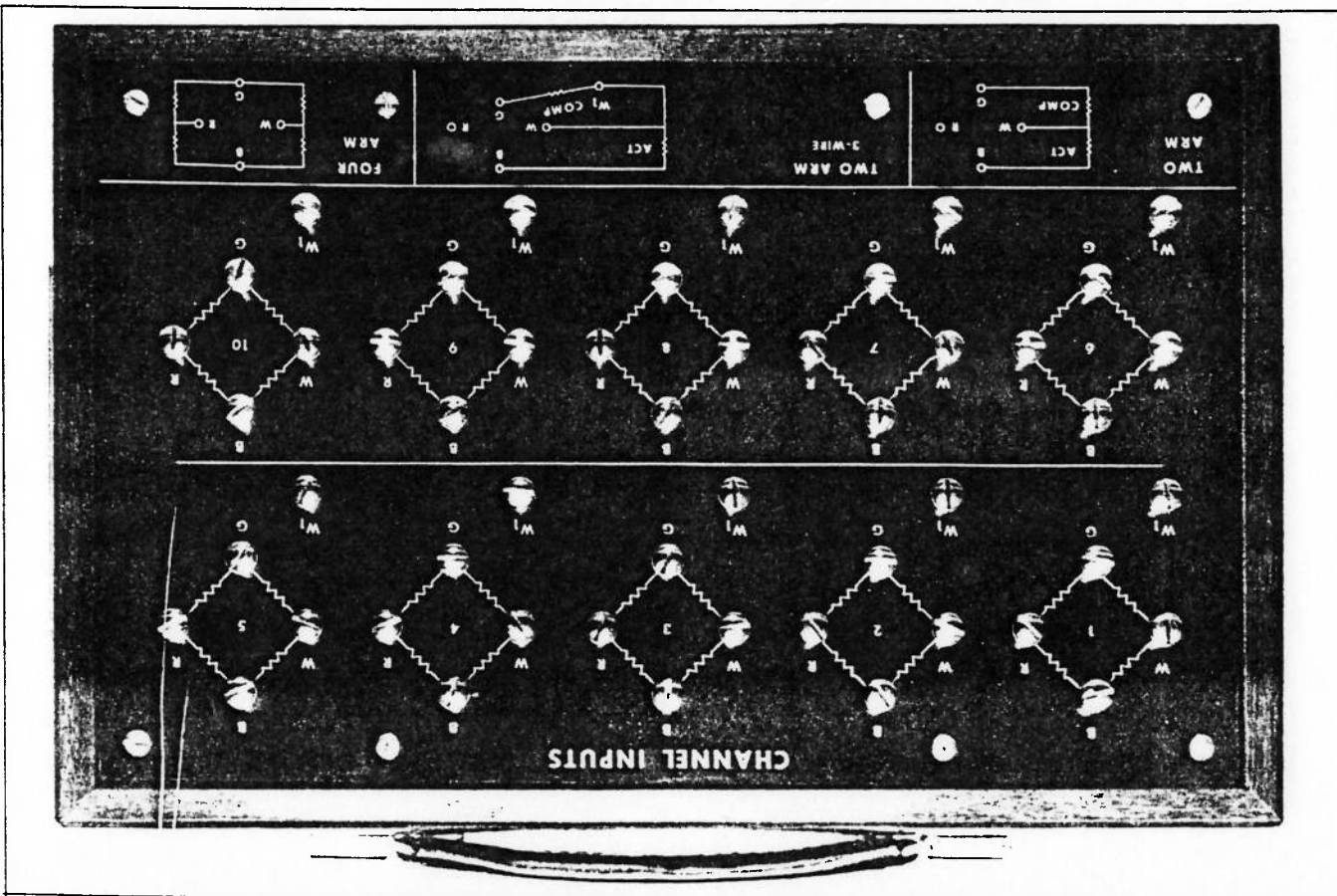
- (2) Connect the active gage leads (3 wires) to terminals "B", "R" and "W" of channel 1.
- (3) Connect all other active gages (3 wire) to terminals "B", "R" and "W" of channels 2, 3, 4 up thru channel 10. The leads for each active gage to the "B" and "W" terminals should be the same length.
- (4) Common all "G" terminals in use for a group.

When the gage configuration consists of this type of half bridge make the gage connections to the Switching and Balancing unit as follows:

(1) Connect the compensating gage between terminals "G" and "W" of channel 1.

D. TWO ARM BRIDGE, 3 WIRE, COMMON COMPENSATING GAGE

Figure 2. Rear Panel of Switching & Balancing Unit



- (2) Connect the compensating gage between "W" and "G" input terminals of channel 1.
- (3) Repeat (1) & (2) for channel 2, 3 etc. for as many channels as necessary up thru channel 10.

E. FOUR ARM BRIDGE

When the gage configuration consists of one or more full bridges make the connections to the Switching & Balancing Unit as follows:

(1) Connect each full bridge to a set of channel input terminals as shown in figure 2 (FOUR ARM): strain gage bridge #1 to channel 1, strain gage bridge #2 to channel 2, etc. thru strain gage bridge #10 to channel 10.

(2) Where increased measuring sensitivity is desired use two active and two compensating gages connected alternately around the bridge loop. The indicated strain will be twice the actual strain since the two active gages will produce an additive effect in unbalancing the bridge. This arrangement has been used effectively where the strains to be measured are very small.

3.5 CONNECTING TO STRAIN INDICATOR. In connecting the Switching & Balancing Unit to a Strain Indicator, three types of indicators are considered: the Model 120, the Model 100N, and the Type "M".

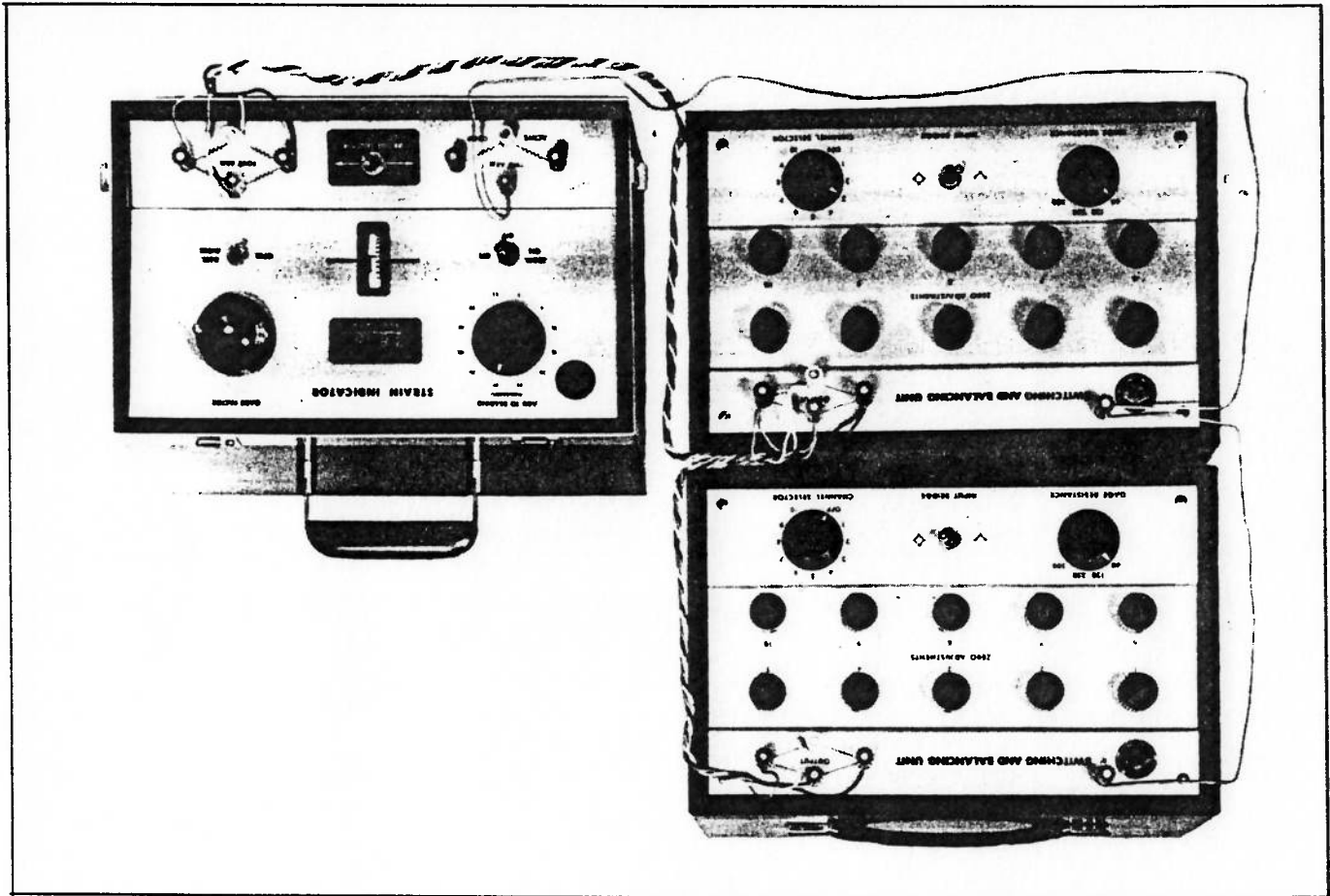
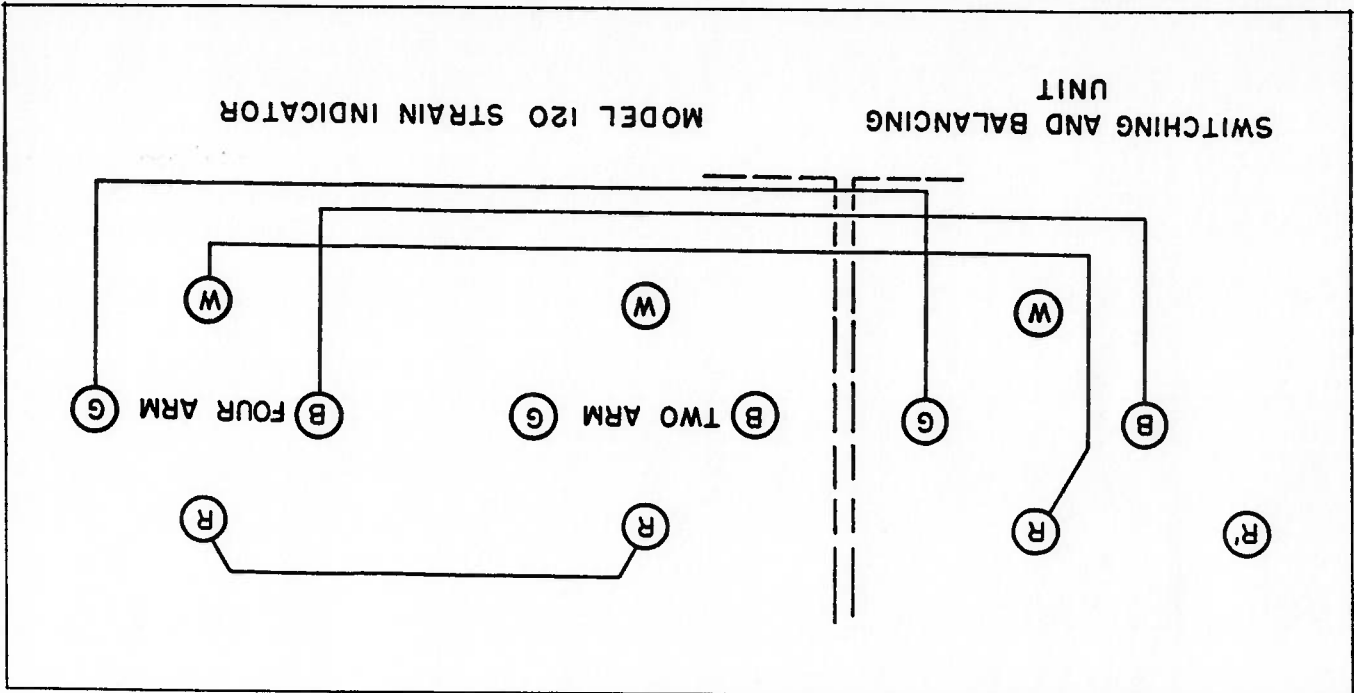
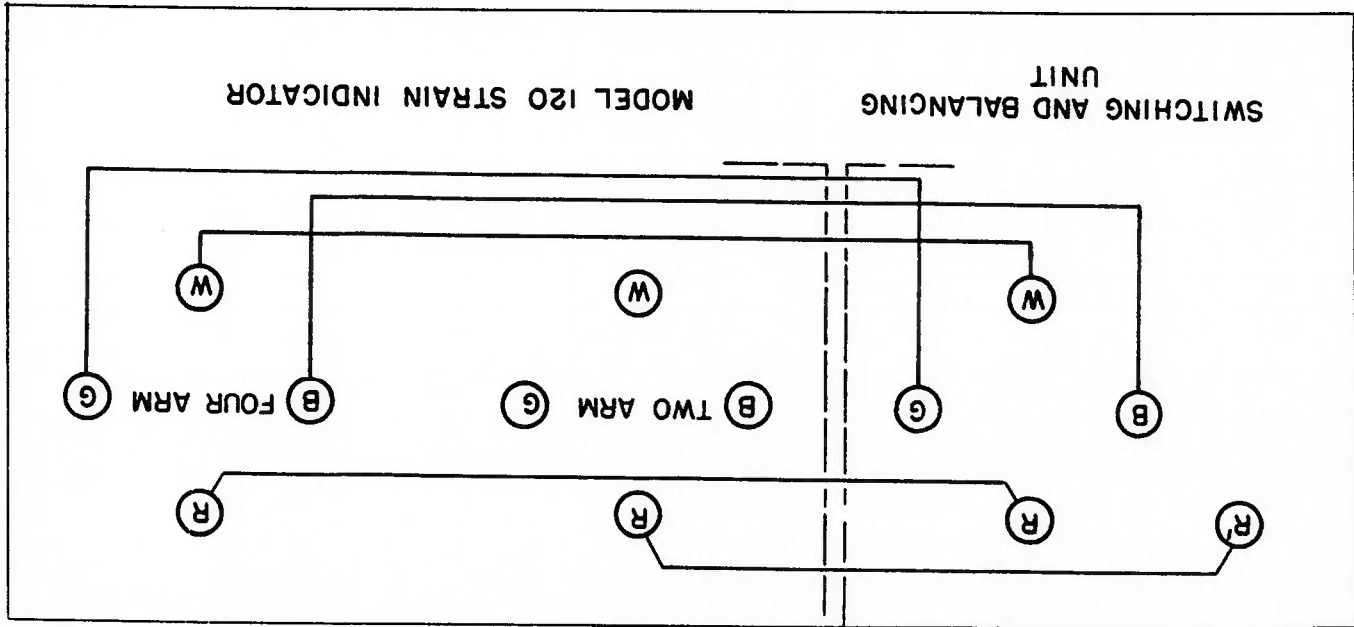


Figure 3. Stacked Switching and Balancing Units



(2) For monitoring the 3-wire, common compensating configurations, connect the Switching & Balancing Unit to the Strain Indicator in the following illustrated manner.

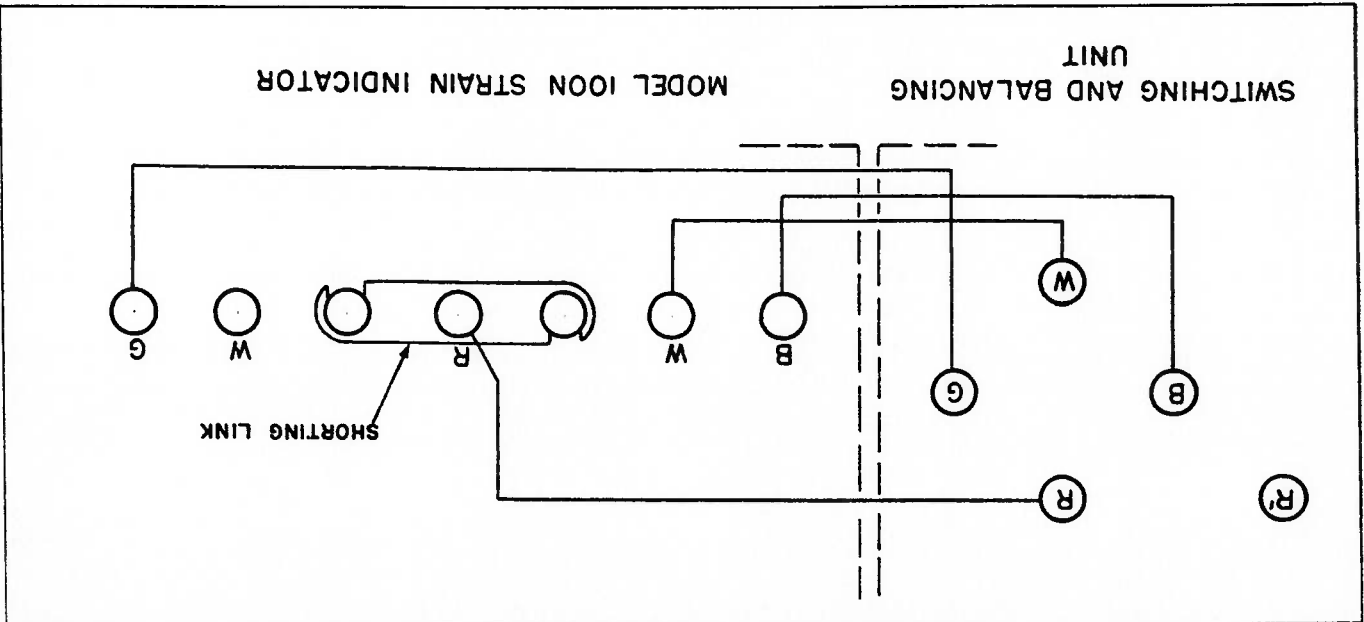


(1) Connect the Switching & Balancing Unit to the Strain Indicator in the following illustrated manner for monitoring all types half-bridge configuration except the 3-wire, common compensating configuration.

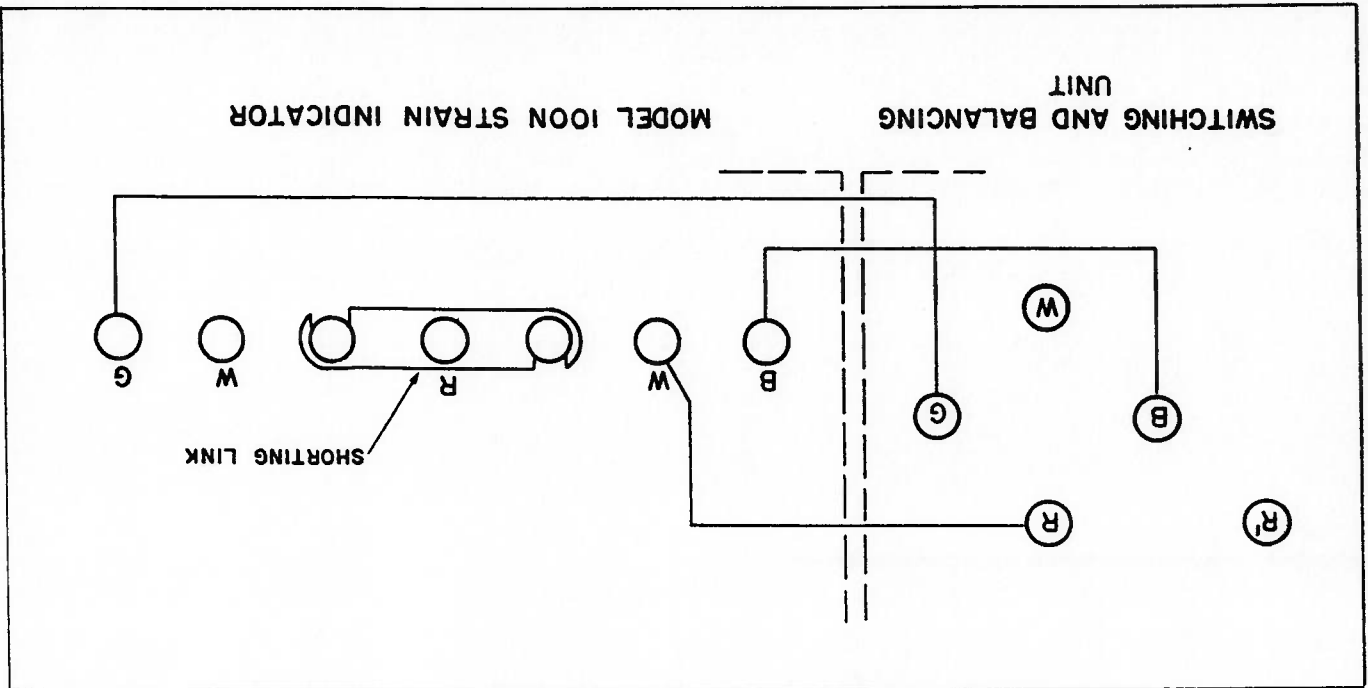
A. CONNECTIONS TO MODEL 120 STRAIN INDICATOR

B. CONNECTIONS TO MODEL 100N STRAIN INDICATOR

(1) Connect the Switching & Balancing unit to the Strain Indicator in the following illustrated manner for monitoring all types half-bridge configurations except the 3-wire, common compensating gage configuration.

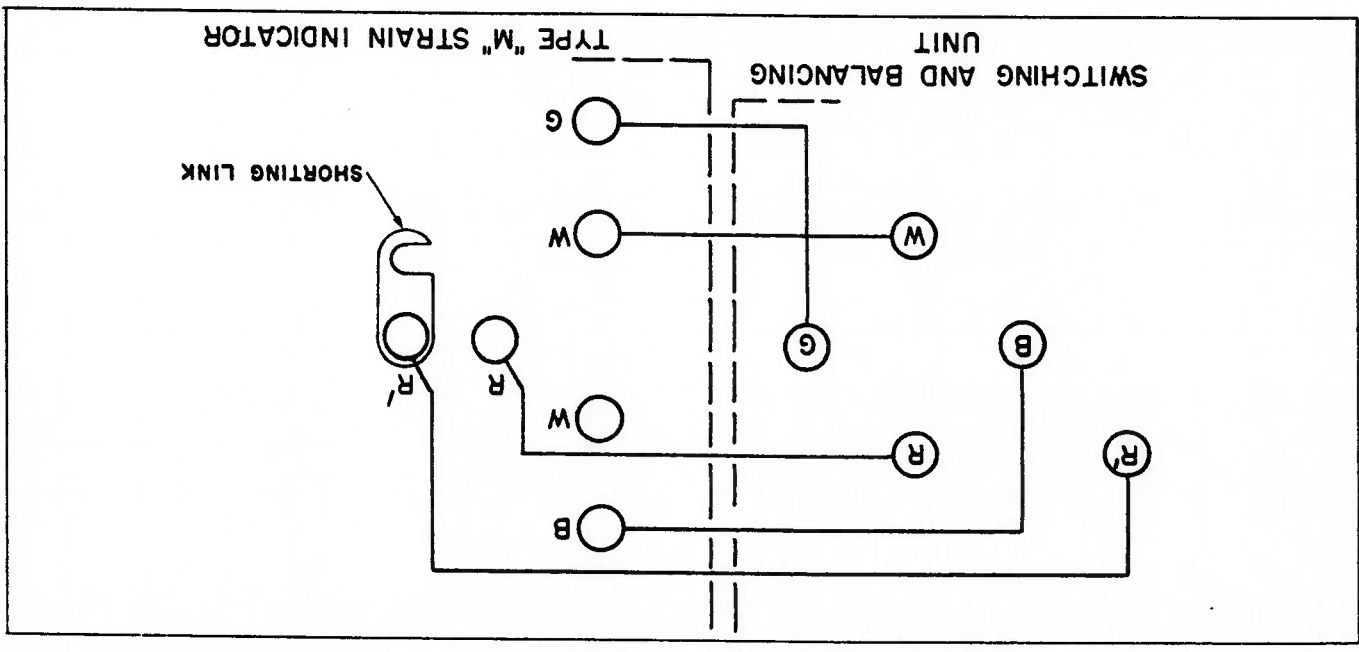


(2) When using the 3-wire, common compensating gage configuration make the connections from the Switching & Balancing Unit to the Type "N" Strain Indicator as follows:

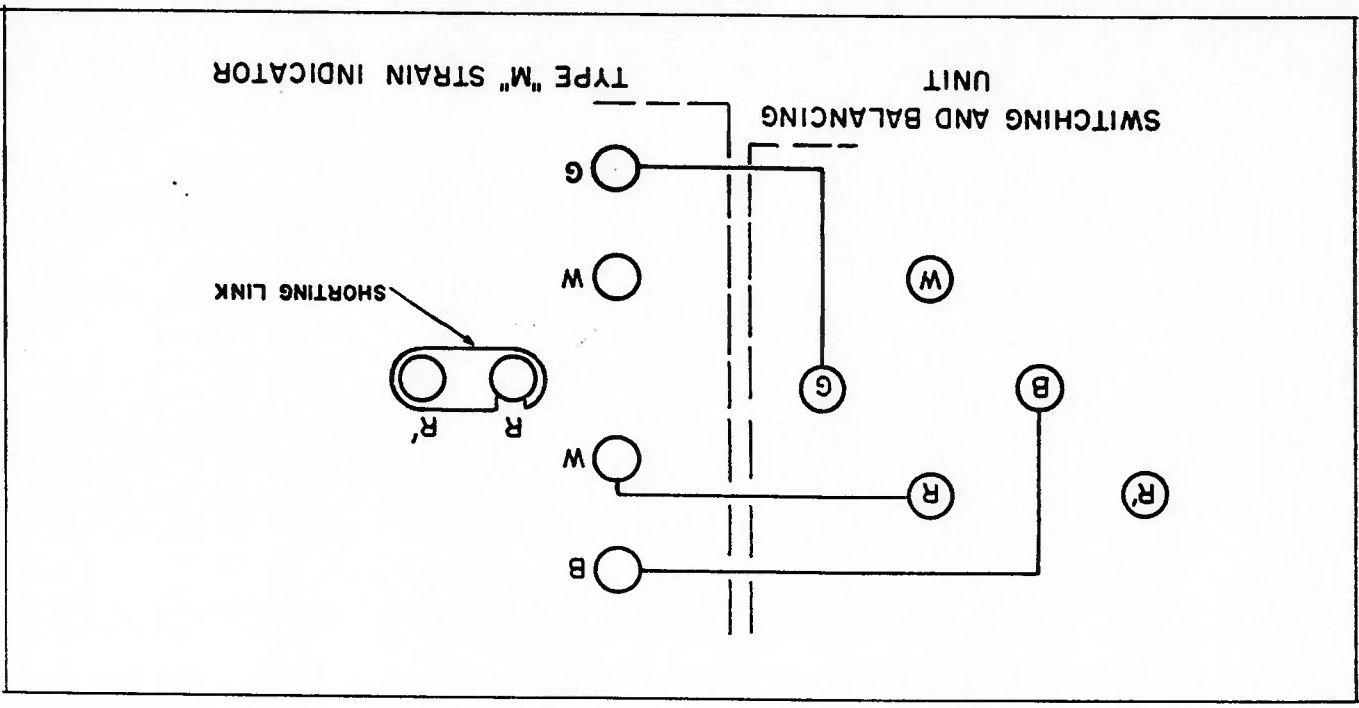


C. CONNECTIONS TO TYPE "M" STRAIN INDICATOR

(1) For monitoring all types of half-bridge configurations except the 3-wire, common compensating gage configuration make the connections from the Switching and Balancing Unit to the Type "M" Indicator as illustrated below:



(2) When using 3-wire, common compensating gage configuration make the connections from the Switching and Balancing Unit to the Type "M" Indicator as follows:



**SECTION 4
OPERATION**

4.0 OPERATION

4.1 TWO ARM. For operation when half bridge configurations are monitored proceed as follows:

- A. STRAIN INDICATOR
- 1. MODEL 120 - Position INPUT BRIDGE switch on FOUR ARM position.
- 2. MODEL 100 N - Connect JUMPER LINK.
- 3. TYPE "M" - Disconnect JUMPER LINK. (Connect JUMPER to "R" when using the 3-wire, common compensating gage configuration)

B. SWITCHING AND BALANCING UNIT

- 1. Position INPUT BRIDGE switch on HALF BRIDGE.
- 2. Position GAGE RESISTANCE switch for strain indicator in use, regardless of the value of the gages in use, as follows:

Model 120 - 500 ohms
Model 100 N or "M" - 120 ohms

- 3. With CHANNEL SELECTOR switch on channel 1, set zero or desired reference point using ZERO ADJ. 1. Repeat for each channel in use using the respective ZERO ADJ. for that channel.
- 4. Proceed with strain measurement.

4.2 FOUR ARM. For operation when four arm bridge configurations are monitored proceed as follows:

- A. STRAIN INDICATOR
- 1. MODEL 120 - Position INPUT BRIDGE switch on FOUR ARM position.
- 2. MODEL 100 N - Disconnect JUMPER LINK.
- 3. TYPE "M" - Disconnect JUMPER LINK.

B. SWITCHING AND BALANCING UNIT.

- 1. Position Input BRIDGE switch on FULL BRIDGE.
- 2. Set GAGE RESISTANCE switch to the nearest value of the gages in use.

- 3. With CHANNEL SELECTOR switch on channel 1, set zero or the desired reference point using ZERO ADJ. 1. Repeat for each channel in use using the respective ZERO ADJ. for that channel.
- 4. Proceed with strain measurement.

4.3 CAPACITIVE BALANCE

(a) If the sensitivity (defined as meter divisions versus dial divisions) is not the same for each channel, or if the Strain Indicator is sluggish in one channel, a capacitive unbalance may exist. This capacitive unbalance is caused by the capacitance to ground and the capacitance between leads of each strain gage circuit. To compensate for this, proceed as follows:

- 1. Connect an oscilloscope to the Strain Indicator using the jack connection provided.
- 2. Zero the Indicator.
- 3. Place a decade capacitance box across the dummy gage.

4. Adjust the decade capacitance box until the signal on the oscilloscope is at minimum level. The indicator should be continually adjusted to read zero while the decade capacitance box is being adjusted.

5. If more than one channel is to be compensated, the procedure is the same but the value necessary to eliminate the capacity problem should be noted. Each time that channel is to be used, the decade capacitance box should be adjusted to the correct value for the particular channel.

- 6. If placing a capacitance decade box across the dummy gage does not give a minimum null, the box should then be placed across the active gage. Proceed as noted in step (4).

4.4 SWITCH RESISTANCE. It should be pointed out that the switch resistance tends to increase under circumstances where the switch has not been moved for a long period of time. This is true of even the best switch materials, such as silver. It is always wise, after the Switching & Balancing Unit has stood with one or more switches in a given position for a considerable period, to give the switches several swings back and forth over the full range of their motion. This will dissipate by friction any foreign products which may have built up the switch resistance during the period of inactivity.

4.5 STACKING UNITS - When stacking two or more Switching and Balancing Units proceed with operation of the unit as in paragraph 4.2 or 4.3, however, all Switching and Balancing Units not in use must have the CHANNEL SELECTOR switch on

the OFF position and the INPUT BRIDGE switch on the FULL BRIDGE position.

4.6 RECORDING OR INDICATING INSTRUMENTS. The Model 225 Switching and Balancing Unit may be used with any mv/v recording or indicating instrument with the following considerations.

FULL BRIDGE. No special considerations, normal operation.

HALF BRIDGE. If the recording or indicating instrument contains an internal half bridge, connect the junction of this half bridge to the R¹ terminal. Connect the Black and Green terminals to the recorders half bridge excitation and the WHITE terminal to the recorders signal input ground. Set the GAGE RESISTANCE switch to the nearest value of the internal half bridge.

If a half bridge is not contained in the recording or indicating instrument connect two 120 ohm resistors; one across the R¹ and the BLACK terminal, the other across R² and the GREEN terminal of the Switching and Balancing unit. Connect R¹ to the high side of the signal input and the WHITE terminal to the low side or ground of the signal input of the recording instrument, and the BLACK and GREEN terminals to the gage excitation. Set the GAGE RESISTANCE switch on 120 ohms. In either case, the INPUT BRIDGE switch should be positioned on the half-bridge. The 120 ohm resistors should be precision, wire wound, non-inductive, $\pm 1/20\%$ tolerance, and with a temperature coefficient of the wire equal to ± 20 PPM/ $^{\circ}$ C (see Parts List).

**SECTION 5
CALIBRATION**

5.0 CALIBRATION

**5.1 The 10 point Switching and Balancing Unit
requires no calibration.**

6.1 No maintenance is required other than handling the unit as a precision instrument. Reasonable care should be taken in making connections to the rear panel so as not to damage screw terminals.

6.0 MAINTENANCE

**SECTION 6
MAINTENANCE**

SECTION 7
TROUBLE SHOOTING

7.0 TROUBLE SHOOTING

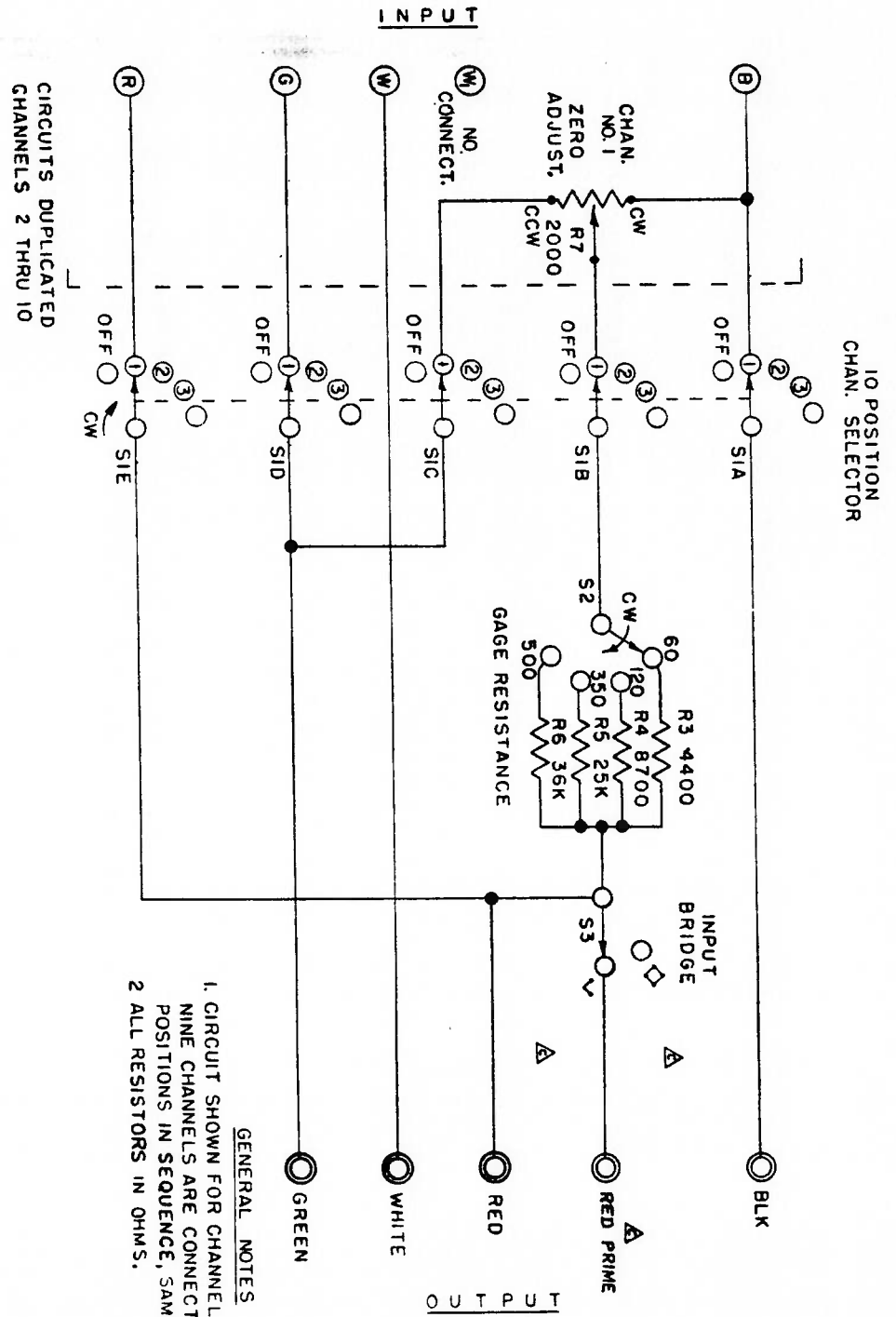
7.1 The circuit has been designed for long trouble free operation. Should trouble occur it may be in the zero adjusting potentiometers or gage resistance switch, refer to Figure 4, wiring diagram, of one channel. All channels are identical.

7.2 To check the continuity of each potentiometer, connect an ohmmeter across the Black and Green output terminals. Rotate the channel selector switch to each channel. Each channel should read 2000 ohms $\pm 5\%$. With all zero adjusting potentiometers fully C. W. the continuity of the slide arm and the gage selector switch may be checked by placing the ohmmeter between the Black and the Red terminal.

By rotating the gage resistance switch through the 60, 120, 350 and 500 ohm positions the following readings should be obtained; 4400 ohms, 8700 ohms, 25 K and 36 K.

7.3 Proper operation of the INPUT BRIDGE Switch can be checked by placing an ohmmeter across R and R' and operating the switch. The ohmmeter should read zero for half bridge operation and open for full bridge operation.

7.4 Check that voltage across the Black and Green output Terminals of the strain indicator is also across the "B" and "G" rear panel terminals of each channel when the channel selector switch is turned to the channel checked.



GENERAL NOTES
 1. CIRCUIT SHOWN FOR CHANNEL 1 ONLY. OTHER NINE CHANNELS ARE CONNECTED TO SWITCH POSITIONS IN SEQUENCE, SAME AS CHANNEL 1.
 2. ALL RESISTORS IN OHMS.

CIRCUITS DUPLICATED CHANNELS 2 THRU 10

Figure 4. Schematic Diagram Switching & Balancing Unit

**SECTION 8
SPECIFICATIONS**

<p>Input Configuration: Full Bridges. Strain gage bridge or strain gage transducers.</p> <p>Half Bridges. Individual compensating gages, common compensating gages, group common compensating gages. 3 or 4 wire.</p> <p>60, 120, 350, 500 ohms on full bridge. 60-2000 ohms on half bridge.</p> <p>$\pm 7000 \mu$ in/in at a gage factor of 2.00.</p> <p>Better than 1μ in/in.</p> <p>Compatible with Model 120 strain indicator.</p> <p>Units can be stacked and inter-connected to give 20, 30, 40 etc. Switching & Balancing points.</p> <p>13" wide x 8 1/2" high x 7 1/2" deep.</p> <p>12 lbs.</p>	<p>Gage Resistances:</p> <p>Zero Adjustment:</p> <p>Switching Repeatability:</p> <p>Industrial Design:</p> <p>Size:</p> <p>Weight:</p>
--	--

Refer to schematic diagram model 225 Switching & Balancing unit, figure 4, for circuit reference.

NOTE

When ordering parts from the factory always include the following information:

INSTRUMENT MODEL NO.

SERIAL NO.

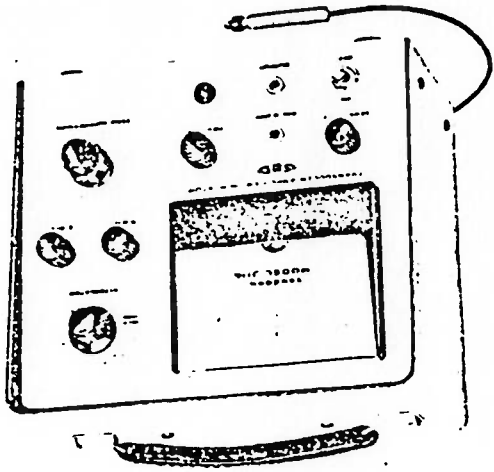
B-L-H PART NO.

DESCRIPTION OF PART

SECTION 9
COMPONENT PARTS LIST

CIRCUIT REF.	PART DESCRIPTION	B-L-H PART NO.	QUAN.
R3	Resistor, fixed, 4400 ohms $\pm 1/2\%$, $1/4W$	Daven Co. #1250	1
R4	Resistor, fixed, 8700 ohms $\pm 1/2\%$, $1/4W$	Daven Co. #1250	1
R5	Resistor, fixed, 25k ohms $\pm 1/2\%$, $1/4W$	Daven Co. #1250	1
R6	Resistor, fixed, 36k ohms $\pm 1/2\%$, $1/4W$	Daven Co. #1250	1
R7-R16	Potentiometer, 2000 ohms, Spectrol Model 860	128635-8	10
S1	Switch, Channel Selector, Leeds & Northrup	133384-8	1
S2	Switch, Gage Res.	132606-8	1
S3	Switch — Toggle,	133533-8	1
Terminal (B)	Binding post — black	133519-8	1
Terminal (G)	Binding post — green	133520-8	1
Terminal (R)	Binding post — red	133518-8	2
Terminal (W)	Binding post — white	133517-8	1
MISCELLANEOUS			
	Ass'y Carrying Case	203423-9	1
	Front Panel	203449-3	1
	Ass'y, Rear Panel	203762-3	1
	Shaft Lock	203456-1	10
	Knob, Zero Adjust	124825-8	10
	Knob, Gage Res. & Channel Sel.	124851-8	2
	Matched Pair 120 ohm Resistors	207152-1	1

HEWLETT hp PACKARD



311-A

TRANSDUCER
AMPLIFIER/INDICATOR

1. The instrument is designed to measure the force exerted by a transducer.
 2. The instrument is designed to measure the force exerted by a transducer.
 3. The instrument is designed to measure the force exerted by a transducer.

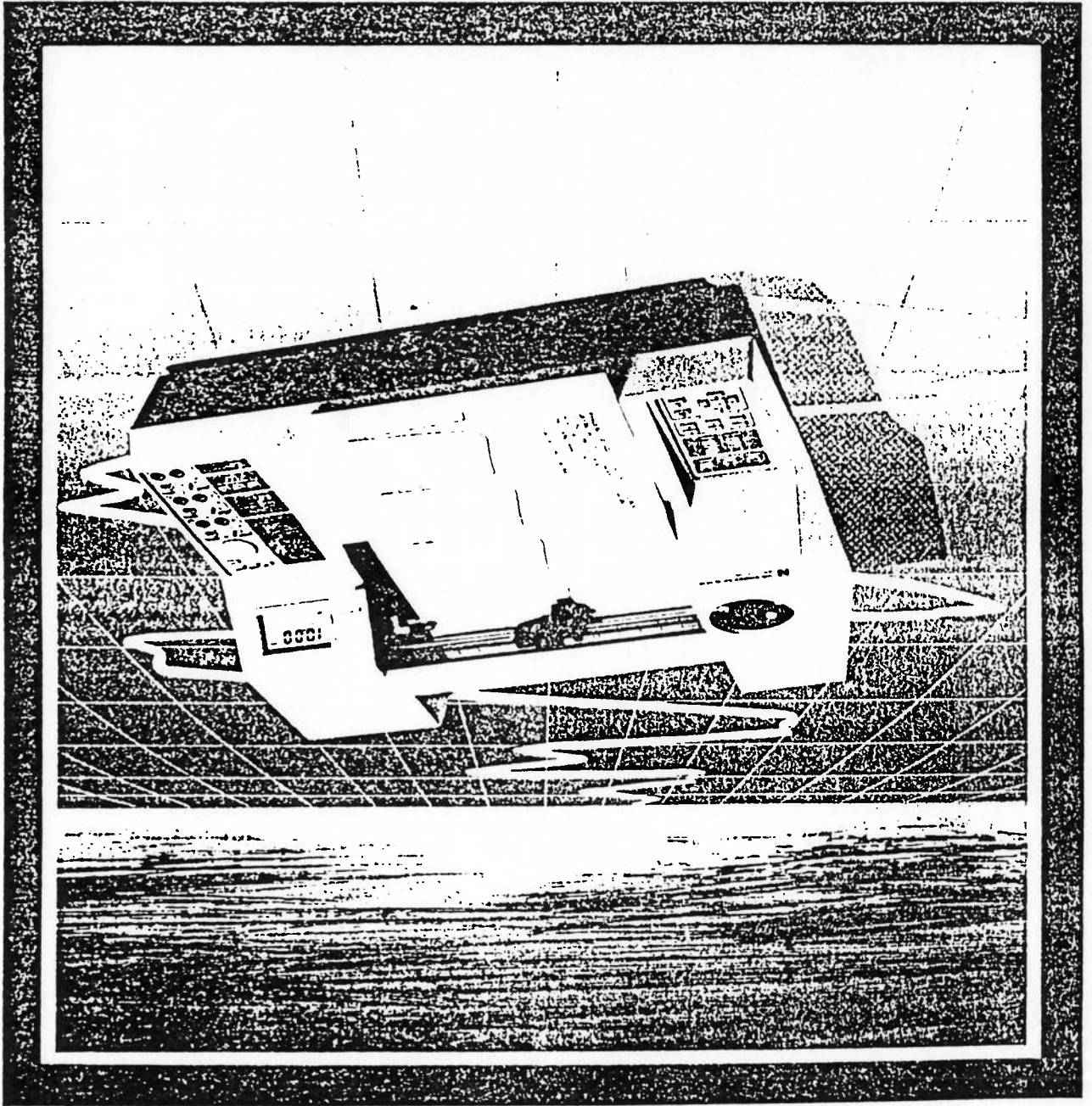
CONTROL DATA

ATTENUATOR:	Ten position rotary switch. Attenuation factor of 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 are available. A MECH ZERO position is provided for centering a transducer or differential transformer core. CAL button inserts a calibration signal into the amplifier in series with the transducer.
SENSITIVITY:	Control which sets the gain of the instrument, so that a known amount of load on the transducer will represent a convenient meter deflection.
POSITION:	Control which sets the meter pointer to whatever position is selected as representing zero load on the transducer.
R BAL:	Control which corrects for resistive unbalance in the transducer or strain gage circuit.
C BAL:	Control which corrects for reactive unbalance in the transducer or strain gage circuit.
USE-BAL/ZERO SUPPRESSION:	Coaxial control: center switch sets the instrument for operation or balancing (USE-BAL), outer switch inserts zero suppression voltage of positive or negative polarity (ZERO SUPPRESSION).
POWER (ON-OFF):	Two-position toggle switch for turning the instrument on and off.
115/230 SLIDE SWITCH	Two position slide switch for selecting power voltage level.
INDICATOR:	No identification; lights when the instrument is turned on.
FUSE:	Slow blow power fuse: 1A at 115V; 0.5A at 230V.
INPUT:	Five terminal connector for attaching the transducer.
OUTPUT:	Miniature phone jack for connecting an external indicating device.
FULL-BRIDGE-HALF:	Two-position slide switch (with lock) for operation with either full or half bridge transducers.

PERFORMANCE DATA
 PERFORMANCE A ESC. POLITECNICA
 1/2 G. RICARDO

Input:	From an external transducer (not supplied).
Transducer:	Must have a resistance of not less than 100 ohms at the excitation terminals and not more than 5,000 ohms at the input terminals, with less than 65° phase shift between excitation and output voltage. These requirements are met by most strain gage circuits and resistance bridge transducers.
Carrier Frequency:	2400 cycles, ±2% internally supplied.
Carrier Excitation:	Approximately 5 volts.
Sensitivity:	Depends on external transducer. Nominal sensitivity of a 100 ohm four arm-bridge is 100 microvolts of signal for 10 divisions of meter deflection, or 1 volt at the output. Using the ATTENUATOR switch, sensitivity reductions by factor of 2, 5, 10, 20, 50, 100, and 200 are possible.
Frequency Response:	Meter: 0 to 2-3 cycles. Output: 0 to 200 cycles within 3 db at 6 volt peak-to-peak amplitude.
Calibration:	40 microvolts per volt excitation, ±1%.
Linearity:	Error not to exceed 25 millivolts at the front output or ±1% on the meter.
Noise:	Meter: Imperceptible to the eye. Output: 50 millivolts maximum (peak-to-peak) with no input signal. Additional ripple present with input signal is less than 1% of instantaneous d-c output, peak-to-peak.
Zero Suppression:	Two ranges of positive and negative voltage, each range equivalent to approximately 5 turns of the R BAL control.
Position:	Any point on the meter scale.
Drift:	30 millivolts/10°C ambient temperature change to 50°C; 10 millivolts maximum for line voltage change from 103 to 127 volts.
Gain Stability:	Better than 1% to 50°C; better than 1% for line voltage change from 103 to 127 volts.
Output:	Single-ended emitter follower circuit at ground potential available at front panel OUTPUT jack. Full-scale output at the meter is 25 divisions; full-scale output at the OUTPUT jack is 73 volts across a load of 1,000 ohms or higher.
Dimensions:	8 1/8 inches high, 9 1/4 inches wide, 6 inches deep.
Weight:	Approximately 8 pounds.
Power:	115/230 volts, 50/60 cps, 8 watts.

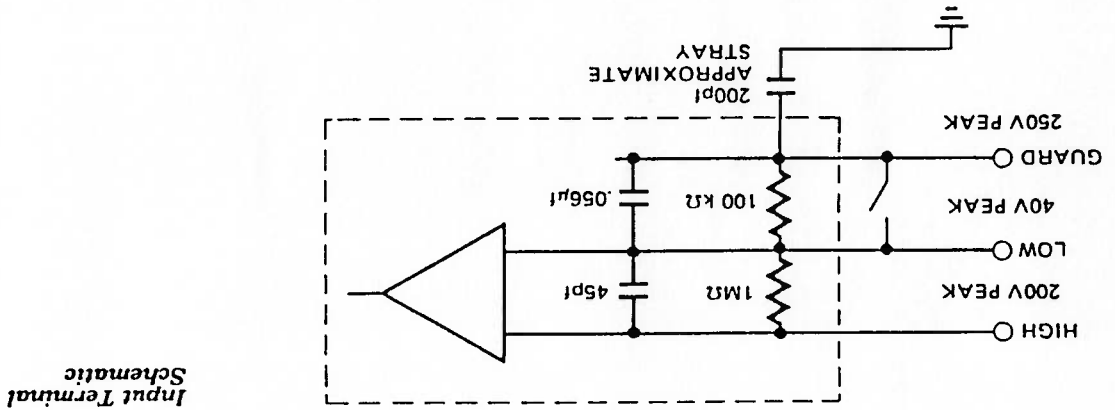
Hewlett-Packard 7090A Measurement Plotting System Operator's Manual



Appendix B Specifications*

The following provides a summary of the functioning characteristics and electrical accuracy of the HP 7090:

Number of channels	3
Type of input	floating, guarded
Sensitivity	5 mV to 100 V full scale
Zero offset	±2 full scale or ±100 V maximum
Input impedance (NOMINAL)	1 M Ω , shunted by 45 pF
Maximum input voltage	200 V, dc or peak
Maximum source resistance	10 k Ω
Common mode rejection ratio	140 dB dc; 100 dB ac @ 60 Hz with 1 k Ω unbalance in LOW terminal on most sensitive range at 25° C, 50% RH



Input Terminal Schematic

Timebase
 Range:
 Buffer mode
 Direct record mode

30 milliseconds to 24 hours
 1 second to 24 hours

Accuracy

±0.1%

Specifications describe the instrument's warranted performance. Supplemental characteristics are intended to provide information useful in applying the instrument by giving typical or nominal, but not warranted, performance parameters.

Electrical Accuracy
@ 25 Degrees C

Range	Constant Inaccuracy	Percent Reading Inaccuracy
5 mV	±0.013 mV	±0.055%
10 mV	±0.021 mV	
20 mV	±0.036 mV	
50 mV	±0.082 mV	
100 mV	±0.158 mV	
200 mV	±0.306 mV	
500 mV	±0.760 mV	
1 V	±0.0015 V	
2 V	±0.0030 V	
5 V	±0.0076 V	
10 V	±0.0152 V	
20 V	±0.0304 V	
50 V	±0.0760 V	
100 V	±0.1520 V	

**Accuracy specifications are for |offset| < full-scale range and a signal source resistance ≤ 10 kΩ.

Electrical Accuracy Tables**

Display: Up to 100% pre-trigger; up to 24-hour post-trigger delay after trigger before measurement start

Manual trigger: Available from front-panel controls or I/O

External trigger: BNC connector, TTL level or contact closure to ground

Internal trigger: Inside or outside window Above or below level, selectable over the full-scale range in 1.0% increments (NOMINAL) Source, channel 1

Trigger Characteristics

Resolution

12 bits

Size

1000 words

Memory Per Channel

Peak capture

250 μs at fastest timebase range

Bandwidth (-3 dB)

3 kHz for all full-scale ranges ≥ 20 mV

2.6 kHz for all full-scale ranges < 20 mV

Acceleration (NOMINAL)

196 m/s² (2 g's) constant

Slewing speed (NOMINAL): Direct record mode

127 cm/s (50 in./s)

Plotting mode

75 cm/s (30 in./s)

Dynamic Performance

Electrical Accuracy Tables (Continued)

Range	Constant Inaccuracy Per Degree C	Percent Reading Inaccuracy Per Degree C
5 mV 10 mV 20 mV 50 mV 100 mV 200 mV 500 mV 1 V 2 V 5 V 10 V 20 V 50 V 100 V	±0.0022 mV ±0.0028 mV ±0.0040 mV ±0.0076 mV ±0.0136 mV ±0.0256 mV ±0.0616 mV ±0.0001 V ±0.0002 V ±0.0006 V ±0.0012 V ±0.0024 V ±0.0060 V ±0.0120 V	±0.01%

Electrical Accuracy
Temperature Coefficient
from 25 Degrees C

Range	Constant Inaccuracy	Percent Reading Inaccuracy
5 mV 10 mV 20 mV 50 mV and up	±6 ±5 ±4 ±3	±0.055%

Electrical Accuracy
@ 25 Degrees C
(A/D Converter Counts)

Range	Constant Inaccuracy	Percent Reading Inaccuracy
5 mV 10 mV 20 mV 50 mV and up	±0.88 ±0.56 ±0.40 ±0.30	±0.01%

Electrical Accuracy
Temperature Coefficient
from 25 Degrees C
(A/D Converter Counts)



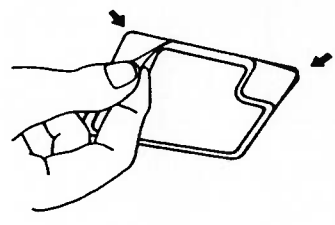
MADE IN JAPAN

STRAIN GAGES

TYPE	FRG-5-350-C1-23
TEMPERATURE COMPENSATION FOR	ALUMINUM
GAGE LENGTH	5 mm
GAGE RESISTANCE (24°C, 50%RH)	349.4 ± 0.6 Ω
LOT No.	Y711
BATCH	020A

GAGE FACTOR (24°C, 50%RH)	2.18	± 1.0 %
ADAPTABLE THERMAL EXPANSION	23.4	PPM/°C
TRANSVERSE SENSITIVITY (24°C, 50%RH)	0.35	%
TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR	-	%/°C
APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A, PC-6	
QUANTITY	10	

TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR
 $[0.8 \pm 0.5\%/100deg]$
 THERMAL OUTPUT (ϵ app : Apparent Strain)
 ϵ app = $-0.33 \times 10^{-4} + 0.24 \times 10^{-4} T - 0.40 \times 10^{-4} T^2$
 $+ 0.73 \times 10^{-4} T + 0.67 \times 10^{-4} T^2$ [$\mu m/m$]
 tolerance : ± 0.85 [$\mu m/m$]/°C]



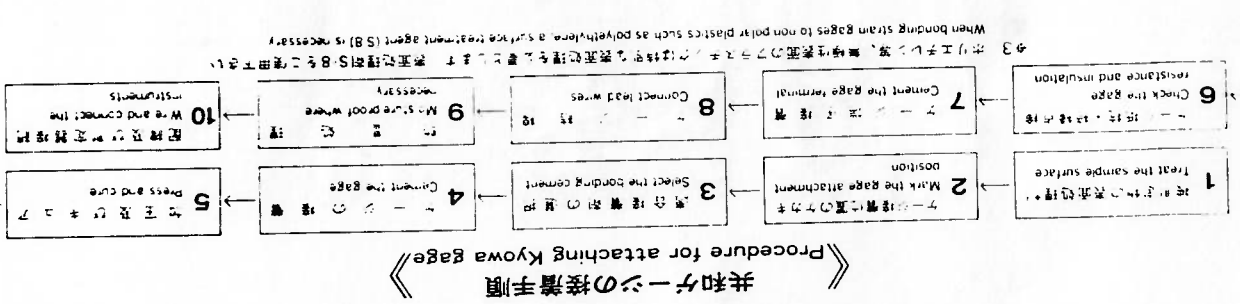
袋の開封は図のようになさって下さい。
 Open the package as illustrated.

〒182 東京都調布市調布ヶ丘3-5-1
 KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.
 Phone: 0424-88-1111 Fax: 0424-81-3258



TEL: 0424-88-1111 (大代) FAX: 0424-81-3258
 〒182 東京都調布市調布ヶ丘3-5-1
 株式会社 共和電業

See the back of package for installation of Kyowa gages.
 共和電業の取扱い説明書をお読みください。
 See the back of package for installation of Kyowa gages.



When bonding strain gages to non-poly plastics such as polyethylene, a surface treatment agent (S.B.) is necessary.

※1 接着したケージが破壊することなく短時間の使用に耐える上(下)限の温度
※2 自己温度補償する温度範囲

ケージの種類	主な用途・特徴	適用温度範囲(°C)	補償温度範囲(°C)	自己温度補償する温度範囲
KC	一般のひずみ測定、特にコンクリート用 For general strain measurement and for concrete	-196 to +180	+10 to +80	PC-12, EP-18 CC-33A
KFR	一般のひずみ測定及び変換器・耐熱性、耐久性良好 For general strain measurement and for transducer High thermal stability, high durability	-196 to +180	0 to +150	PC-6 CC-33A PC-12, EP-34
KFD	一般のひずみ測定及び変換器・耐熱性、耐久性良好 For general strain measurement and for transducer High wet proof, high durability	-196 to +200	+10 to +150	PC-6 CC-33A PC-12, EP-34
KFC	一般のひずみ測定 For general strain measurement	-196 to +180	+10 to +100	CC-33A PC-12
KFG	一般のひずみ測定及び変換器・耐熱性、接着性良好 For general strain measurement and for transducer High wet proof, high adhesiveness	-196 to +150	+10 to +100	PC-6 CC-33A EP-34

《《 共和ケージと接着剤の選び方 》》

1. 測定物の表面は錆、塗料などを除去し100-320位のサンペーパーで軽くかき、アセトン、メタノール、などで洗浄します。
2. 絶縁抵抗の点検は電子式抵抗計をご使用下さい。
3. ケーブルリードとケージとの接続は半田で行なって下さい、またケージ端子を使用する場合は、ケージリードに無理な力が加わらないようにして下さい。
4. 共和ケージは防湿包装となっておりますが開封したものはケージなどの乾燥した箇所には保存するようにして下さい。

《《 共和ケージの取扱方法 》》

1. Remove rust, paint etc. from the surface where the measurement is to be made. Then lightly polish the surface with a sandpaper of # 100-320, and wash with solvent such as acetone, from IF, etc.
2. Measure the insulation resistance with an electronic resistance meter with voltage of lower than 50 V DC.
3. The gage leads should be connected to lead wires by soldering. Also make use of terminals to avoid undesirable stress on the gage leads.
4. After opening the package, the Kyowa gages should be stored in a dry place, such as in a desiccator.

共和ケージ
 取扱説明書
 100-320
 100-320