

TORCIÔMETRO ELETROMECHANICO PARA MÁQUINAS AGRÍCOLAS: Estudo e Aplicação

JOÃO BAPTISTA GUIMARÃES JUNIOR

ENGENHEIRO AGRÔNOMO

Instrutor do Departamento de Engenharia
Rural da Faculdade de Ciências Médicas
e Biológicas de Botucatu,

Tese apresentada, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia, à Escola Superior de
Agricultura «Luz de Queiroz», da Universi-
dade de São Paulo.

Fevereiro de 1970
Piracicaba, Estado de São Paulo
BRASIL

Onde se lê:

Na pág. 3,
5ª linha:

mão de obra

Na pág. 7,
8ª linha:

4100 pol.lb.,

Na pág. 8,
1ª linha:

10 pol.og até 750000 p.lb.

Na pág. 18,
21ª linha:

Fonseca

Na pág. 24,
25ª linha:

se vai desgastando

Na pág. 30,
equação (28):

$$- K_t \Theta_{m2} \cos wt = \dots$$

Na pág. 32,
equação (37):

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{Kt}{I} + \dots$$

Na pág. 34,
equação (43):

$$\sqrt{\left(\frac{cW}{Iw_n}\right)^2 + \dots}$$

Na pág. 34,
2ª equação:

$$\frac{c}{c_t} = \frac{c}{2I} \text{ ou } \frac{c}{I} = \dots$$

Na pág. 34,
última fórmula:

$$\sqrt{\left(2 \delta \frac{W}{w_n}\right) + \dots}$$

Na pág. 60,
2ª linha do
3º parágrafo;
na pág. 61,
2ª linha do
último parágrafo
fo:

com asterístico

Na pág. 80,
1ª linha:

$$1300 / \sqrt{2} \text{ mV,}$$

com asterisco

$$\frac{1300}{\sqrt{2}} \text{ mV,}$$

Leia-se:

mão-de-obra

4100 polegadas.libras

10 polegadas.onças até 750000 pés.libras

FONSECA

se vai desgastando

$$K_t \Theta_{m2} \cos wt = \dots$$

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{Kt}{I} + \dots$$

$$\sqrt{\left(\frac{cW}{Iw_n}\right)^2 + \dots}$$

$$\frac{c}{c_t} = \frac{c}{2Iw_n} \text{ ou } \frac{c}{Iw_n} = \dots$$

$$\sqrt{\left(2 \delta \frac{W}{w_n}\right)^2 + \dots}$$

A meus pais, espôsa e filha

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

Expressamos nossos agradecimentos a:

. Dr. Luiz Geraldo Mialhe, Professor-Assistente da Cadeira de Mecânica, Motores e Máquinas, da E.S.A. "Luiz de Queiroz" da U.S.P., pela orientação ao presente trabalho.

. Prof. João Plaza, Professor Regente da Cadeira de Elementos de Máquinas, Máquinas Hidráulicas e Dinâmica das Máquinas, da Faculdade de Engenharia Industrial da P.U.C., pelas sugestões apresentadas.

. Prof. Humberto de Campos, Livre-Docente da Cadeira de Matemática, Dr. Epaminondas S. Barros Ferraz, Professor-Assistente da Cadeira de Física e Eng. Agr. Cássio Roberto de Melo Godoi, da E.S.A. "Luiz de Queiroz" da U.S.P., pelas sugestões apresentadas.

. Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, pelo elevado espírito de cooperação através dos docentes que arcaram com nossos encargos administrativos.

. Cadeira de Mecânica, Motores e Máquinas da E.S.A. "Luiz de Queiroz" da U.S.P., pelos recursos materiais e humanos que possibilitaram a realização do presente trabalho.

. A CAPES - Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro para a pesquisa na forma de bolsa de estudos.

Í N D I C E

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SÔBRE A TEORIA DO MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1. Estudo Teórico do Transdutor Primário.....	16
3.2. Critério de Escolha do Transdutor Secundário.....	23
3.3. Características Estáticas e Dinâmicas do Estágio Detector-Transdutor.....	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
4.1. Projeto do Torciômetro.....	37
4.2. Ensaio do Sistema Coletor.....	46
4.3. Ensaio Estáticos.....	47
4.4. Ensaio Dinâmicos.....	50
5. RESULTADOS OBTIDOS.....	54
5.1. Ensaio do Sistema Coletor.....	54
5.2. Ensaio Estáticos.....	56
5.3. Ensaio Dinâmicos.....	60
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	65
6.1. Análise e Discussão dos Ensaio do Sistema Coletor.....	65
6.2. Análise e Discussão dos Ensaio Estáticos.....	66
6.3. Análise e Discussão dos Ensaio Dinâmicos.....	79
7. APLICAÇÃO EM LABORATÓRIO.....	82
8. CONCLUSÕES.....	86
9. RESUMO.....	90
10. SUMMARY.....	92
11. BIBLIOGRAFIA.....	94
11.1. Bibliografia Citada.....	94
11.2. Bibliografia Consultada.....	97
APÊNDICE 1.....	98
APÊNDICE 2.....	102

1. INTRODUÇÃO

A potência absorvida pelas máquinas agrícolas durante muito tempo foi suprida pelo trator, através da barra de tração, no caso de máquinas de arrasto. Para máquinas que requeriam força de torção, esta era fornecida por roda-de-terra ou motor auxiliar. Dadas as limitações do sistema rodado-solo e acréscimo tanto em peso como custo do motor auxiliar, surgiu a tomada de potência - TDP*. De acordo com MCCALL (1947), somente por volta de 1925 a TDP ganhou uso generalizado como meio de transmitir potência às diversas máquinas.

A contínua expansão deste método de acionamento, segundo HANSEN (1952), exige a solução satisfatória de uma série de problemas. Um dos mais importantes é a determinação da

(*) Doravante, todas as referências à tomada de potência serão feitas pela sigla TDP, conforme a padronização P-PB-83 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

potência necessária para operar u'a máquina e a maneira como é afetada pelas várias regulagens e condições operacionais. Isto fêz com que os pesquisadores voltassem suas vistas para a força de torção ou torque transmitido pela TDP.

Enquanto que a força de tração requerida pelas máquinas é facilmente determinada por dinamômetros de tração, a força de torção exige aparelhos denominados torciômetros ou torquímetros, com um sistema específico para captação do sinal. Isto, em virtude das determinações serem feitas em árvores de transmissão. Com os dados do torque e rotação médias da árvore, obtém-se a potência transmitida.

O conhecimento da potência absorvida pelas máquinas, sob condições operacionais, é da maior importância não só para pesquisadores, mas também para projetistas e fabricantes, bem como aos agricultores seus usuários. Para o pesquisador, o estudo dinâmico das máquinas com o propósito de aprimoramento visa, principalmente, redução na potência para operá-las. Para os projetistas e fabricantes, o conhecimento da potência absorvida por máquinas é essencial para um racional dimensionamento, bem como para a elaboração de projetos que melhor atendam às condições de trabalho. Para o usuário, são de grande interesse dados de potência consumida pela maquinaria, pois sua racional escolha e manejo dependerão das disponibilidades de potência na fazenda.

Para a determinação da potência transmitida às máquinas industriais, foram desenvolvidos diversos tipos de torciômetros. A fabricação desses aparelhos, embora bem evoluída em alguns países, atende às necessidades de projetos industriais. Nos Estados Unidos e alguns países da Europa, os torquímetros industriais têm sido aplicados no estudo de máquinas agrícolas, em programas avançados de pesquisa. No Brasil, alguns aparelhos importados são utilizados, porém em pesquisas industriais e por instituições oficiais.

Após um levantamento bibliográfico dos trabalhos que

vêm sendo conduzidos nos principais centros de pesquisas de máquinas agrícolas norte-americanos e europeus, pôde-se constatar o grande número de trabalhos nêsse sentido. Em relação ao nosso país, vê-se que neste campo praticamente nada se tem feito, talvez em virtude das dificuldades de mão de obra especializada e equipamento que oferece êste importante ramo da dinamometria agrícola.

Êstes fatôres levaram à execução do presente trabalho, cujo desenvolvimento inclui o estudo de um torciômetro eletromecânico, estabelecendo-se os parâmetros a serem considerados no projeto, de modo a assegurar acuracidade nas medições aliada à simplicidade de construção, facilidade de operação e rusticidade.

Na falta de melhores indicações para o limite do erro máximo para êste tipo de equipamento, tomou-se aquêle estabelecido por BAHASOEAN & VERDUIN (1963), que, de acôrdo com os fabricantes de máquinas acionadas pela TDP, fixaram o erro para seu equipamento como igual ou inferior a 5%.

O estudo do torciômetro eletromecânico envolve considerações teóricas em tôrno dos diversos componentes do mesmo, levando-se ainda em conta o carater dinâmico das determinações do torque, o que implica em estabelecer a faixa de freqüência de utilização. De acôrdo com SCHOENLEBER (1955), a faixa de freqüência de utilização de 0 a 80 c.p.s. em equipamento dêste tipo é desejável para muitas medidas requeridas em máquinas agrícolas.

Após a conclusão do projeto, passou-se a construção do torciômetro, aferição estática e dinâmica. Finalmente, o torciômetro foi empregado em ensáio de laboratório com a finalidade de provar a utilidade do mesmo no estudo da potência absorvida pelas máquinas.

O objetivo primordial dêste trabalho é desenvolver um sistema de baixo custo, capaz de se adaptar a equipamento de indicação ou registro relativamente baratos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde que as máquinas agrícolas acionadas pela TDP passaram a ser extensivamente usadas, surgiu um grande número de problemas que requeriam solução satisfatória através de pesquisa.

A obtenção de dados de torque tem merecido a atenção dos pesquisadores, advindo dos estudos um bom número de métodos para medir força de torção liberada na TDP. Na literatura encontra-se referência a dois tipos de dinamômetros: os de "absorção", desde os mais simples, como o freio de Prony, aos mais complexos, como os elétricos e os de "transmissão", entre os quais situam-se os destinados à medida do torque em máquinas agrícolas.

MCCALL (1947) projetou e construiu um dinamômetro registrador, com a finalidade de determinar a potência necessária para acionar máquinas pela TDP ou tracioná-las. O torcím^ometro consistia, basicamente, num cilindro hidráulico ligado a

uma barra articulada e quatro polias planas conectadas por correia plana, como ilustram os esquemas da Figura 1, nos quais a polia B é motora e a polia A, movida. A polia C está montada numa das extremidades da barra E, articulada no ponto A. Na outra extremidade há um contrapêso com o propósito de balancear o sistema e, ao mesmo tempo, absorver cargas de choque. A potência é recebida do motor através do eixo B, indiretamente ligado por meio da correia ao eixo A, o qual a transmite para a carga. A TDP gira no sentido horário e, se um torque está aplicado em A, haverá uma tensão T_1 e T_2 na correia, resultando um torque na barra E. A rotação da barra é neutrali

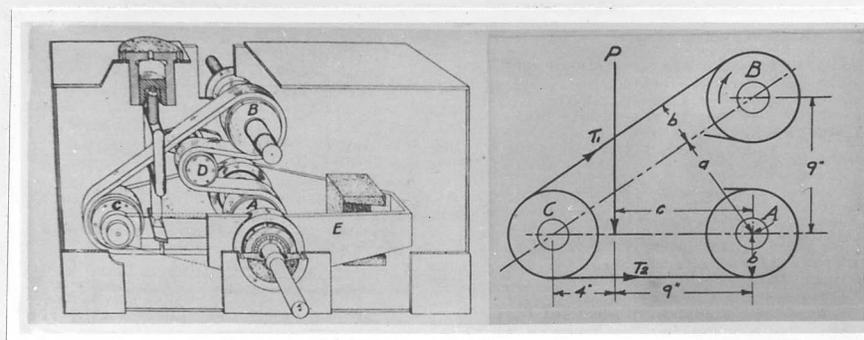


Figura 1. Esquemas do dinamômetro de MCCALL (1947).

zada pela força P em conexão com o pistão hidráulico, causando uma variação na pressão que é captada pelo registrador Gulley. O torciômetro foi calibrado com um freio de Prony. A equação de regressão obtida nos ensaios de calibração foi a seguinte:

$$N = \frac{1,79A + 3,1}{T}$$

onde: N = potência transmitida em H.P.;
 A = área obtida no registrador Gulley, em pol²;
 T = tempo em minutos.

O pêsô do dinamômetro era de 1000 libras.

ALPE (1951) desenvolveu um torciômetro registrador pa

ra máquinas acionadas manualmente. Basicamente, é constituído de dois braços F e M, como ilustram os esquemas da Figura 2. O braço F é fixo ao eixo da máquina e o braço M contém a manopla de acionamento da máquina. A oscilação do braço M é provocada pela deformação da mola helicoidal S, durante a transmissão do torque à máquina. A mola S é solicitada em tração ou compressão, conforme a disposição física do sistema. Na extremidade de M existe um traçador que registra a deformação da mola causada pela força tangencial transmitida, num tambor t acionado por mecanismo de relojoaria. Aos braços estão fixos pesos para balanceamento dinâmico do sistema. O conjunto pe-

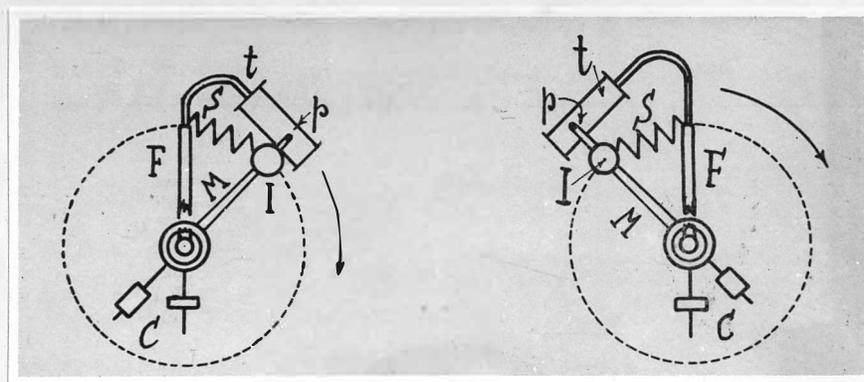


Figura 2. Esquemas do torçiómetro registrador de ALPE (1951).

sava cêrca de 32 kgf.

REED & BERRY (1953), construíram um torquímetro hidráulico, para determinações em enxadas rotativas. O funcionamento baseia-se na conversão da força de torção numa força paralela ao eixo de transmissão, atuando contra um fole hidráulico do circuito medidor. O esquema da Figura 3 mostra o sistema, no qual o elemento C está solidário ao eixo motor A e transmite a força de torção ao disco D através dos blocos K, que se apoiam nos roletes J. Ao disco D se fixam os blocos G, tendo as faces com 45° de inclinação. Estas se apoiam nos roletes F, solidários ao disco E, o qual está rigidamente liga

do ao eixo movido B. A força de torção, transmitida ao disco movido através dos blocos inclinados G, resulta numa força paralela à linha de centro dos eixos. Esta força se transmite através de um mancal de pressão R, para o disco não rotativo H, o qual atua contra 3 células hidráulicas W. A pressão no circuito hidráulico é indicada ou registrada em M. A caixa metálica L, de 11x11x6 3/4 polegadas, encerra o conjunto que pesa cerca de 150 libras. A capacidade é de 4100 pol.lb, usando-se 3 células hidráulicas de 373 libras cada uma e com um raio de 4 polegadas. Isto equivale em termos de potência

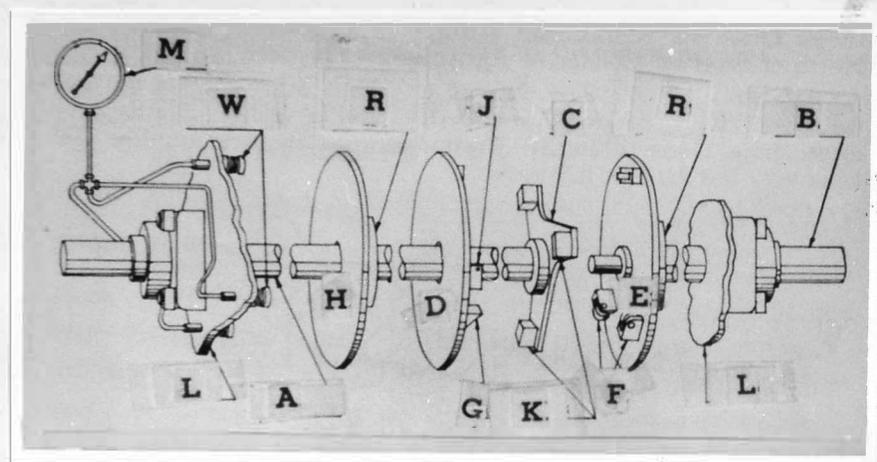


Figura 3. Esquema do torciômetro hidráulico de REED & BERRY (1953).

a 6,4 H.P. a 100 rpm e 128 H.P. a 2000 rpm.

Entre os primeiros torciômetros lançados no mercado norte-americano, para fins industriais, destaca-se o modelo SR-4 da Baldwin-Lima-Hamilton (1954), que emprega o extensômetro elétrico de resistência SR-4. A unidade de torque consiste num eixo, no qual estão fixos os extensômetros sensíveis à deformação percebida pelo material durante a transmissão. Os extensômetros são colados formando um ângulo de 45° com o eixo longitudinal e ligados formando um circuito chamado ponte de Wheatstone. São disponíveis para serem colocados em árvores desde 1/4 pol a 18 pol de diâmetro do eixo, com capacidade de

medição desde 10 pol.oz até 750000 p.lb. O torque captado pelo transdutor é recebido em indicadores ou registradores adequados ao ensaio.

Com o advento dos extensômetros elétricos de resistência, largamente empregados na tecnologia industrial, especificamente projetados para a análise experimental de esforços, avolumaram-se os trabalhos empregando principalmente os constituídos por filamento de constantan. Estudos sôbre a aplica-

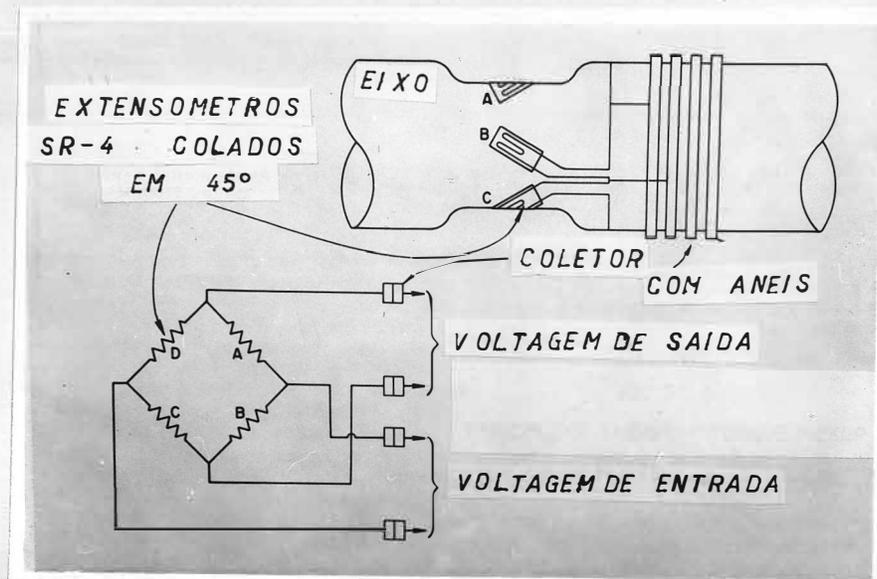


Figura 4. Esquema do torciômetro empregando extensômetros elétricos de resistência SR-4.

ção desses torquímetros para fins agrícolas, foram feitos por vários autores, entre os quais, STEFANELLI (1956), RICHARDSON & FILBY (1959), TAYLOR & WILSON (1963), BAHASOEAN & VERDUIN (1963). Basicamente os torciômetros empregados por estes autores são semelhantes, diferindo por alguns detalhes construtivos em relação à unidade de torque, que em alguns casos é idêntica à unidade SR-4 já referida ou então, como a de TAYLOR & WILSON (1963), em que os extensômetros estão fixos a quatro vi

gas em balanço. O sistema coletor, que coloca os extensômetros em conexão com o circuito ponte, pode ser com anéis e escovas ou anéis metálicos em cápsulas circulares de mercúrio, como o da Figura 5.

SCHCHWAZABAJA (1960) construiu um torciômetro registrador para árvore de tratores e máquinas agrícolas. O sistema possui ainda um dispositivo para registro da rotação da árvore e tempo efetivo de trabalho para avaliação do desempenho do conjunto trator-máquina. O princípio de funcionamento do torciômetro se baseia no deslocamento relativo entre dois dis-

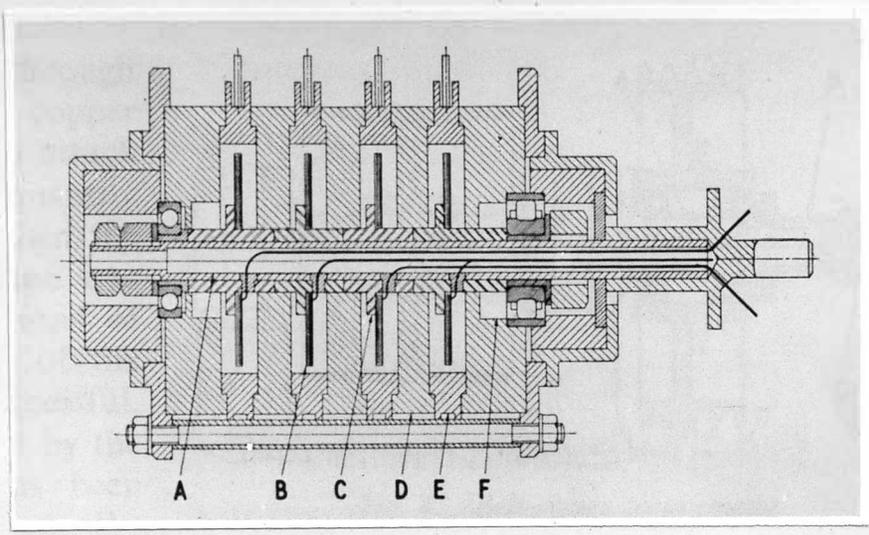


Figura 5. Torciômetro empregando cápsulas circulares de mercúrio desenvolvido por RICHARDSON & FILBY (1959) sendo (A) eixo tubular de aço; (B) discos de cobre; (C) buchas de "tufnol"; (D) discos de "perspex"; (E) anéis de cobre; (F) buchas plásticas.

cos cinemáticos, com avanço, de modo a provocar a deformação da mola helicoidal colocada ao longo do eixo geométrico do conjunto. A força de torção M , aplicada ao sistema, resulta numa força N . Esta é decomposta nas forças P_0 e T , cujas direções são, respectivamente, axial e tangencial, como ilustra o esquema da Figura 6. A componente axial P_0 acarreta uma deformação b da mola, a qual é registrada no papel a . A compressão da

mola resulta proporcional à componente P_0 e ao torque Q , obtendo, no final de cada ensaio, o diagrama na forma de uma curva ininterrupta. A análise da Figura 6 estabelece o torque em função da deformação b , da constante da mola c e da geometria utilizada R, α :

$$T = P_0 t g \alpha$$

$$Q = TR = P_0 R t g \alpha$$

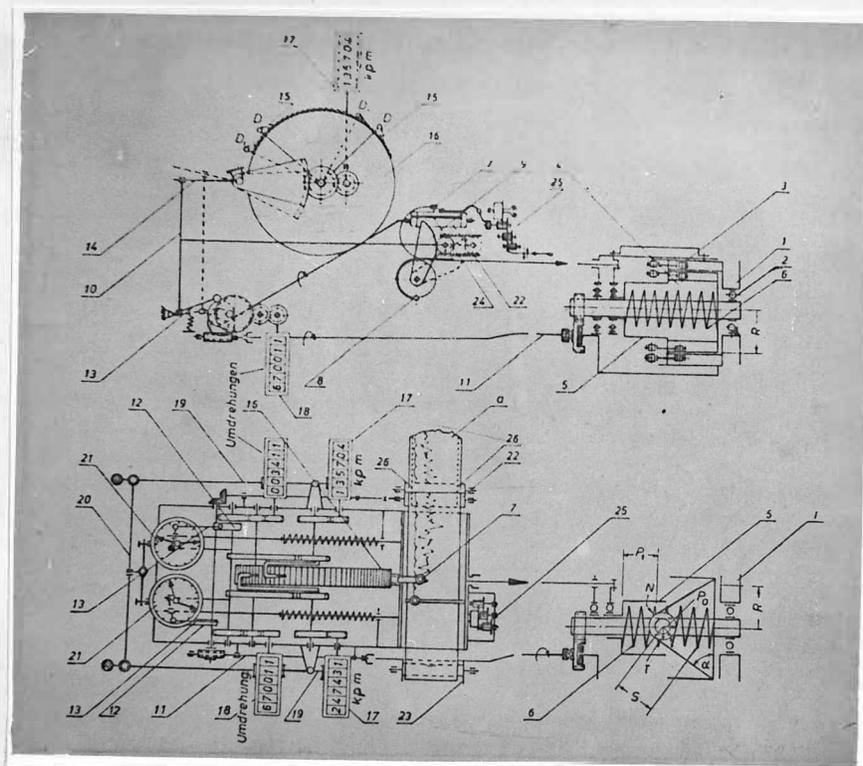


Figura 6. Torciômetros registrador desenvolvido por SCHCHWAZABAJA.

onde P_0 é neutralizada pela força de reação da mola, $F = bc$, portanto:

$$Q = bcRt g \alpha$$

DIEGO LOPES (1966) descreveu um torquímetro para ensaios de conjuntos moto-bomba. O dinamômetro é de torção, sendo intercalado entre o motor e a bomba; o torque é transmitido por uma barra cilíndrica suscetível de sofrer uma deforma

ção elástica provocada pela torção. Com base na teoria de Resistência dos Materiais expressou o torque aplicado em função do ângulo de torção ϕ percebido pelo material. São disponíveis barras com diversos diâmetros, para diferentes gamas de torque, as quais são ensaiadas estáticamente para obtenção do módulo de rigidez à torção. As seguintes relações foram determinadas, aplicando os valores obtidos nos ensaios estáticos:

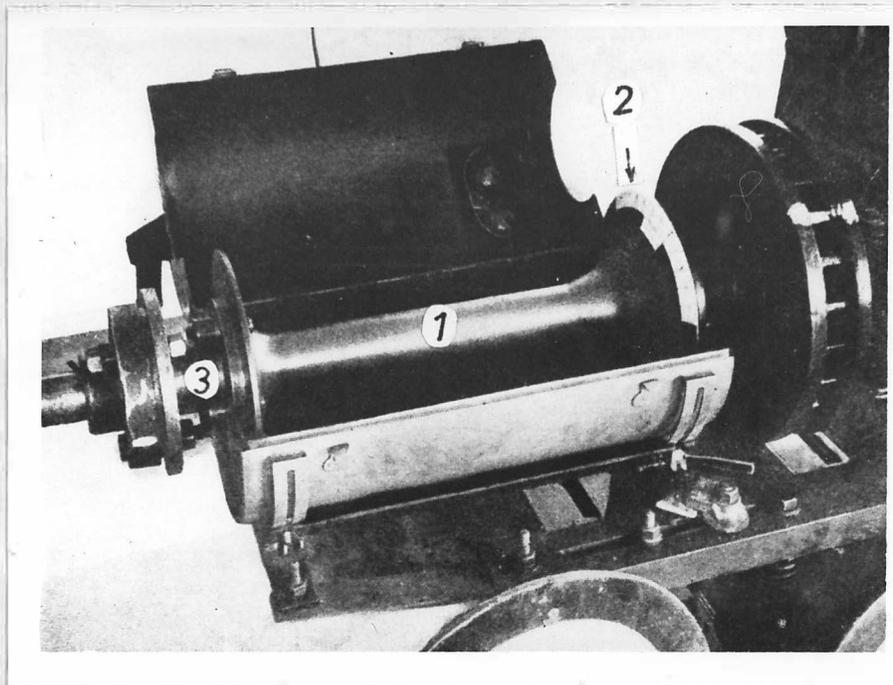


Figura 7. Dinamômetro de torção acoplado ao conjunto moto-bomba, sendo (1) barra elástica; (2) quadrante graduado; (3) acoplamento.

- para barra de 2,5 m.kgf, o torque M é dado pela relação $M = 6,58\phi$;
- para barra de 5,0 m.kgf, $M = 13,75\phi$;
- para barra de 10,0 m.kgf, $M = 26,30\phi$;
- para barra de 20,0 m.kgf, $M = 62,6\phi$. O ângulo de torção é medido num quadrante graduado, através do dispositivo de leitura estroboscópica que acompanha o dinamômetro. O conjunto é mostrado na Figura 7.

Os torciômetros que utilizam o extensômetro elétrico de resistência superam os demais no que concerne à acuracidade das medidas, tamanho reduzido, fácil manejo, possibilidade de registro a distância, etc.

Assim, por exemplo, com relação aos torciômetros hidráulicos, ainda que sua acuracidade se possa comparar à daqueles, seu peso elevado, manutenção periódica durante as medições, possibilidade de vazamento nas tubulações, dificuldade de manejo, fazem com que sejam amplamente superados.

Entretanto, tôdas aquelas vantagens dos torciômetros com extensômetros elétricos de resistência perdem seu significado quando se considera o seu alto custo em relação aos demais. Isto, em virtude não só do sistema coletor exigir materiais apropriados e usinagem precisa mas, principalmente, quando se considera o equipamento como um todo.

Daí a escolha recair sobre um sistema que, embora utilize o princípio da transdução eletromecânica, seja capaz de se adaptar a um equipamento mais barato.

Como é evidente, não se pretende desenvolver um sistema que proporcione medidas tão acuradas quanto aqueles e com faixa de frequência de utilização semelhante, mas compatível tanto sob o ponto de vista dinâmico como econômico, com o atual estágio de desenvolvimento das máquinas agrícolas nacionais.

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SÔBRE A TEORIA DO MATERIAL E MÉTODOS

BECKWITH & BUCK (1961), citando BEHAR e MURPHY, enquadram os sistemas de medição num esquema geral constituído de três estágios, a saber:

- . estágio I - "detector - transdutor";
- . estágio II - "intermediário modificador";
- . estágio III - "estágio final", composto de indicador, registrador e controlador, ou combinação dêles.

Cada estágio do sistema generalizado proposto, mostrado na Figura 8, compõe-se de elementos distintos ou agrupamentos com desempenho e adequação ao propósito da medida.

A função primordial do estágio I é detectar* o sinal de entrada ou a forma como a grandeza a ser medida se manifesta. Idealmente, deveria ser insensível a sinais de outra natureza, no entanto, é muito raro encontrar-se um detector com-

pletamente seletivo.

Muitas vêzes é conveniente transduzir** o sinal básico em outro sinal análogo***. Esta é uma função também realizada pelo estágio I, sendo muito empregada a conversão do sinal básico em sinal elétrico, com numerosas vantagens. O detector também é denominado "transdutor primário" e o transdutor propriamente dito, "transdutor secundário".

A finalidade do estágio intermediário é modificar a

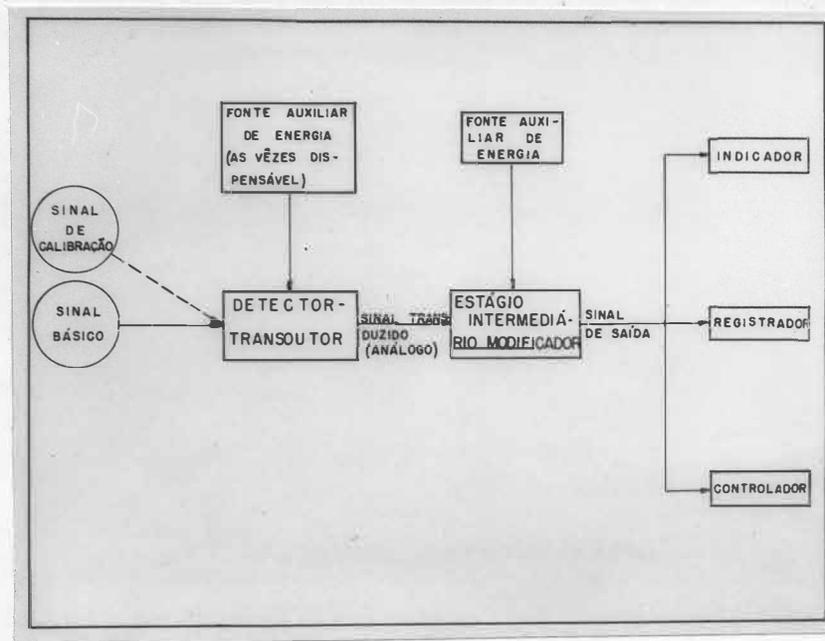


Figura 8. Fluxograma de um sistema generalizado, segundo BECKWITH & BUCK (1961).

informação transduzida, tornando-a aceitável para o estágio fi-

-
- (*) No presente trabalho, doravante, usar-se-ão os termos "de-
tectar" e "sentir", como sinônimos.
 - (**) O termo "transduzir" será doravante empregado como sinô-
nimo de "converter".
 - (***) O termo "análogo" é empregado neste trabalho para indicar
uma correspondência biunívoca, de mesma função, entre as
grandezas físicas envolvidas.
-

nal, enquanto que este último revela a informação desejada, em uma forma compreensível para um sentido humano ou para um controlador.

Com base nessas considerações, pode-se enquadrar o torciômetro eletromecânico no esquema de um sistema generalizado e analisar a teoria de sua concepção.

Em relação aos diversos tipos de torciômetros referidos pela bibliografia especializada, ver-se-á que são utilizados os mais diversos métodos para a determinação da grandeza denominada torque. Alguns são desenvolvidos com a finalidade de medidas estáticas e outros, para medidas dinâmicas. O projeto de cada um envolve o exame de um grande número de fatores, alguns deles conflitantes entre si, de tal sorte que a fórmula final será uma conciliação.

Uma análise mais acurada permitirá situar a maioria dos métodos segundo dois princípios básicos: a) deformações elásticas dos corpos, lineares ou angulares; b) incompressibilidade de fluidos, abrangendo os torciômetros hidráulicos.

Por deformações entendem-se aquelas obedientes à Lei de Hooke e que vão desde os limites microscópicos, como as que ocorrem nos extensômetros elétricos de resistência, até as macroscópicas, como os deslocamentos das molas helicoidais.

A maioria dos torciômetros, cujo detector se baseia nas deformações elásticas, apresentam um transdutor que as converte em sinal elétrico proveniente da variação de uma característica elétrica, seja resistência, indutância ou capacitância. Isso se prende à inerente compatibilidade dos princípios da transdução eletromecânica, resultando nas seguintes vantagens:

- . possibilidade de miniaturização dos transdutores;
- . facilidade de ampliação ou atenuação do sinal elétrico;
- . redução dos efeitos do atrito e da inércia das massas;
- . exequibilidade de indicação ou registro remotos;

. obtenção de sinal de saída com potência suficiente para controle.

Em face dessas vantagens optou-se pela elaboração de um torçômetro com transdutor eletromecânico, em cuja concepção se inclui um conjunto de molas, como transdutor primário, e uma resistência elétrica variável, como transdutor secundário.

No desenvolvimento teórico que será feito a seguir, considerar-se-ão separadamente, o transdutor primário e o secundário.

3.1. Estudo Teórico do Transdutor Primário

Entende-se por "mola" todo sistema elástico de sustentação, dentro dos limites de aplicabilidade da Lei de Hooke.

Segundo FONSECA (1964), distinguem-se dois tipos de molas: a) as que resistem a deslocamentos de translação e, portanto, sujeitas a esforços normais ou a momentos fletores; b) as que resistem a deslocamentos de rotação e que ficam sujeitas a momentos de torção.

Suponha-se um corpo elástico de massa desprezível e comprimento L . Aplicando-se um carregamento estático P a esse corpo, o equilíbrio é atingido quando seu comprimento for $L_1 = L + D_e$. Como as cargas são proporcionais às deformações, temos:

$$P = K D_e \quad (1)$$

onde K é definido como o coeficiente de rigidez, módulo de rigidez ou constante da mola sujeita a deslocamentos lineares.

Para molas que resistem a deslocamentos angulares, a rigidez à torção é o coeficiente de proporcionalidade entre o momento de torção M_t aplicado e o ângulo de deformação α produzido:

$$M_t = K_t \alpha \quad (2)$$

No caso de uma associação de molas, deve-se considerar:

- . associação em série;
- . associação em paralelo.

Quando são associadas em série duas molas, cujos módulos de rigidez são K_1 e K_2 , a deformação estática total será a soma das deformações estáticas parciais D_{e1} e D_{e2} de cada uma das molas.

$$D_e = D_{e1} + D_{e2}$$

mas, de acôrdo com (1), tem-se:

$$D_{e1} = \frac{P}{K_1} \quad \text{e} \quad D_{e2} = \frac{P}{K_2}$$

logo:

$$D_e = \frac{P}{K_1} + \frac{P}{K_2} = \frac{K_1 + K_2}{K_1 K_2} P$$

Portanto, a constante equivalente à suspensão das molas em série é:

$$K = \frac{K_1 + K_2}{K_1 K_2} \quad (3)$$

Para molas associadas em paralelo, é válida a seguinte relação:

$$D_e = D_{e1} = D_{e2}$$

Sendo P_1 e P_2 as componentes de P , sustentadas pelas molas K_1 e K_2 , pode-se escrever:

$$P = P_1 + P_2$$

mas,

$$P_1 = K_1 D_{e1} \quad \text{e} \quad P_2 = K_2 D_{e2}$$

$$P = K_1 D_{e1} + K_2 D_{e2} = K_1 D_e + K_2 D_e$$

Substituindo-se o valor de P , fornecido pela equação (1), resulta:

$$K = K_1 + K_2 \quad (4)$$

sendo K a constante da suspensão equivalente para as molas em paralelo.

Para molas sujeitas a deslocamentos angulares, facilmente se depreende que a mesma assimilação é válida.

A escolha de um elemento elástico, como transdutor primário ou detector para torciômetros, é função da capacidade e sensibilidade requeridas, da natureza do transdutor secundário e do caráter dinâmico das medições.

Em face da natureza do transdutor secundário, a captação do sinal elétrico para o estágio intermediário é feita através de um coletor. Como êste poderá introduzir variações no sinal original, o transdutor secundário deverá prover variações de resistência elétrica tão amplas, que tornem desprezíveis as variações do coletor. Daí a escolha recair sobre os resistores de contacto deslizante, conhecidos comercialmente como "potenciômetros". Êstes, pela sua construção, requerem deslocamentos relativamente grandes, e o elemento elástico escolhido que atende às suas características é um sistema de molas helicoidais.

Para molas helicoidais, de acôrdo ainda com Fonseca (1964) têm-se:

$$D_e = \frac{8 P D^3 n}{G d^4} \quad (5)$$

onde:

- D_e = deformação estática;
- P = carga aplicada;
- D = diâmetro médio das espiras;
- n = número de espiras;
- G = módulo de elasticidade transversal do material;
- d = diâmetro da secção reta do fio empregado.

Fazendo-se: $K = \frac{G d^4}{8 D^3 n}$ na equação (5), vem:

$$P = K D_e \quad \text{ou} \quad K = \frac{P}{D_e}$$

Isso demonstra a linearidade entre cargas e deformações, tornando possível a determinação de \underline{K} .

A geometria utilizada para o transdutor primário pode ser apreciada na Figura 9. Neste são utilizadas duas molas helicoidais em compressão, para transmissão do torque, de tal forma que os deslocamentos lineares \underline{x} são convertidos em angulares $\underline{\alpha}$.

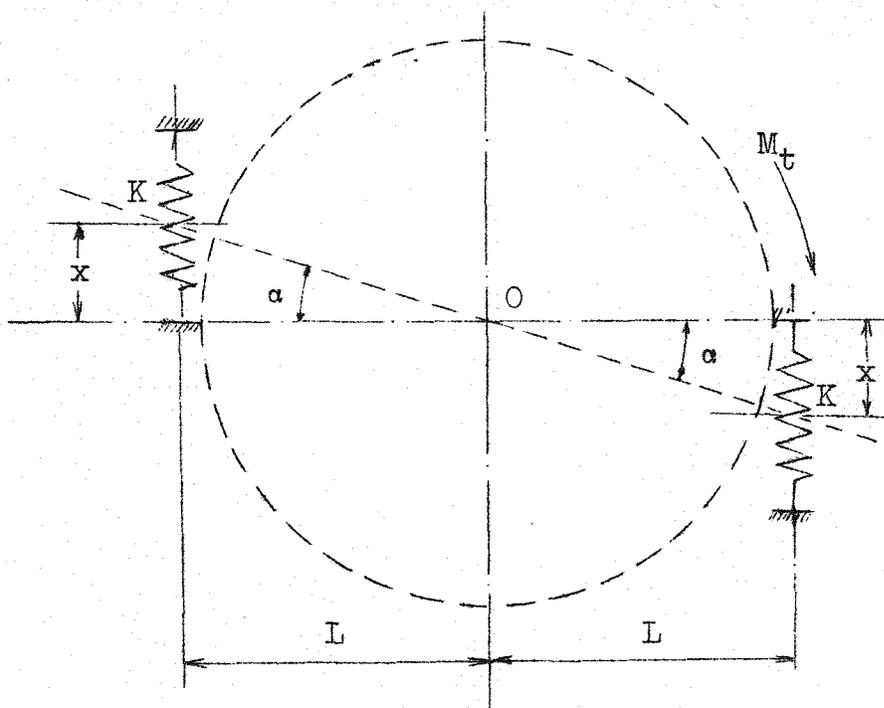


Figura 9. Esquema mostrando a disposição física dos elementos constituintes do detector.

De acordo com o estabelecido na equação (2), o módulo de rigidez à torção da suspensão equivalente é:

$$K_t = \frac{M_t}{\alpha} \quad (6)$$

Como se observa na Figura 9, são empregadas duas molas em paralelo, com mesmo módulo de rigidez \underline{K} . Desprezando-se a pequena inclinação das mesmas, pode-se escrever:

$$M_t = 2 K x L \quad (7)$$

Como $x = \alpha L$, a equação (6) toma a forma:

$$M_t = 2 K \alpha L^2 \quad (8)$$

Substituindo-se (8) em (6), tem-se:

$$K_t = 2 K L^2 \quad (9)$$

Generalizando-se, para a molas, a equação (9) toma a seguinte forma:

$$K_t = a K L^2 \quad (10)$$

A equação (10) mostra que a capacidade do torciômetro, como uma função de K_t , depende do número a de molas iguais associadas em paralelo, do módulo de rigidez K e da distância L das molas ao eixo de simetria do conjunto. No projeto, deverão ser consideradas as limitações de espaço impostas às variáveis a e L.

A sensibilidade do transdutor primário é uma função de K e, de acôrdo com a equação (1), fazendo-se $P = 1$, $K D_e = 1$. Logo, o deslocamento máximo por unidade de carga, que expressa a máxima sensibilidade, será obtido quando K fôr tão baixo quanto possível. Por outro lado, a sensibilidade se relaciona com o tempo de resposta, isto é, tempo gasto para o sistema chegar ao equilíbrio, de fundamental importância nos projetos que se destinam a medidas dinâmicas.

Assim, quando o sistema se desequilibra por uma variação de torque, decorre um lapso de tempo - "tempo de resposta", para atingir um novo equilíbrio e revelar a informação desejada. O tempo de resposta é função do amortecimento e da frequência natural do sistema.

Por amortecimento, entende-se o efeito das resistências passivas, mais ou menos complexas, originadas dos mais diversos fatores sôbre a dinâmica do conjunto medidor. Entre êstes, destacam-se: a) resistência ocasionada pela viscosida-

de de fluidos - amortecimento viscoso; b) resistência oriunda do atrito sêco - amortecimento de Coulomb; c) resistência provocada por atrito interno ou histerese - amortecimento complexo.

A interrelação entre frequência natural f_n e sensibilidade s pode ser evidenciada considerando-se, inicialmente, o sistema com amortecimento desprezível.

A sensibilidade s do torciômetro é a menor variação ΔM_t que pode ser por êle sentida. Isso corresponde, pela disposição física do transdutor primário, ao menor deslocamento linear Δx das molas, suscetível de ser convertido pelo transdutor secundário, em sinal elétrico mensurável pelo estágio final. Portanto:

$$s = \frac{1}{\Delta M_t} \quad (11)$$

Sendo θ o ângulo de torção, correspondente ao deslocamento linear Δx , e de acôrdo com a equação (2), tem-se:

$$\Delta M_t = K_t \theta$$

mas $\theta = \frac{\Delta x}{L}$, logo:

$$\Delta M_t = \frac{\Delta x}{L} K_t \quad (12)$$

Substituindo-se (12) em (11), resulta:

$$s = \frac{1}{\frac{\Delta x}{L} K_t} \quad (13)$$

Designando-se por I o momento de inércia reduzido das massas em rotação, em tórno do eixo de simetria mostrado por O na Figura 9, e multiplicando-se a equação (13) por I/I , vem:

$$s = \frac{1}{\frac{\Delta^x}{L} K_t} \frac{I}{I}$$

$$s = \frac{1}{\frac{\Delta^x K_t}{L} \frac{I}{I}}$$

Como o sistema é considerado sem amortecimento,

$$\frac{K_t}{I} = \omega_n^2$$

onde ω_n é a pulsação natural do sistema. Logo:

$$s = \frac{1}{\frac{\Delta^x}{L} \omega_n^2 I}$$

Mas, $\omega_n = 2 \pi f_n$, sendo f_n a frequência natural ou frequência própria do conjunto, do que resulta:

$$s = \frac{1}{\frac{\Delta^x}{L} (2 \pi f_n)^2 I} \quad (14)$$

A equação (14) mostra que a sensibilidade é inversamente proporcional à inércia das massas em rotação e ao quadrado da frequência natural. Por outro lado, como o tempo de resposta está diretamente relacionado com o período natural, $T_n = 1/f_n$, quanto maior for f_n , menor será T_n e, conseqüentemente, o tempo de resposta. Assim, a sensibilidade é ganha às expensas do tempo de resposta e o projeto deverá ser uma conciliação, capaz de atender aos propósitos da medição.

3.2. Critério de Escolha do Transdutor Secundário

Conforme considerações anteriores, a escolha de um elemento capaz de proporcionar amplas variações de resistência elétrica recaiu sobre os denominados "potenciômetros" *.

Estes são constituídos de um resistor variável, conforme ilustra a Figura 10. Entre os terminais A-B tem-se a resis

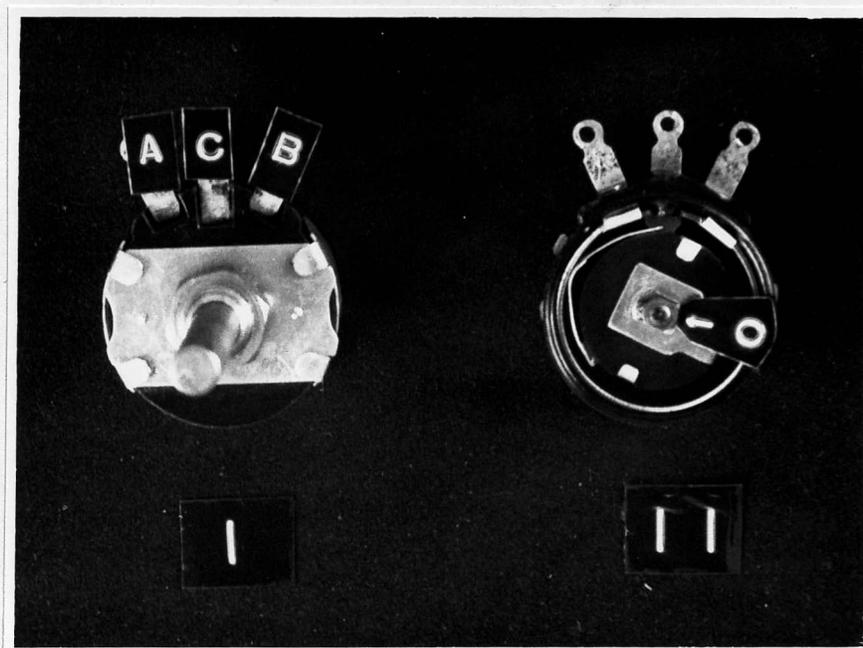


Figura 10. Potenciômetro empregado no transdutor secundário. (I) terminais de ligação; (II) vista interna.

tência total e, entre os terminais A-C ou B-C, a resistência variável. O terminal C está ligado ao contacto deslizante que atua sobre a resistência total, comumente disposta em círculo ou espiral para torná-la mais compacta. O acionamento do contacto deslizante é feito através do eixo O. Quanto se trata

(*) Doravante, empregar-se-á o termo potenciômetro para designar o resistor variável mostrado na Figura 10.

de potenciômetros destinados a transdutores de equipamentos para torque reduzido, existem tipos denominados "low-torque". Nestes, o torque exigido pelo eixo é praticamente desprezível, a fim de não alterar significativamente a fonte de sinal básico. Existem potenciômetros em que a variação de resistência elétrica provocada pela rotação do eixo é uma função trigonométrica, logarítmica, exponencial, linear, etc., conforme o fim a que se destina.

Entre nós, são disponíveis, comercialmente, apenas os potenciômetros comuns para aplicação em eletrônica, cuja função é logarítmica ou linear, com um giro do eixo de aproximadamente 270° .

O primeiro fator que se levou em consideração na escolha foi a linearidade da resposta obtida, uma vez que as variações de resistência elétrica experimentadas pelo transdutor devem ser uma função linear do torque transmitido.

Outro fator a ser considerado é a sua estabilidade durante as medições, ou seja, a variação de resistência elétrica, provocada por uma dada deformação elástica do transdutor primário, deverá ser constante em função do tempo. No comércio são encontrados potenciômetros de carvão, cuja resistência é uma camada dêsse material eletrodepositado, ou um fio de constantan enrolado num suporte anelar, como mostra a Figura 10, denominados potenciômetros bobinados. Os primeiros são pouco estáveis, pois a camada de carvão se vai desgastando pelo atrito. Assim, a escolha que pareceu mais razoável foi a dos potenciômetros bobinados lineares* convencionais, uma vez que o objetivo dêste trabalho não justifica a importação de tipos especiais.

Tratando-se de potenciômetros bobinados, deve-se levar em consideração o chamado "poder de resolução" ou "poder resolu

(*) A linearidade entendida aqui se refere àquela compreendida entre os limites estabelecidos pelo fabricante.

tivo", que é o inverso do número de espiras da resistência total, expresso em percentagem. O poder de resolução limita, de certa forma, a sensibilidade do transdutor secundário, posto que não se podem esperar variações de resistência elétrica inferiores a êle. A transdução da deformação elástica em sinal elétrico, se fará sempre com impulsos iguais ou superiores ao poder resolutivo.

Desde que o circuito elétrico empregado na medição possua sensibilidade apenas suficiente para sentir variações de resistência elétrica da ordem do poder resolutivo do potenciômetro, qualquer variação inferior a êsse valor não afetará significativamente os resultados.

Pelo que se pode depreender, a criticidade do sistema coletor para captação do sinal elétrico, em termos de variação de resistência, pode ser contornada escolhendo-se um potenciômetro cujo poder de resolução proporcione variações de resistência elétrica relativamente amplas, quando comparadas com aquelas produzidas pelo próprio coletor.

3.3. Características Estáticas e Dinâmicas do Estágio Detector - Transdutor

A disposição física adotada no transdutor primário, mostrada na Figura 9, converte deslocamentos lineares em angulares, que se justificam em face da natureza do transdutor secundário. Neste, a transdução de torque em sinal elétrico análogo requer um movimento angular do eixo do potenciômetro, proporcional ao deslocamento linear das molas.

O sistema empregado como detector de torque compõe-se, segundo a Figura 11, de dois discos A e B acoplados através de duas molas helicoidais, solicitadas em compressão, cujo eixo de simetria se situa tangencialmente à circunferência imaginária de raio L, que passa pelo centro das molas. Quando um torque é aplicado ao sistema, o detector elástico deforma-se linear-

mente, resultando em deslocamento angular relativo entre os discos.

Para pequenos deslocamentos, pode-se considerar a força de torção produzindo carregamento axial, conforme o estabelecido para a equação (7). Essa aproximação é válida, desde que o sistema será posteriormente calibrado, eliminando-se os erros sistemáticos advindos dessa simplificação. Por outro lado, es

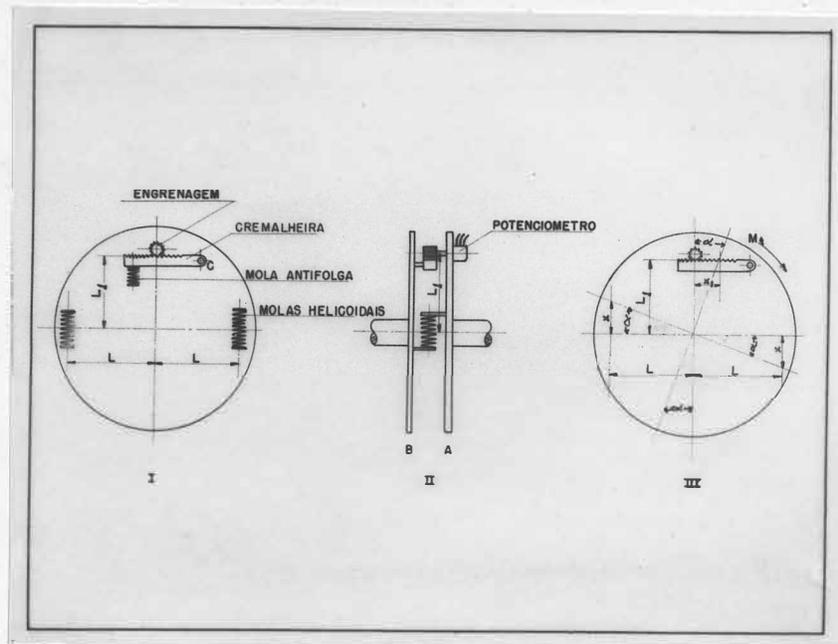


Figura 11. Torçionômetro eletromecânico: esqemas para análise estática.

ta simplificação facilita bastante a análise teórica do sistema, possibilitando estabelecer parâmetros de interesse no projeto.

O deslocamento relativo entre os discos é convertido em rotação do eixo do potenciômetro, através do conjunto engrenagem - cremalheira. A cremalheira, acoplada ao disco B através da articulação C, aciona a engrenagem solidária ao eixo do potenciômetro, fixo ao disco A. Um adequado engrenamento entre ambas é obtido através da mola anti-folga que pressiona a

cremalheira contra a engrenagem. Teoricamente, pode-se admitir que não haja folga no vão dos dentes e concluir que o deslocamento angular entre os discos é transformado em rotação do eixo do potenciômetro, completando-se a transdução.

Essas considerações possibilitam a seguinte análise das características estáticas do conjunto: - suponha-se que a força tangencial, correspondente ao torque aplicado, acarrete a deformação linear x do detector, resultando no deslocamento angular α , conforme o esquema III da Figura 11. Sendo D_p o diâmetro primitivo da engrenagem e L_1 a distância do centro dos discos ao ponto de engrenamento, o deslocamento desse ponto é dado por um arco de circunferência, que, para pequenos deslocamentos, se confunde com o segmento linear x_1 . Desde que se admita a inexistência de folgas na articulação C , o deslocamento angular correspondente, para pequenas inclinações da cremalheira, pode ser considerado como igual a α . Logo:

$$L \alpha = x \quad \text{e} \quad L_1 \alpha = x_1$$

Comparando-se essas equações e explicitando-se em x_1 , vem:

$$x_1 = x \frac{L_1}{L} \quad (15)$$

O giro G , em graus, do eixo do potenciômetro, expresso em função do diâmetro primitivo da engrenagem será:

$$G = 360 \frac{L_1 x}{\pi L D_p} \quad (16)$$

A resistência R_t correspondente ao giro G , para um transdutor secundário com resistência total R_p num bobinado disposto em arco circular com ângulo central T , poderá ser expressa pela relação:

$$R_t = R_p \frac{G}{T} \quad (17)$$

Substituindo-se (16) em (17), vem:

$$R_t = 360 R_p \frac{L_1 x}{\pi L D_p T} \quad (18)$$

Para os potenciômetros convencionais $T = 270^\circ$ e a variação ôhmica esperada é:

$$R_t = 0,42 R_p x \frac{L_1}{L D_p} \quad (19)$$

Fazendo $\frac{L_1}{L D_p} = A$, a equação (19) toma a forma:

$$R_t = 0,42 R_p x A \quad (20)$$

Tirando-se o valor de x da equação (20) e substituindo-o na equação (7), vem:

$$M_t = 2 K L \frac{R_t}{0,42 R_p A}$$

porém, fazendo-se $2 K L / 0,42 R_p A = C$ (constante do torciômetro), resulta:

$$M_t = C R_t \quad (21)$$

Na equação (20), A é o fator de amplificação ou atenuação do deslocamento x do transdutor primário e poderá ser interpretado como seu ganho mecânico. Este, em instrumentos destinados a medições de grandezas físicas, sob condições dinâmicas, envolve problemas de relevante complexidade. Devem ser consideradas as forças de atrito e de inércia, as deformações elásticas e as folgas dos elementos envolvidos. Tais grandezas, multiplicadas pelo fator A , contribuirão para uma distorção do sinal básico, deteriorando a resposta do sistema. Disso resulta ser crítico o uso de amplificação mecânica, em medidas dinâmicas, nas quais deverão ser consideradas as limitações inerentes ao próprio sistema.

Para contornar os problemas decorrentes da amplificação mecânica e tendo-se em vista a facilidade de processamento de sinais elétricos, preferiu-se processar o sinal transduzido.

No projeto preferiu-se uma atenuação mecânica, através de um fator de ganho A menor que a unidade. Assim, o efeito deletério decorrente das forças de atrito e de inércia, das deformações e folgas, fica restrito àquelas inevitáveis do conjunto engrenagem - cremalheira, capaz de compatibilizar o detector elástico com o transdutor secundário.

A caracterização dinâmica do estágio detector-transdutor envolve o estudo de parâmetros dinâmicos que afetam a resposta do sistema. Esta, do ponto de vista qualitativo, pode ser analisada sob quatro aspectos fundamentais, a saber:

- . amplitude;
- . frequência;
- . fase;
- . retardamento.

Entre êsses, a amplitude de resposta é um aspecto que pode ser considerado tanto do ponto de vista estático como dinâmico. Em ambos os casos, ela representa a habilidade do sistema em tratar com uniformidade, em uma determinada faixa, as variações de torque. Um simples exame da equação (21) leva à conclusão de que o sinal elétrico transduzido é uma função linear do torque aplicado. Todavia, somente um ensaio de aferição estática poderá confirmar a linearidade de resposta. Esta condição é necessária, mas não suficiente, em virtude do caráter dinâmico da utilização do torciômetro.

Os parâmetros dinâmicos que afetam a resposta do sistema são: frequência natural, índice de amortecimento e o módulo dinâmico de rigidez, os quais podem ser estabelecidos com base na teoria das Vibrações Mecânicas.

Para isso considera-se o torciômetro como um sistema vibratório formado por dois discos de momentos polares de inércia de massa I_1 e I_2 , acoplados por mola com módulo de rigidez à torção K_t .

Admitindo-se o sistema sem amortecimento, sujeito ao momento harmônico $M_0 \cos wt$ e aplicando a equação de rotação

aos dois discos da Figura 11, tem-se:

$$- K_t (\theta_1 - \theta_2) = I_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} \quad (22)$$

$$K_t (\theta_1 - \theta_2) + M_0 \cos wt = I_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} \quad (23)$$

As equações (22) e (23) são lineares, e os movimentos persistentes seguem as relações:

$$\theta_1 = \theta_{m1} \cos wt \quad (24)$$

$$\theta_2 = \theta_{m2} \cos wt \quad (25)$$

As acelerações angulares correspondentes são:

$$\frac{d^2\theta_1}{dt^2} = - \theta_{m1} w^2 \cos wt \quad (26)$$

$$\frac{d^2\theta_2}{dt^2} = - \theta_{m2} w^2 \cos wt \quad (27)$$

As amplitudes dos deslocamentos obtêm-se substituindo (24), (26) e (25), (27), respectivamente, em (22) e (23), transformando-se as equações em identidades. Assim, tem-se:

$$- K_t \theta_{m2} \cos wt = (K_t - I_1 w^2) \theta_{m1} \cos wt \quad (28)$$

$$- K_t \theta_{m1} \cos wt + (K_t - I_2 w^2) \theta_{m2} \cos wt = M_0 \cos wt \quad (29)$$

As equações (28) e (29) são válidas, desde que os coeficientes das mesmas funções de t sejam iguais, o que conduz ao sistema em θ_m :

$$(K_t - I_1 w^2) \theta_{m1} - K_t \theta_{m2} = 0 \quad (30)$$

$$- K_t \theta_{m1} + (K_t - I_2 w^2) \theta_{m2} = M_0 \quad (31)$$

As pulsações naturais correspondem aos valores $\underline{w_n}$ que anulam o determinante da matriz do sistema. Logo:

$$\begin{vmatrix} (K_t - I_1 w_n^2) & - K_t \\ - K_t & (K_t - I_2 w_n^2) \end{vmatrix} = 0$$

Resolvendo-se o determinante, obtém-se:

a) $w_n = 0$, correspondente ao deslocamento do conjunto como um corpo rígido;

b) $w_n \neq 0$, correspondente à pulsação natural do conjunto:

$$w_n = \sqrt{K_t \frac{I_1 + I_2}{I_1 I_2}} \quad (32)$$

Fazendo-se $\frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} = I$, que é o momento de inércia reduzido das massas em rotação, a equação (32) toma a forma:

$$w_n = \sqrt{\frac{K_t}{I}} \quad (33)$$

que permite concluir ter o sistema apenas um grau de liberdade.

Substituindo-se (9) em (33), obtém-se

$$w_n = 1,41 L \sqrt{\frac{KK}{I}} \quad (34)$$

que expressa a pulsação natural do sistema em função do módulo de rigidez das molas empregadas no torciômetro.

Considerando a frequência natural e o amortecimento, que embora pequeno sempre ocorre nos sistemas reais, pode-se estabelecer a faixa de utilização do torciômetro, atendendo aos aspectos que envolvem a resposta do sistema. A faixa de utilização se obtém através da curva de ressonância do sistema que traduz seu comportamento dinâmico. A partir dessa curva estimam-se os seguintes parâmetros: frequência natural - f_n ; índi

ce de amortecimento - δ ; módulo dinâmico de rigidez - K_{td} .

Admitindo-se, agora, o sistema com amortecimento, através do coeficiente de amortecimento c , o qual expressa o efeito das resistências viscosas na torção da árvore, as equações de rotação para os dois discos se tornam:

$$- K_t (\theta_1 - \theta_2) - c \left(\frac{d\theta_1}{dt} - \frac{d\theta_2}{dt} \right) = I_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} \quad (35)$$

$$K_t(\theta_1 - \theta_2) + c \left(\frac{d\theta_1}{dt} - \frac{d\theta_2}{dt} \right) + M_0 \cos wt = I_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} \quad (36)$$

Dividindo-se a equação (35) por I_1 e (36) por I_2 , combinando-se ambas e substituindo-se $\theta_1 - \theta_2 = \alpha$ (deslocamento relativo entre os discos) e $\frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} = I$ (momento reduzido) vem:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{K_t}{I} + \frac{c}{I} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{M_0}{I_2} \cos wt \quad (37)$$

A equação (37) expressa a vibração forçada com amortecimento do sistema, com um grau de liberdade. Para solucioná-la, preferiu-se o diagrama vetorial dos momentos que atuam no conjunto, em virtude de ser trabalhosa sua integração.

De acôrdo com a Figura 12, a equação do deslocamento angular é:

$$\alpha = \alpha_m \cos(wt - \psi) \quad (38)$$

A velocidade angular será:

$$\frac{d\alpha}{dt} = - \alpha_m w \text{ sen } wt$$

e a velocidade máxima: $\alpha_m w$.

A aceleração angular será:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = - \alpha_m w^2 \cos wt$$

e a aceleração máxima: $\alpha_m w^2$.

Para que o sistema se ache em equilíbrio, a soma vetorial dos momentos deve ser nula, portanto:

$$- K_t \alpha_m + I w^2 \alpha_m + M_o \cos \psi = 0 \quad (39)$$

$$- c w \alpha_m + M_o \sin \psi = 0 \quad (40)$$

Substituindo-se em (40) $\sin \psi = \sqrt{1 - \cos^2 \psi}$ e desenvolvendo-se, resulta:

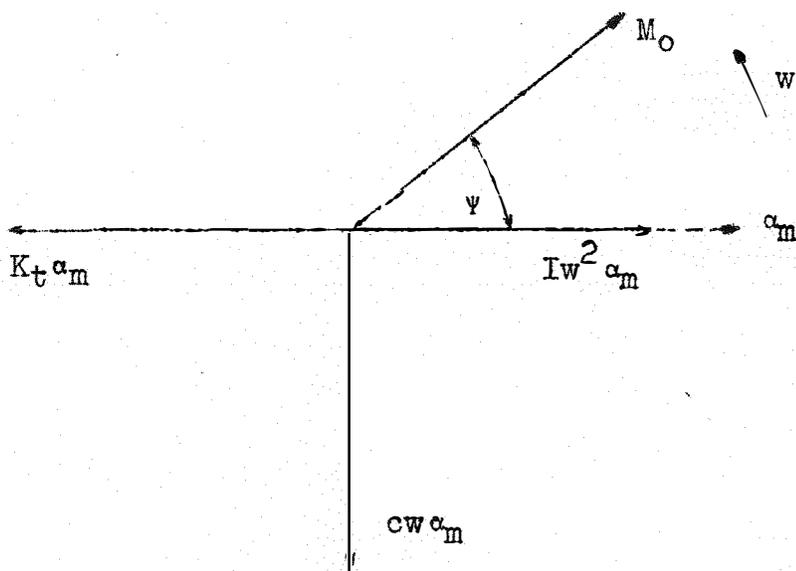


Figura 12. Diagrama vetorial do sistema em vibração forçada.

$$M_o^2 \cos^2 \psi = M_o^2 - (c w)^2 \alpha_m^2 \quad (41)$$

Comparando-se (39) com (41) e dividindo ambos os membros por α_m^2 , vem:

$$\alpha_m = \frac{M_o / K_t}{\sqrt{\frac{(c w)^2}{K_t^2} + \frac{(K_t - I w^2)^2}{K_t^2}}} \quad (42)$$

Substituindo-se (33) em (42), vem:

$$\alpha_m = \frac{M_0/K_t}{\sqrt{\left(\frac{cw}{Iw_n}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2\right]^2}} \quad (43)$$

O índice de amortecimento δ é a relação entre c e o coeficiente de amortecimento crítico c_t , que poderá ser expresso por:

$$\delta = \frac{c}{c_t} = \frac{c}{2I} \quad \text{ou} \quad \frac{c}{I} = 2\delta$$

Introduzindo-se o índice de amortecimento na equação (43), vem:

$$\alpha_m = \frac{M_0/K_t}{\sqrt{\left(2\delta \frac{w}{w_n}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2\right]^2}} \quad (44)$$

O ângulo de fase ψ pode ser obtido combinando-se as equações (39) e (40), de onde se tira:

$$\text{tg } \psi = \frac{c w}{K_t - Iw^2}$$

Dividindo-se o numerador e denominador da equação acima por K_t e substituindo-se os valores equivalentes, vem:

$$\text{tg } \psi = \frac{2\delta \frac{w}{w_n}}{1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2} \quad (45)$$

Na equação (44), o termo:

$$\frac{1}{\sqrt{\left(2\delta \frac{w}{w_n}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2\right]^2}}$$

é o chamado fator de amplificação ϕ , e a relação M_0/K_t pode

ser entendida como o ângulo de torção α_e do torciômetro, correspondente à aplicação do momento estático \underline{M}_0 e, daí, pode-se escrever:

$$\alpha_m = \alpha_e \Phi \quad \text{ou} \quad \Phi = \frac{\alpha_m}{\alpha_e}$$

O fator de amplificação Φ pode ser definido como a relação entre o ângulo de torção máximo $\underline{\alpha}_m$ do torciômetro, na fre

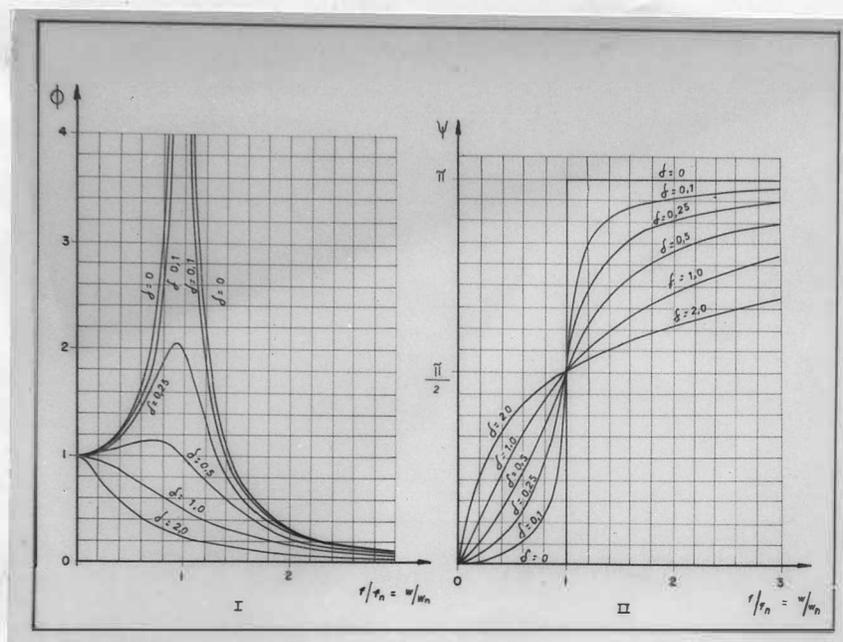


Figura 13. Gráfico I - Curvas de Ressonância de Sistema com 1 grau de liberdade. Gráfico II - Ângulos de Fase para diversos índices de amortecimento. Segundo FONSECA (1964).

quência $f = w/2\pi$, e o ângulo de torção α_e quando aplicado o momento estático \underline{M}_0 . Isso, em última análise, expressa a ação dinâmica sobre a resposta do conjunto. Por outro lado, Φ depende, conforme a equação (44), da relação entre a frequência \underline{f} da força perturbadora e a frequência natural \underline{f}_n do sistema. Seu valor máximo corresponde a $r = f/f_n$, aproximadamente igual à unidade. Tal condição, denominada "condição de ressonân-

cia", depende do índice de amortecimento, conforme se depreende do Gráfico I, da Figura 13.

O torciômetro, como um sistema vibratório, é caracterizado pela curva do fator de amplificação Φ . Esta permite estabelecer sua faixa de utilização, uma vez que dela dependem as duas características mais importantes da qualidade de resposta, para o presente trabalho, isto é, amplitude e frequência.

Teoricamente, interessa a porção da curva em que $\Phi = 1$, assegurando-se assim a uniformidade da amplitude de resposta e a insensibilidade do sistema a variações na frequência do torque medido. Entretanto, isto ocorre apenas para algumas poucas frequências. Para aplicação em máquinas agrícolas convencionais, pode-se tomar a porção da curva em que Φ se mantém sensivelmente igual a 1, estabelecendo-se um limite superior de frequência de utilização.

A variação do ângulo de fase ψ , dado pela equação (45) e mostrado no Gráfico II da Figura 13, indica que apenas para valores de δ da ordem de 0,6 - 0,7, a força perturbadora segue uma relação aproximadamente linear com a frequência. Isso é importante somente quando se trata de instrumentos para medir sinais complexos, compostos de vários harmônicos, quando uma relação própria com o tempo tem que ser mantida. A fase de resposta, portanto, tem importância secundária, tendo-se em vista o propósito das medições.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O material empregado no presente trabalho abrange o torciômetro, como uma unidade operacional completa, e os equipamentos para ensaios e aplicação do mesmo. O torciômetro será caracterizado pelo seu projeto, incluindo-se os transdutores, o sistema coletor, o circuito elétrico e o registrador potenciométrico. Com relação aos ensaios estáticos e dinâmicos, serão descritos, em cada caso, os equipamentos e métodos utilizados.

4.1. Projeto do Torciômetro

De acordo com as considerações feitas no Capítulo 3, construiu-se o torciômetro apresentado em planta e corte nas Figuras 14 e 15.

O sistema compõem-se de dois discos cinemáticos de aço S.A.E. 1020.

O disco A é fixo à árvore motora, que se acopla à TDP,

e o disco B solidário à árvore movida, a qual será ligada à máquina agrícola em estudo. Na face interna dos discos estão engastados os assentos das molas. Para evitar folga, introduziu-se um parafuso com porca e contra-porca, segundo o eixo longitudinal das molas, através do qual pode-se impor às mesmas uma pequena pré-carga. Convém ressaltar que o orifício do assento das molas, por onde passa o parafuso, apresenta folga suficiente a fim de evitar qualquer interferência na compressão dessas, durante o funcionamento do torciômetro.

Os discos se mantêm alinhados axialmente e podem realizar um deslocamento relativo entre si, no sentido da rotação, graças à deformação das molas e do engastamento entre as árvores motora e movida, por meio de espiga e rolamento. Esta montagem, além de possibilitar fácil acesso para substituição das molas, torna o conjunto desmontável no caso de eventuais reparações. O conjunto é montado sobre uma estrutura de ferro cantoneira, através de 3 mancais de rolamentos oscilantes.

O dimensionamento dos componentes mecânicos foi feito com base no torque máximo a ser transmitido, cujo limite máximo, estabelecido "a priori", foi de 40 m.kgf, que corresponde a aproximadamente 30 C.V., para 540 rpm da TDP. A disposição adotada para as partes constituintes foi idealizada com base em experiência adquirida anteriormente, quando da construção de um protótipo preliminar.

O transdutor secundário é constituído de um potenciômetro bobinado, fixo ao disco A, com resistência nominal de 1000 ohms, em cujo eixo se fixa a engrenagem, de dentes retos e 19 mm de diâmetro primitivo. A cremalheira, acoplada ao disco B através da articulação C, apresenta 125 mm de comprimento. A Figura 16 mostra, em detalhe, os transdutores onde se pode observar a pequena mola anti-folga colocada sob a cremalheira. A engrenagem é construída em latão e a cremalheira em ferro trefilado.

Escolha do Detector Elástico

A escolha das molas utilizadas como detector elástico foi feita com base em seus gráficos de deformação à compressão, obtidos em máquina de ensaio do Departamento de Tecnologia dos Materiais Dentários, da Faculdade de Odontologia de Piracicaba. Para isso submeteu-se um lote de 10 pares de molas a ensaios e selecionaram-se dois pares, designados por $\underline{m_1}$ e $\underline{m_2}$, cujos grá-

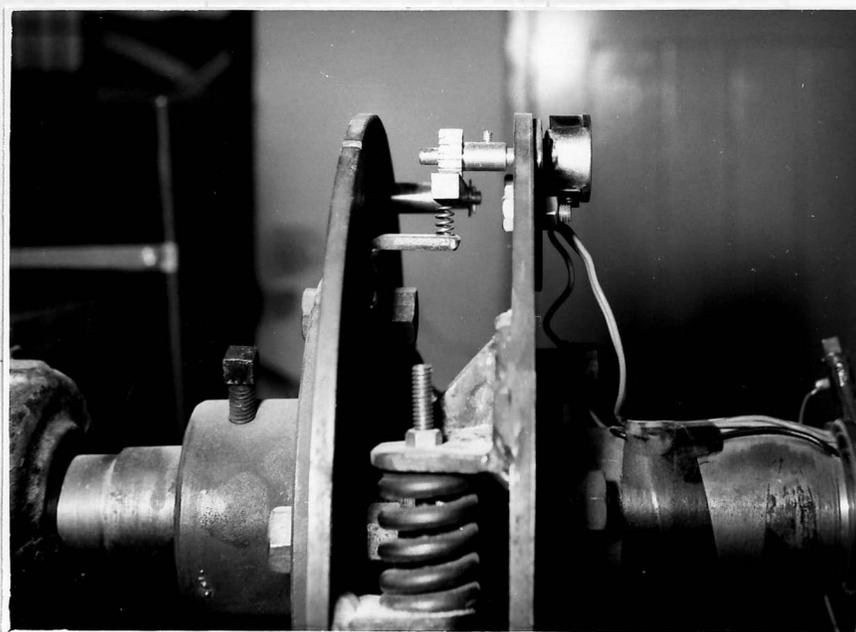


Figura 16. Detalhe dos transdutores.

ficos são apresentados na Figura 17.

Para o conjunto $\underline{m_1}$, o módulo de rigidez $\underline{K_1}$ é de aproximadamente 30 kgf/cm e para o conjunto $\underline{m_2}$, o módulo de rigidez $\underline{K_2}$ é de cerca de 210 kgf/cm. Aplicando-se os valores de $\underline{K_1}$ e $\underline{K_2}$ na equação (9) do Capítulo 3, obtêm-se os seguintes módulos de rigidez à torção:

. conjunto $\underline{m_1}$ $K_{t1} = 79 \text{ cm.kgf/rd}$

. conjunto $\underline{m_2}$ $K_{t2} = 554 \text{ cm.kgf/rd}$

A capacidade do torciômetro pode ser estimada pela e-

quação (8), em função do ângulo α de deslocamento relativo dos discos.

Para o conjunto m_1 , cujo deslocamento máximo, de acordo com o gráfico da Figura 17, é de 20 mm, o deslocamento rela-

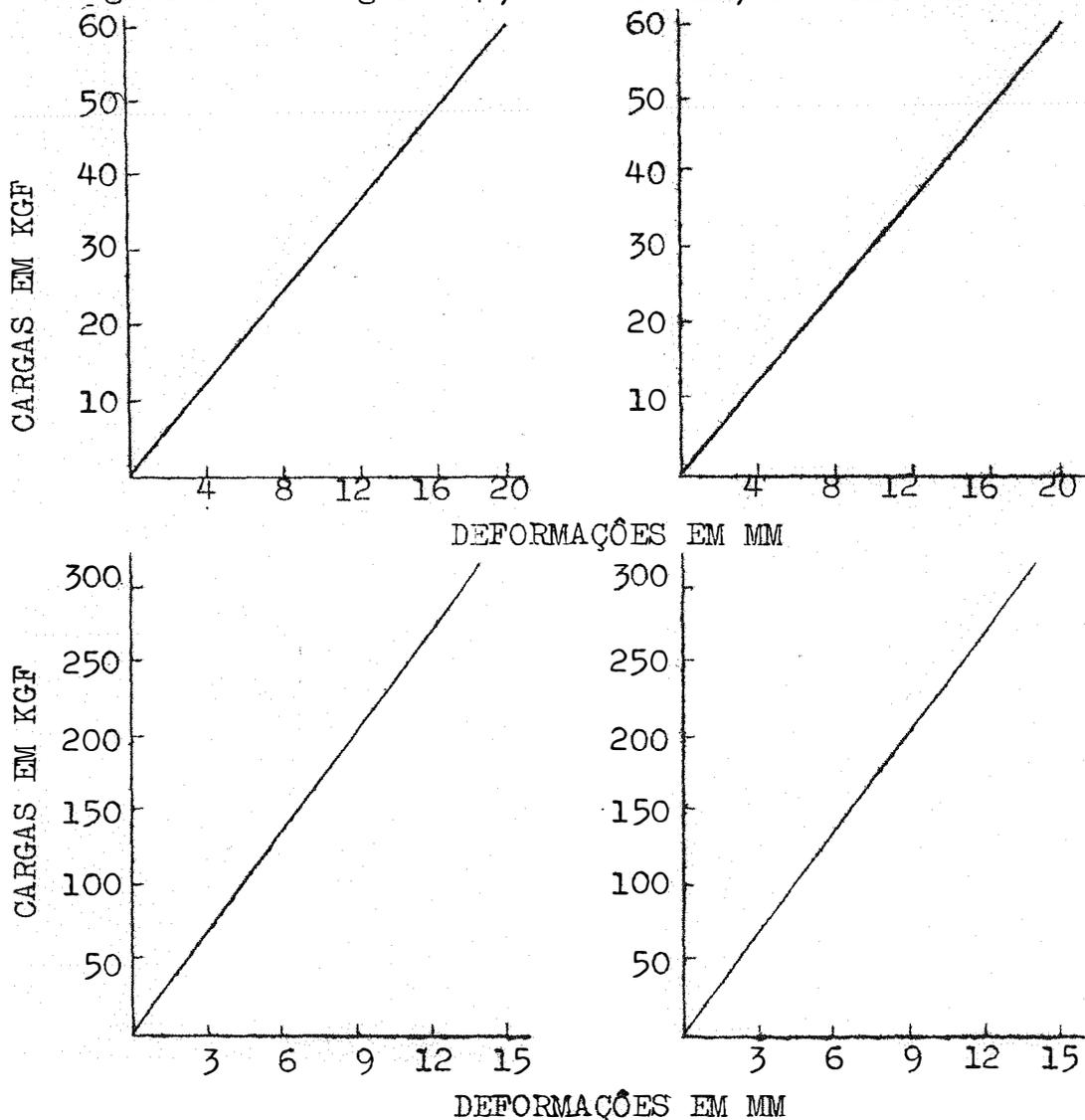


Figura 17. Gráficos de deformação à compressão para os conjuntos de molas m_1 e m_2 .

tivo dos discos é, teoricamente, de 0,173 rd. Nessas condições, a capacidade máxima do torçímetro será de 14 m.kgf.

Para o conjunto m_2 , cujo deslocamento máximo, de acordo com o gráfico, é de 14 mm, o deslocamento relativo dos dis-

cos é de 0,120 rd. Nessas condições, a capacidade máxima do torciômetro será de 66 m.kgf.

Esses valores têm apenas significado como estimativa da ordem de grandeza para o projeto. A escolha dos conjuntos m_1 e m_2 foi feita arbitrariamente.

Sistema Coletor

O sistema coletor é composto de 4 anéis de latão, com 63 mm de diâmetro, isolados entre si por "lucite". Os terminais do transdutor secundário são conectados com 3 anéis através de um túnel de acesso. O quarto anel foi colocado para o caso de alterações no circuito elétrico ou avarias de um dos anéis.

Cada anel do coletor é conectado com o circuito por meio de 2 escovas retangulares de grafite, com 20 mm de comprimento, ligadas em paralelo e diametralmente opostas, para evitar deficiências de contacto, advindas de uma possível excentricidade dos anéis. Com essa disposição das escovas, as variações de resistência elétrica, observadas com ohmímetro, foram de 0,3 a 0,8 ohms, para as diversas rotações de ensaio do coletor.

Sistema de Registro

Como estágio final utilizou-se um registrador potenciométrico Microcord 44, fabricado pela Photovolt Co.- USA, disponível na Cadeira de Mecânica, Motores e Máquinas da E.S.A.L.Q. Trata-se de um "servo-potenciômetro", com auto balanceamento para 4 faixas de operação, a saber: 0,5 , 1,0 , 5,0 e 10,0 milivolts. As seguintes especificações são dadas pelo fabricante:

- . sensibilidade:..... 0,25% do fundo de escala;
- . linearidade:..... 0,25% da escala;
- . acuracidade:..... melhor que 1% em todas as faixas;

- . velocidade da pena:..... 2/3 de segundo para percorrer a escala toda;
- . características do sinal:..... impulsos potenciométricos verdadeiros nas 4 faixas: 0,5 , 1,0 5,0 e 10,0 milivolts em c.c.;
- . amortecimento:..... ajustável manualmente no painel de controle;
- . velocidade do papel:..... padrões de 2 polegadas por minuto e 1 polegada por hora.

Embora não seja especificada pelo fabricante, BECKWITH & BUCK (1961) situam a frequência máxima de trabalho, para esse equipamento, em torno de 100 c.p.s.

Circuito Elétrico

O circuito elétrico, mostrado na Figura 18, consta de uma meia ponte de Wheatstone, com sensibilidade variável e alimentada por uma fonte de corrente contínua marca Cenco, de 135 watts, fabricada pela Central Scientific Company - U.S.A., ou uma bateria convencional de 6 volts, de 17 placas.

A variação da voltagem de saída da ponte, produzida pela variação de resistência no transdutor, é indicada ou registrada no Microcord 44. O circuito empregado apresenta as seguintes vantagens:

- . a medição não será prejudicada por eventuais variações nos contactos do potenciômetro, desde que a variação estranha de resistência, introduzida no circuito, afetará ambos os braços da ponte;
- . qualquer mudança eventual na voltagem de alimentação pode ser detectada, através de uma resistência simuladora de carga.

Segundo o Catálogo 9/62 do Microcord 44, sua sensibilidade, para a escala de 5 milivolts, que foi a escolhida, é de 12,5 microvolts. Por outro lado, através da Figura 18, obser-

va-se que a voltagem máxima de saída da ponte é de 3 volts. Logo, para tornar esta tensão aceitável para o registrador, coloca-se uma resistência divisora de tensão R_S , que representa o estágio II - intermediário modificador, capaz de baixá-la para 5 milivolts.

Segundo recomendação do fabricante, usa-se uma resistência de segurança de 1000 ohms em paralelo com a entrada do Microcord 44, cuja impedância é infinita em relação à resistên-

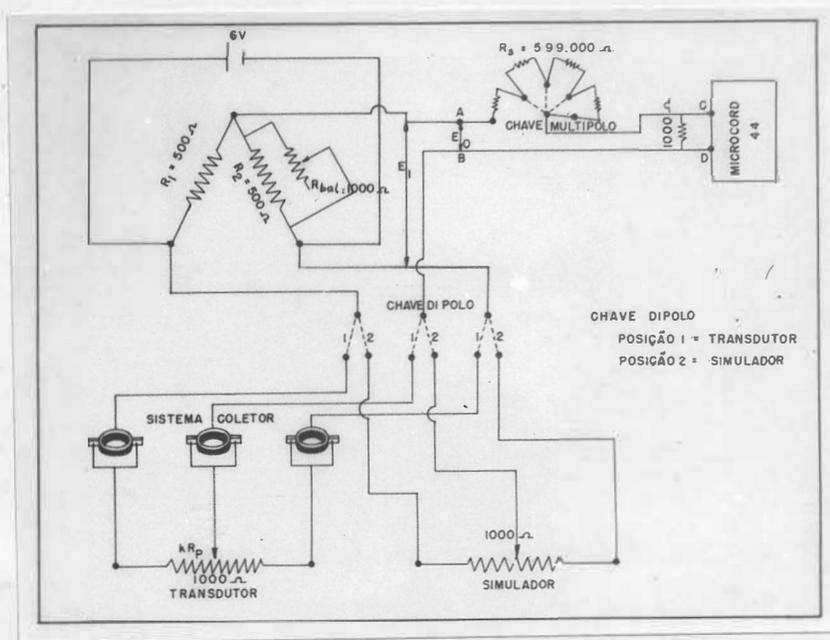


Figura 18. Esquema do circuito elétrico empregado no torciômetro.

cia total do circuito. Aplicando-se a Lei de Ohm ao circuito, tem-se:

$$0,005 = 1000 i \quad (46)$$

$$3 = (R_S + 1000) i \quad (47)$$

Substituindo-se (46) em (47), resulta

$$R_S = 599000 \text{ ohms}$$

Com base na sensibilidade do registrador, pode-se cal-

cular a menor variação do transdutor kR_p , suscetível de ser detectada. A corrente de saída da ponte, correspondente à tensão de 12,5 microvolts entre os pontos C e D da Figura 18, é:

$$i_o = 12,5 \cdot 10^{-9} \text{ ampéres}$$

A diferença de potencial entre os pontos A e B para i_o , será:

$$E_o = 7,5 \text{ milivolts}$$

O circuito funciona como um verdadeiro divisor de tensão e, portanto, pode-se escrever:

$$E_o = kE_1$$

onde k é um valor que varia de 0 a 1 e, no presente caso, tem-se:

$$k = \frac{7,5}{3000}$$

Como o transdutor tem uma resistância total de 1000 ohms, a menor variação detectada é:

$$kR_p = 2,5 \text{ ohms}$$

Esse valor supera as variações observadas para o sistema coletor, de onde se conclui "a priori" que as mesmas não afetarão as medições. Por outro lado, o potenciômetro bobinado escolhido como transdutor secundário apresenta aproximadamente 250 espiras. Seu poder de resolução será de 0,4% da resistência total, ou seja, 4 ohms, valor que se ajusta à sensibilidade do circuito.

Os braços $R_1 = R_2 = 500$ ohms foram calculados de forma que a potência máxima dissipada pelo potenciômetro ficasse bem abaixo do limite máximo estabelecido pelo fabricante. O valor da resistência variável de balanceamento empregada foi de 1000 ohms. Este valor foi estabelecido experimentalmente de modo a se obter uma gama de balanceamento com amplitude maior que a escala do registrador. Com isso pode-se deslocar o ponto zero

da medição ao longo da escala, permitindo um melhor aproveitamento do papel registrador, colocando-se um gráfico ao lado do outro.

Como resistência divisora de tensão R_s , utilizamos 4 resistências associadas em série, totalizando 599000 ohms, ligadas numa chave multipolo. Isso permite que se obtenham diversos níveis de sensibilidade da ponte, tornando possível calibrar o torciômetro com outros sistemas de registro ou indica

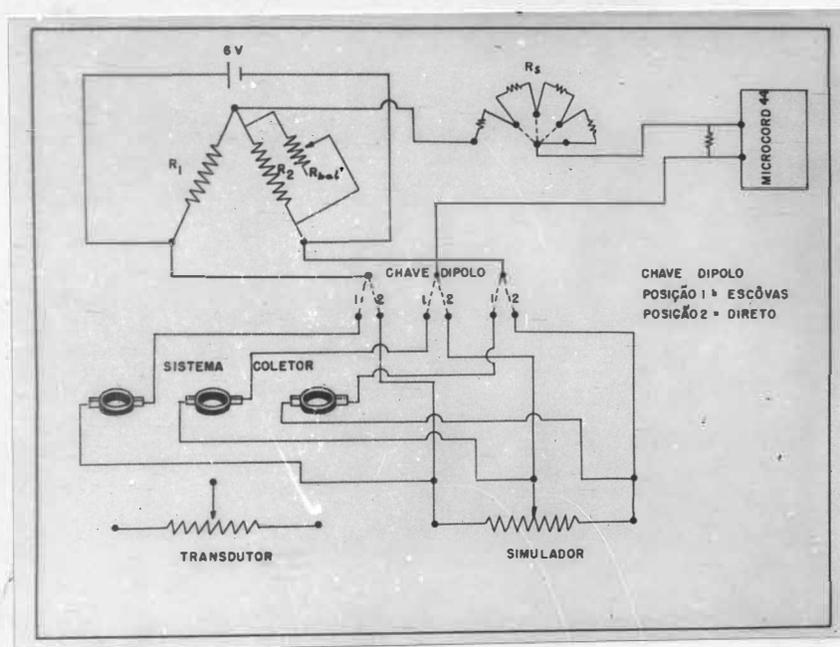


Figura 19. Esquema do circuito elétrico modificado para ensaios do sistema coletor.

ção mais baratos que o Microcord 44.

4.2. Ensaio do Sistema Coletor

Para realizar os ensaios do sistema coletor, visando comprovar seu desempenho funcional, empregaram-se os mesmos materiais descritos em 4.1, com exceção do circuito elétrico. As modificações do circuito elétrico, mostradas na Figura 19, incluem a ligação das escôvas em série, o que representa uma

condição pior do que a de funcionamento normal. Como se observa, a chave bipolo permite enviar o impulso, dado pelo simulador, diretamente ao registrador e, o mesmo impulso, através das escôvas. Assim, é possível a comparação entre ambos, no gráfico, e avaliação do desempenho do coletor.

Modificado o circuito, os ensaios foram conduzidos de duas formas: a) para diferentes rotações do coletor, impulsos de mesma magnitude, são enviados ao registrador diretamente e através das escôvas, de forma alternada; b) para uma mesma rotação, de 540 rpm, impulsos de diferentes magnitudes são enviados ao registrador diretamente e através das escôvas, de forma alternada.

4.3. Ensaio Estáticos

Com a finalidade de comprovar a hipótese estabelecida para a equação (21) do Capítulo 3, que expressa a linearidade entre as variações de torque aplicado e de resistência do transdutor secundário, executaram-se os ensaios estáticos.

Montagem do Equipamento

O conjunto foi montado conforme ilustra a Figura 20. O disco A, da árvore motora, foi fixado a uma barra de ferro cantoneira apoiada na estrutura, por meio de um parafuso de nivelamento, com extremidade cementada. Na extremidade da árvore movida foi acoplada uma flange para fixação de uma barra de ferro de secção retangular, com 2000 mm de comprimento. Em ambas as extremidades da mesma foi colocado um prato com cutelo, para receber os pesos aferidos. Um nível de bôlha, disposto como ilustra a Figura 20, e o parafuso de nivelamento, fixo ao disco A, permitem que antes de cada carregamento estático, a barra seja nivelada.

O circuito elétrico empregado é o descrito em 4.1, ali

mentado pela fonte Cenco, cuja voltagem de saída era medida por um multímetro Sanwa, modelo 370-ATR, fabricado pela Sanwa Electric Co, de sensibilidade igual a 10^5 ohms/volt.

Plano de Ensaio

O planejamento dos ensaios estáticos inclui: a) 3 séries de carregamentos para o conjunto m_1 , a saber, 0 - 5 ,

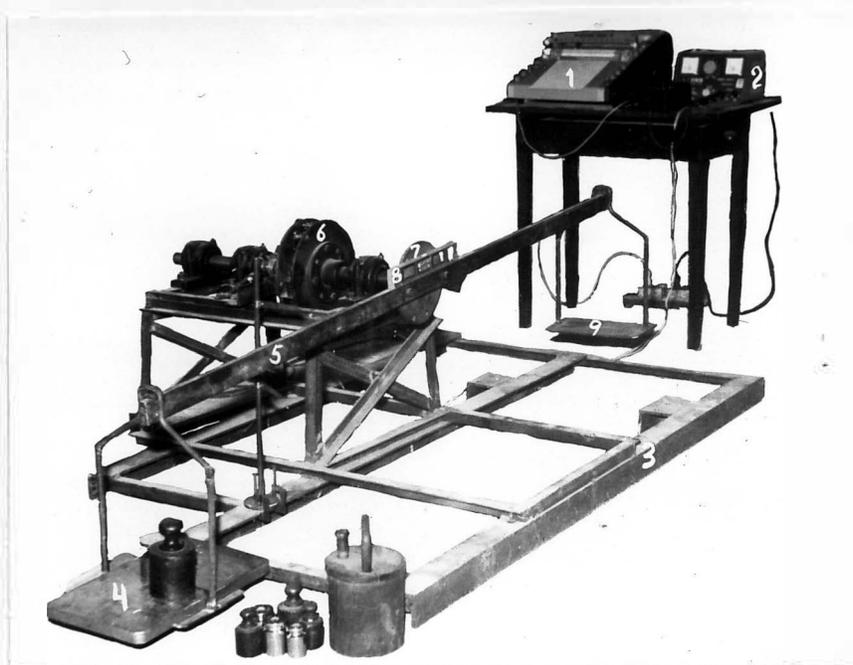


Figura 20. Torciômetro eletromecânico. Vista da montagem do conjunto para ensaio estático, mostrando o registrador (1), a fonte de alimentação (2), a estrutura (3), o prato de carregamento (4), a barra de carregamento (5), o torciômetro (6), a flange de fixação da barra (7), o nível de bôlha (8) e o prato de contra-pesos (9).

0 - 7,5 e 0 - 10 m.kgf; b) 4 séries para o conjunto m_2 , a saber, 0 - 10 , 0 - 20 , 0 - 30 e 0 - 40 m.kgf. Em cada série foram feitos 10 tratamentos, a intervalos de carga constante, com 5 repetições.

Estabelecidas as condições de ensaio, o procedimento

para todos os tratamentos é descrito a seguir:

- . carregou-se o prato com pesos aferidos F , conforme ilustra a Figura 20;
- . colocou-se a resistência simuladora numa posição qualquer, mantida constante durante todos os ensaios de cada conjunto;
- . através da chave bipolo é obtida a leitura do sinal simulado, expressa por L_s deflexões na escala do registrador;
- . acionando-se a chave bipolo, retirou-se a resistência simuladora e intercalou-se o transdutor no circuito, obtendo-se a leitura do sinal correspondente à carga aplicada, expressa por L_t deflexões na escala do registrador;
- . determinou-se o deslocamento linear D de um ponto da barra, situado a 500 mm da linha de centro das árvores, advindo da deformação das molas.
- . converteu-se o deslocamento linear no seu correspondente angular α , através da relação:

$$\alpha = \text{arc tg } \frac{D}{500}$$

- . obtiveram-se os dados de momento de torção M_t , correspondentes às deflexões L_t , pela relação:

$$M_t = F \cos \alpha$$

- . para verificar se o comportamento do sistema se mantinha dentro de limites satisfatórios, carregou-se o prato de contra-pesos com carga igual a F , observando-se leitura nula no registrador e a posição horizontal da barra, pelo nível de bôlha.

A análise estatística dos resultados obtidos envolve o estudo da linearidade de resposta e o estabelecimento das equações de calibração, através de regressão linear. Em virtude de se ter adotado o método dos quadrados mínimos para esta análise, preferiu-se incluir sua descrição no Capítulo referente à Análise e Discussão, a fim de não prejudicar a seqüência expositiva.

4.4. Ensaaios Dinâmicos

Para o estudo do comportamento dinâmico do torciômetro e de acôrdo com a teoria das Vibrações Mecânicas, foi necessário um excitador capaz de submetê-lo a um momento harmônico. Conhecendo-se as amplitudes da vibração forçada para as várias freqüências de excitação, podem-se estabelecer as curvas de ressonância para os conjuntos m_1 e m_2 .

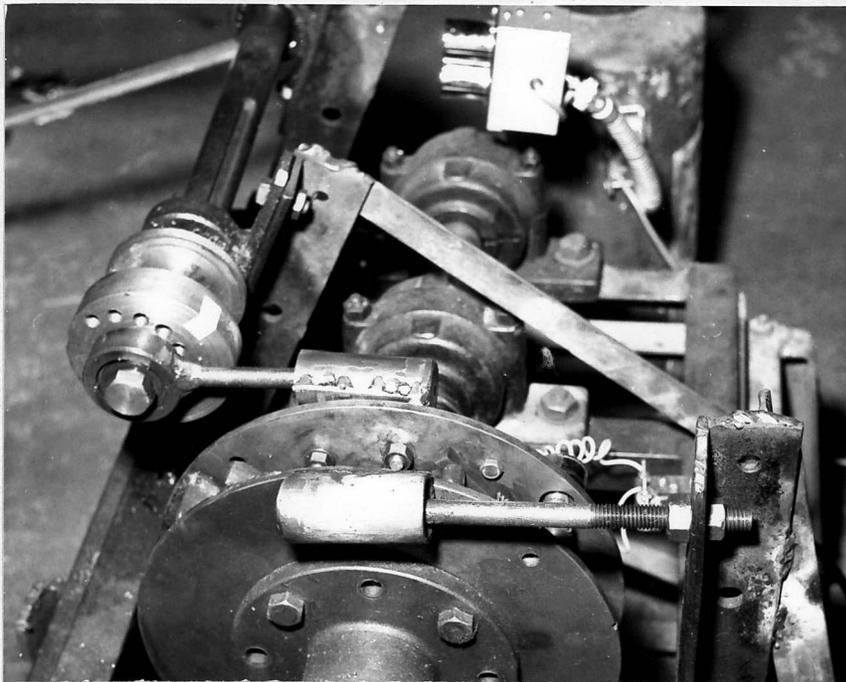


Figura 21. Vista geral da montagem do excitador para ensaios dinâmicos do torciômetro.

Montagem do Equipamento

O excitador construído, mostrado na Figura 21, consta de um braço excêntrico de 130 mm, acoplado ao disco A por meio de u'a mola, contida num cilindro-guia. Um outro braço, de 190 mm de comprimento, cujo acoplamento ao disco B é semelhante ao anterior, está solidário a um suporte rígido da estrutura.

O sistema possui um curso excêntrico variável de 5 a

45 mm, com intervalos iguais de 5 mm. Ressalte-se que os cilindros servem de guias para os extremos dos braços do excitador, fazendo com que a vibração se processe numa única direção.

De acôrdo com MABIE & OCVRK (1967), o momento aplicado pelo excitador é:

$$M = M_0 + M_1 \text{sen } \omega t \quad (48)$$

Mas, $M_0 = K d_e r$, $M_1 = K E r$, onde K é o módulo de rigidez das molas do excitador, d_e a deflexão estática inicial de montagem dessas molas, r a distância do centro dos discos ao centro de apoio, E o raio de excentricidade. Na equação (48), ω é a velocidade angular do excêntrico ou pulsação de excitação e t o tempo.

A obtenção das diversas freqüências de excitação requer o acionamento do excitador por meio de um motor de rotação variável, cuja gama de velocidades angulares permita, pelo menos, levantar-se a porção da curva de ressonância de interêsse na utilização do torciômetro.

O motor utilizado é da marca Anel, de 2,2 H.P., 220 volts trifásico, com rotação nominal de 365 a 2200 rpm. Com base nessa faixa de rpm e na estimativa da freqüência natural do sistema, obtida a partir da equação (34) para os conjuntos m_1 e m_2 , projetaram-se a transmissão e o excitador, utilizando um sistema de polias e correia trapezoidal tipo B.

Segundo HARTOG (1960), a freqüência natural do sistema com baixo amortecimento pode ser considerada como sendo a freqüência natural do sistema sem amortecimento. Assim, chamando-se de I_1 o momento de inércia equivalente das massas em rotação, solidárias ao disco A, e de I_2 aquele das massas solidárias ao disco B, em face das indicações fornecidas pela Figura 15, tem-se:

$$I_1 = 0,376 \text{ kgf.cm.s}^2$$

$$I_2 = 0,409 \text{ kgf.cm.s}^2$$

resultando em:

$$I = 0,196 \text{ kgf.cm.s}^{2*}$$

Considerando-se para o conjunto m_1 , $K_1 \approx 30 \text{ kgf/cm}$,
tem-se:

$$\omega_{n1} \approx 201,128 \text{ rd/s}$$

$$f_{n1} \approx 32 \text{ c.p.s.}$$

Para o conjunto m_2 , considerando-se $K_2 \approx 210 \text{ kgf/cm}$,
vem:

$$\omega_{n2} \approx 532,016 \text{ rd/s}$$

$$f_{n2} \approx 85 \text{ c.p.s.}$$

A relação de transmissão capaz de atender a estas duas frequências é de 1:1 e de 3:1, cobrindo teoricamente uma faixa de aproximadamente 6 a 110 c.p.s. de excitação.

Um controle preliminar da excitação foi obtido através de um tacômetro foto-elétrico da marca Pioneer Photo-Tach, modelo 36 R. O transdutor foi ligado ao circuito ponte, alimentado por uma bateria convencional de 6 volts. Como indicador, empregou-se um osciloscópio da marca Tektronix, tipo 503.

Procedimento de Ensaios

Os ensaios dinâmicos incluem 29 níveis de excitações do torciômetro para o conjunto m_1 e 40 níveis para o conjunto m_2 . Estes níveis foram obtidos ao acaso, em sequência crescente, diferenciados "a priori" pela indicação da rpm da árvore do excêntrico, através do tacômetro foto-elétrico.

Estabelecidas as condições de ensaio, o procedimento

(*) Os valores foram obtidos considerando-se a aceleração da gravidade igual a 981 cm/s^2 ; o peso específico do aço como 7,8 e do ferro fundido igual a 7,2.

para tôdas as determinações é descrito a seguir:

- . colocou-se em funcionamento o motor, obtendo-se uma dada frequência de excitação;
- . na tela do osciloscópio fotografou-se a onda da vibração forçada;
- . anotaram-se a rotação da árvore do excêntrico, o número da foto e os dados de como foi obtida, além dos dados da escala empregada nos contrôles de sensibilidade horizontal e vertical do osciloscópio.

O conjunto m_1 foi excitado até atingir a ressonância e ultrapassá-la, enquanto que para o conjunto m_2 , o deslizamento da correia aliada à rpm máxima efetiva do motor, permitiu chegar apenas a 5000 rpm, sem ter atingido a ressonância.

A análise dos dados obtidos no ensaio dinâmico consiste na interpretação das fotos das ondas da vibração forçada. Esta envolve o cálculo das amplitudes e frequências, a execução dos gráficos das curvas de ressonância e a determinação dos parâmetros dinâmicos, segundo métodos convencionais em engenharia mecânica.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos no presente trabalho envolvem aquêles referentes aos ensaios do sistema coletor, aos de calibração estática e aos ensaios dinâmicos, executados segundo os métodos respectivamente descritos em 4.2, 4.3 e 4.4.

5.1. Ensaio do Sistema Coletor

Os resultados dos ensaios do sistema coletor, referentes a diferentes rotações, com impulsos de mesma magnitude, constam no gráfico da Figura 22.

Os resultados dos ensaios realizados com impulsos de diferentes magnitudes, a uma mesma rotação, são fornecidos pelo gráfico da Figura 23.

Em ambos os gráficos, o símbolo -O- indica o sinal recebido pelo registrador através das escôvas em série no circuito.

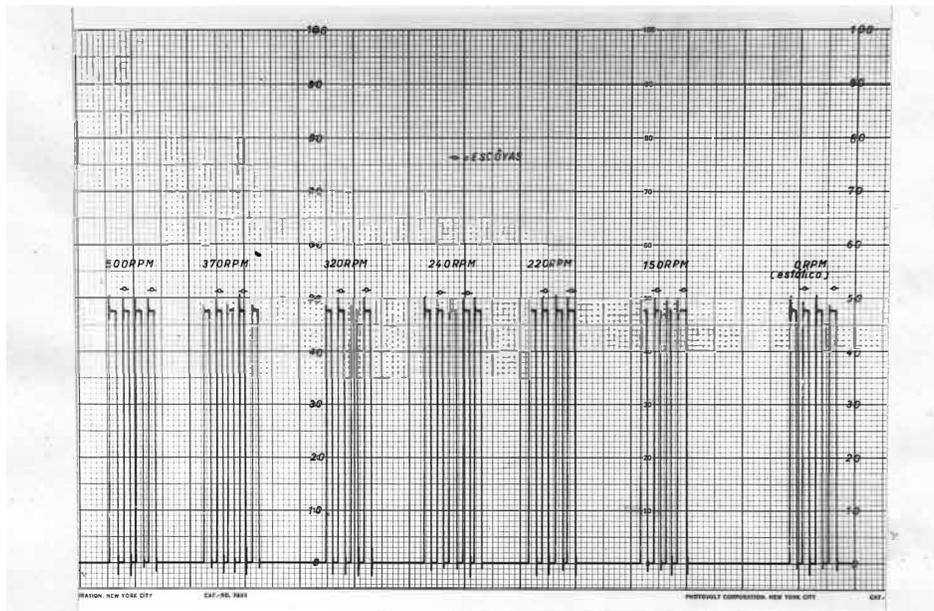


Figura 22. Resultados obtidos para diferentes rotações do coletor, com impulsos de mesma magnitude.

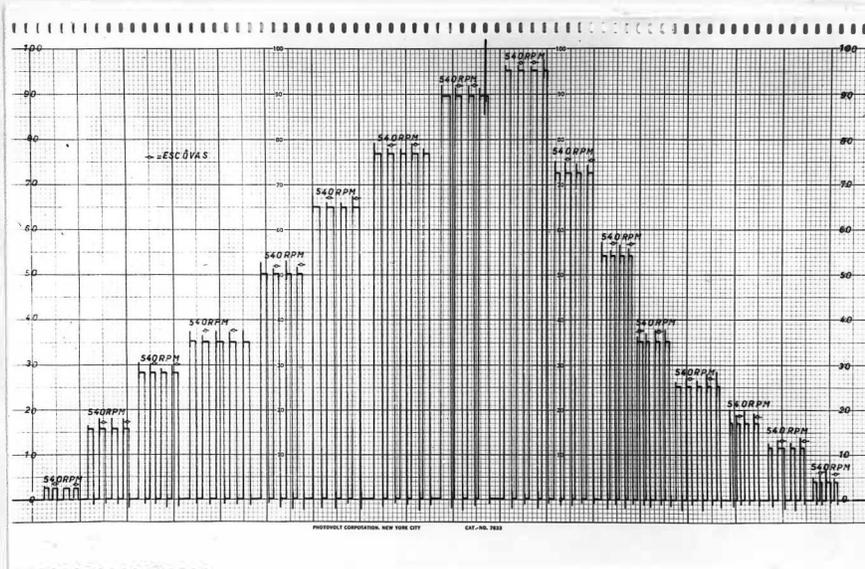


Figura 23. Resultados obtidos para uma mesma rotação do coletor, com impulsos de diferentes magnitudes.

5.2. Ensaio Estáticos

Os resultados obtidos diretamente dos ensaios abrangem os dados de torque aplicado em m.kgf, bem como as leituras simuladas L_s em deflexões e ainda as leituras correspondentes aos carregamentos L_t em deflexões.

A partir destes dados, resultantes de 5 repetições, elaboraram-se as tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, referentes às 3 séries de carregamentos para o conjunto m_1 nas quais constam o torque corrigido e as médias das 5 leituras L_s e L_t para cada carregamento.

De modo semelhante, construíram-se as tabelas 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7, correspondentes às 4 séries de carregamentos para o conjunto m_2 .

Tabela 5.1. Dados obtidos para o conjunto m_1 no ensaio de 0 - 5 m.kgf.

TORQUE CORRIGIDO (m.kgf)	LEITURA SIMULADA Deflexões (L_s)	LEITURA TORCIÔMETRO Deflexões (L_t)
0,50	38,4	0,0
1,00	38,4	0,0
1,50	38,2	3,2
2,00	38,2	9,8
2,50	38,4	15,0
3,00	38,0	20,4
3,50	38,0	26,0
4,00	38,0	31,0
4,49	38,0	36,4
4,99	38,0	42,0

Tabela 5.2. Dados obtidos para o conjunto m_1 no ensaio de 0 - 7,5 m.kgf.

TORQUE CORRIGIDO (m.kgf)	LEITURA SIMULADA Deflexões (L_s)	LEITURA TORCIÔMETRO Deflexões (L_t)
0,75	37,8	0,0
1,50	37,8	3,6
2,25	37,8	12,8
3,00	37,8	20,2
3,75	37,6	28,4
4,49	37,8	36,8
5,24	38,0	45,0
5,99	38,2	53,6
6,73	38,0	61,2
7,47	38,2	69,6

Tabela 5.3. Dados obtidos para o conjunto m_1 no ensaio de 0 - 10 m.kgf.

TORQUE CORRIGIDO (m.kgf)	LEITURA SIMULADA Deflexões (L_s)	LEITURA TORCIÔMETRO Deflexões (L_t)
1,00	38,8	0,0
2,00	38,8	9,4
3,00	38,8	21,0
4,00	38,8	31,8
4,99	38,8	42,6
5,99	38,8	54,4
6,98	38,8	65,6
7,96	39,0	75,6
8,95	39,0	86,4
9,93	39,0	95,4

Tabela 5.4. Dados obtidos para o conjunto m_2 no ensaio de 0 - 10 m.kgf.

TORQUE CORRIGIDO (m.kgf)	LEITURA SIMULADA Deflexões (L_s)	LEITURA TORCIÔMETRO Deflexões (L_t)
1,00	38,8	0,0
2,00	38,8	0,0
3,00	38,8	0,8
4,00	38,8	2,0
5,00	38,8	4,8
6,00	38,8	6,0
7,00	38,6	7,8
8,00	38,8	9,8
9,00	39,0	11,0
10,00	38,4	12,8

Tabela 5.5. Dados obtidos para o conjunto m_2 no ensaio de 0 - 20 m.kgf.

TORQUE CORRIGIDO (m.kgf)	LEITURA SIMULADA Deflexões (L_s)	LEITURA TORCIÔMETRO Deflexões (L_t)
2,00	37,8	0,0
4,00	37,6	1,6
6,00	37,6	6,2
8,00	37,4	9,2
10,00	37,8	13,0
11,99	37,4	16,0
13,99	37,8	19,8
15,98	37,4	22,6
17,98	37,4	26,0
19,97	37,4	29,2

Tabela 5.6. Dados obtidos para o conjunto m₂ no ensaio de 0 - 30 m.kgf.

TORQUE CORRIGIDO (m.kgf)	LEITURA SIMULADA Deflexões (L _s)	LEITURA TORCIÔMETRO Deflexões (L _t)
3,00	37,6	0,0
6,00	37,8	6,0
9,00	37,4	11,4
11,99	38,0	16,6
14,99	37,8	21,4
17,98	37,8	26,8
20,96	37,6	31,2
23,94	37,8	36,6
26,91	37,8	41,6
29,88	38,0	46,2

Tabela 5.7. Dados obtidos para o conjunto m₂ no ensaio de 0 - 40 m.kgf.

TORQUE CORRIGIDO (m.kgf)	LEITURA SIMULADA Deflexões (L _s)	LEITURA TORCIÔMETRO Deflexões (L _t)
4,00	39,0	2,2
8,00	38,6	10,8
11,99	38,8	18,0
15,98	38,6	25,4
19,97	39,0	33,0
23,94	39,0	40,0
27,91	39,2	46,4
31,86	39,2	53,4
35,81	39,2	59,8
39,75	39,2	65,6

5.3. Ensaio Dinâmicos

Os dados obtidos diretamente dos ensaios dinâmicos abrangem as ondas da vibração forçada, fotografadas na tela do osciloscópio, e os dados da escala empregada nos controles de sensibilidade horizontal e vertical correspondentes.

A partir destes dados elaboraram-se as tabelas 5.8 e 5.9 respectivamente para os conjuntos m_1 e m_2 , onde constam as

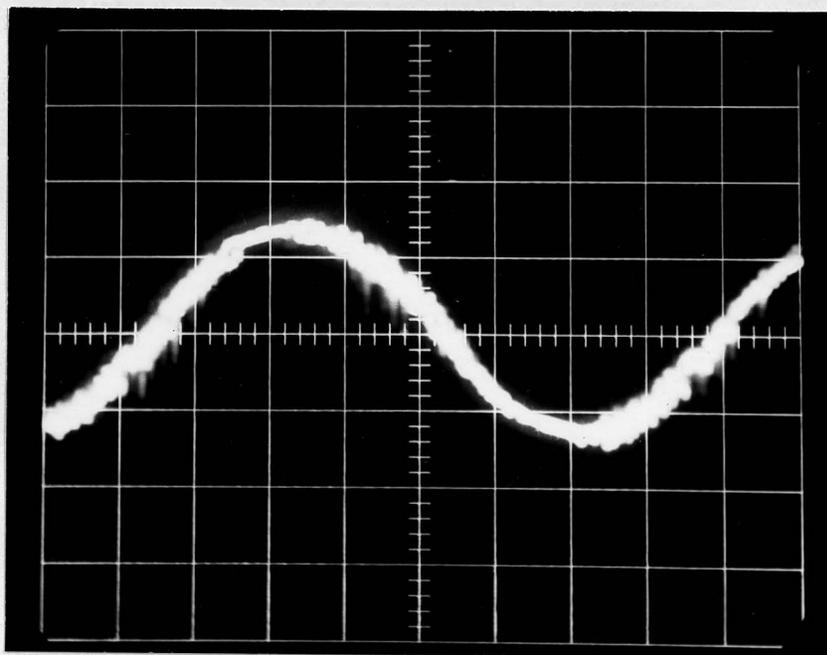


Figura 24. Onda de vibração forçada, fotografada na tela do osciloscópio em ensaio dinâmico do conjunto m_1 .

amplitudes e freqüências da vibração.

A Figura 24, que corresponde na tabela 5.8 à observação assinalada com asterístico, é tomada como exemplo para demonstrar como a referida tabela foi elaborada. Assim, para esta onda de vibração, os dados são os seguintes:

- . sensibilidade horizontal = 5 ms/cm
- . sensibilidade vertical = 0,2 V/cm

A leitura da amplitude "pico a pico", segundo esta in-

terpretação, é de 2,7 cm e do tempo 3,8 cm, correspondente a meio período, portanto tem-se:

$$\text{AMPLITUDE (p. a p.)} = 540 \text{ mV}$$

$$\text{AMPLITUDE} = 270 \text{ mV}$$

$$\text{PERÍODO} = 0,038 \text{ s}$$

$$\text{FREQUÊNCIA} = 26,3 \text{ c.p.s.}$$

Como a interpretação da foto é um tanto subjetiva, calculou-se o erro relativo de interpretação de amplitude e frequência, admitindo uma variação máxima de 2 mm na leitura de dois observadores, uma vez que este é o valor de cada divisão no reticulado da tela e, acredita-se, a máxima discrepância provável. Assim, outro observador (que, na Figura 24 interpretasse a leitura da amplitude como sendo 2,5 cm e do tempo como 3,6 cm) teria:

$$\text{AMPLITUDE} = 250 \text{ mV}$$

$$\text{PERÍODO} = 0,036 \text{ s}$$

$$\text{FREQUÊNCIA} = 27,7 \text{ c.p.s.}$$

O erro relativo de amplitude seria:

$$E_a = \frac{270 - 250}{250} 100$$

$$E_a = 4\%$$

O erro relativo de frequência seria:

$$E_f = \frac{27,7 - 26,6}{26,6} 100$$

$$E_f = 4\%$$

A Figura 25, que corresponde na tabela 5.9 à observação assinalada com asterístico, é tomada como exemplo para demonstrar como a referida tabela foi elaborada. Assim, para esta onda de vibração, os dados são os seguintes:

. sensibilidade horizontal = 5 ms/cm

. sensibilidade vertical = 0,1 V/cm

A leitura da amplitude "pico a pico", segundo esta interpretação, é de 3,8 cm e do tempo 2,4 cm para um período, daí encontrar-se:

$$\text{AMPLITUDE} = 190 \text{ mV}$$

$$\text{PERÍODO} = 0,012 \text{ s}$$

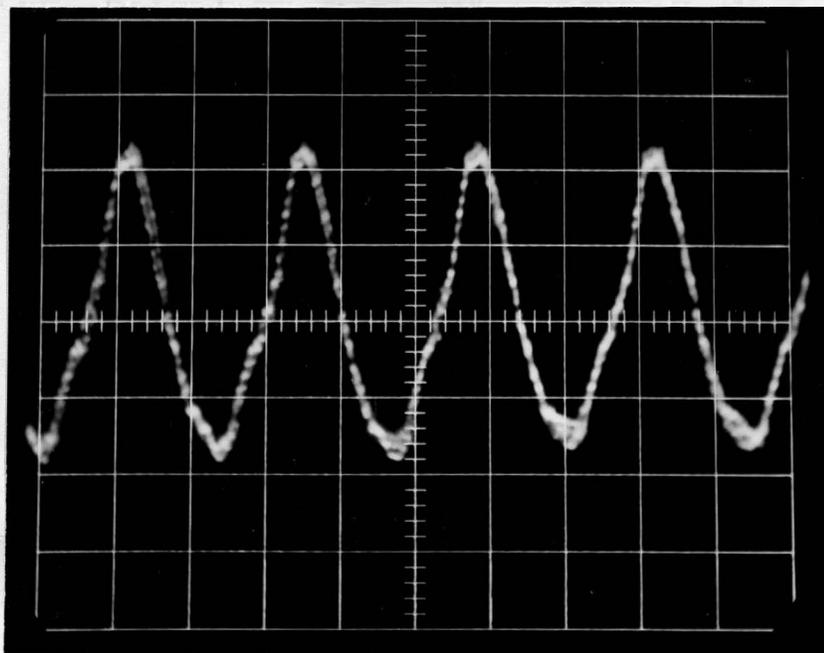


Figura 25. Onda de vibração forçada, fotografada na tela do osciloscópio em ensaio dinâmico do conjunto m_2 .

$$\text{FREQUÊNCIA} = 83,3 \text{ c.p.s.}$$

A seguir, apresentam-se as tabelas 5.8 e 5.9, que têm os dados obtidos respectivamente para os conjuntos m_1 e m_2 .

Tabela 5.8. Amplitude e frequência da vibração forçada, obtidas em ensaio dinâmico do conjunto m₁.

AMPLITUDE (mV)	FREQUÊNCIA (c.p.s.)	AMPLITUDE (mV)	FREQUÊNCIA (c.p.s.)
130	4,5	1250	32,8
130	8,1	1300	33,3
130	10,0	1020	33,9
160	11,0	650	35,1
155	12,5	370	37,7
170	14,6	350	40,0
160	15,5	235	41,7
180	18,4	180	43,5
170	20,0	150	47,6
230	24,4	90	51,3
270*	26,3*	95	52,6
740	29,0	70	57,1
800	29,9	60	58,8
790	30,8	60	62,5
925	31,7	--	----

Tabela 5.9. Amplitude e frequência da vibração forçada, obtidas em ensaio dinâmico do conjunto m_2 .

AMPLITUDE (mV)	FREQUÊNCIA (c.p.s.)	AMPLITUDE (mV)	FREQUÊNCIA (c.p.s.)
50	7,3	60	50,0
50	10,6	60	51,3
45	12,5	70	55,6
50	13,8	65	57,1
50	16,2	70	58,8
55	18,3	80	62,5
50	20,0	90	64,1
50	22,5	90	65,8
50	25,0	95	67,5
55	27,0	105	69,0
60	29,4	105	70,4
60	30,3	110	71,4
60	32,3	115	72,5
65	33,3	120	73,5
60	35,7	125	74,1
55	38,5	145	75,2
60	40,0	150	76,9
60	41,7	150	78,1
60	45,5	170	80,0
65	47,6	190*	83,3*

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise e a discussão dos resultados obtidos nos ensaios do torçômetro eletromecânico serão feitas em separado, para os ensaios do sistema coletor, os ensaios estáticos e dinâmicos. Elas abrangerão cada um dos aspectos considerados de importância na aplicação do torçômetro, na determinação do torque em máquinas agrícolas.

6.1. Análise e Discussão dos Ensaios do Sistema Coletor

Em face dos resultados obtidos nos ensaios do sistema coletor, os quais são apresentados nas Figuras 22 e 23, é forçoso admitir, por um simples exame visual das mesmas, que não há diferença significativa entre os impulsos. Isso sugere que o sistema coletor atende plenamente às exigências do projeto, não introduzindo alterações no sinal básico. Tal conclu-

são é reforçada, levando-se em consideração que, em condições operacionais, as escôvas são ligadas em paralelo, melhorando a captação do sinal elétrico.

6.2. Análise e Discussão dos Ensaios Estáticos

A análise dos dados obtidos, para cada conjunto, nos ensaios de aferição estática, engloba os seguintes itens:

- . comprovar a linearidade de resposta ao tor que aplicado, verificando se existe regressão linear;
- . no caso de haver significância para a regressão linear, verificar se os coeficientes das retas de regressão não diferem para os ensaios de cada conjunto;
- . verificar se há efeito da variação de voltagem nos ensaios;
- . no caso de haver influência provocada por esta variação, introduzir mais uma variável que expresse o fenômeno, para ajuste da equação final.

Para execução da análise estatística, utilizou-se o seguinte modelo matemático:

$$y_i = a_i + b_{1i}x_{1i} + b_{2i}x_{2i} + e_i$$

onde:

a_i expressa o efeito do ensaio de ordem i ou seja:

$i = 1, 2$ e 3 , para o conjunto m_1 (0-5, 0-7,5 e 0-10 m.kgf),

$i = 1, 2, 3$ e 4 , para o conjunto m_2 (0-10, 0-20, 0-30 e 0-40 m.kgf),

x_{1i} = torque aplicado no ensaio i ,

x_{2i} = leitura simulada (L_s) que expressa a voltagem no ensaio i ,

e_i = erro aleatório com $N(0, \sigma^2)$,

y_i = leitura (L_t) correspondente a carga x_{1i} aplicada.

Com os dados das tabelas de números 5.1 a 5.7, envolvendo todos os parâmetros, montaram-se as matrizes X e Y para

cada conjunto, as quais se acham indicadas no Apêndice 1.

Baseando-se no método dos quadrados mínimos, resolveu-se a equação matricial:

$$X'X\hat{\beta} = X'Y$$

Donde se calcula a análise de variância:

. soma dos quadrados de parâmetros = $\hat{\beta}'X'Y$

. soma dos quadrados de resíduo = $Y'Y - \hat{\beta}'X'Y$

Para melhor exposição, discutir-se-á separadamente a análise de cada conjunto.

Análise e discussão para o conjunto m_1

A verificação da hipótese de que os dados seguem uma relação linear, corresponde a fazer:

$b_{11} = b_{12} = b_{13} = 0$ e $b_{21} = b_{22} = b_{23} = 0$; para isso fêz-se a seguinte análise de variância:

Causa de Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
$R(a_i, b_{1i}, b_{2i})$	9	54 562,6905		
$R(a_i)$	3	37 599,2720		
$R(b_{1i}, b_{2i}/a_i)$	6	16 963,4185	2 827,2364	1 365,81***
Resíduo	21	43,4694	2,0700	
Total	30	54 606,1599		

Os dados mostram-se significativos ao nível de 0,1% de probabilidade para a regressão linear, o que comprova a linearidade da resposta.

Em seguida, verificou-se o segundo item, o que foi feito em duas fases:

a) verificou-se se os coeficientes lineares das retas de regressão não diferem, o que corresponde a se fazer a hipóte

se de que:

$a_1 = a_2 = a_3 = a$; fêz-se a seguinte análise de variância:

Causa de Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
$R(a_i, b_{1i}, b_{2i})$	9	54 562,6905		
$R(a, b_{1i}, b_{2i})$	7	54 561,2052		
$R(a_i/a)$	2	1,4853	0,7426	0,36 n.s.
Resíduo	21	43,4694	2,0700	
Total	30	54 606,1599		

Essa hipótese corresponde à verificação do efeito de ensaio, o que autoriza a admitir-se que não houve efeito de ensaios, ou seja, os coeficientes lineares não diferem com 95% de probabilidade.

b) verificou-se se os coeficientes da variável x_{1i} não diferem, o que corresponde a hipótese de que:

$b_{11} = b_{12} = b_{13} = b$; para isso fêz-se a seguinte análise de variância:

Causa de Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
$R(a_i, b_{1i}, b_{2i})$	9	54 562,6905		
$R(a_i, b, b_{2i})$	7	54 556,8068		
$R(b_{1i}/b)$	2	5,8836	2,9418	1,42 n.s.
Resíduo	21	43,4694	2,0700	
Total	30	54 606,1599		

Os valores dos coeficientes da variável x_{1i} não diferem com 95% de probabilidade.

Finalmente, verificou-se se houve influência da variação de voltagem durante os ensaios. A análise de variância foi a seguinte:

Causa da Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
R(a _i , b _{1i} , b _{2i})	9	54 562,6905		
R(a _i , b _{1i})	6	54 559,2636		
R(b _{2i} /a _i , b _{1i})	3	3,4269	1,1423	0,55 n.s.
Resíduo	21	43,4694	2,0700	
Total	30	54 606,1599		

Os dados, com 95% de probabilidade, não foram afetados pela variação da voltagem durante os ensaios, o que permite eliminar a variável x_{2i} do modelo matemático.

Em vista das análises precedentes, pode-se tomar uma única equação de regressão, do tipo $\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}x$, onde os \hat{y} são as leituras correspondentes à cargas aplicadas x. As estimativas de a e b são obtidas pelas relações:

$$\hat{b} = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{N}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{N}$$

$$\hat{a} = \bar{x} - \hat{b}\bar{y}$$

N = número de observações

Aplicando-se as relações acima para os dados, vem:

$$y = 10,9968 + 10,7501x \quad (49)$$

que é a equação de regressão para o conjunto m₁.

Análise e discussão para o conjunto m_2

Procurou-se verificar se os dados seguem uma relação linear, o que corresponde a fazer a seguinte hipótese:

$b_{11} = b_{12} = b_{13} = b_{14} = 0$ e $b_{21} = b_{22} = b_{23} = b_{24} = 0$.
Para isso, fêz-se a seguinte análise de variância:

Causa de Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
$R(a_i, b_{1i}, b_{2i})$	12	27 933,3149		
$R(a_i)$	4	20 593,5960		
$R(b_{1i}, b_{2i}/a_i)$	8	7 339,7189	917,4648	1 910,59***
Resíduo	28	13,4451	0,4802	
Total	40	27 946,7600		

Os dados mostram-se significativos ao nível de 0,1% de probabilidade para a regressão linear, o que comprova a linearidade de resposta.

De modo semelhante, o segundo item foi atingido através de duas etapas:

a) verificou-se se os coeficientes lineares das retas de regressão não diferem, o que corresponde a se fazer a hipótese de que:

$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$; fêz-se a seguinte análise de variância:

Causa da Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
$R(a_i, b_{1i}, b_{2i})$	12	27 933,3149		
$R(a, b_{1i}, b_{2i})$	9	27 931,8562		
$R(a_i/a)$	3	1,4587	0,4862	1,01 n.s.
Resíduo	28	13,4451	0,4802	
Total	40	27 946,7600		

Essa hipótese autoriza a admitir-se que não houve efeito de ensaios, uma vez que os coeficientes lineares não diferem ao nível de 5% de probabilidade.

b) verificou-se se os coeficientes da variável x_{1i} não diferem, o que corresponde a hipótese de que:

$b_{11} = b_{12} = b_{13} = b_{14} = b$; para isso fêz-se a seguinte análise de variância:

Causa da Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
R(a_i, b_{1i}, b_{2i})	12	27 933,3149		
R(a_i, b, b_{2i})	9	27 927,3633		
R(b_{1i}/b)	3	5,9516	1,9839	4,13*
Resíduo	28	13,4451	0,4802	
Total	40	27 946,7600		

Os valores dos coeficientes angulares mostram-se significativamente diferentes entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Finalmente, verificou-se se houve influência da variação de voltagem durante os ensaios. Fêz-se a seguinte análise de variância.

Causa de Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
R(a_i, b_{1i}, b_{2i})	12	27 933,3149		
R(a_i, b_{1i})	8	27 931,8725		
R($b_{2i}/a_i, b_{1i}$)	4	1,4424	0,3606	0,75 n.s.
Resíduo	28	13,4451	0,4802	
Total	40	27 946,7600		

Os dados, com 95% de probabilidade, não foram afetados pela variação de voltagem durante os ensaios, o que permite eli

minar a variável x_{2i} da equação de regressão.

Das análises precedentes, em virtude dos coeficientes angulares se mostrarem estatisticamente diferentes entre si, cada ensaio pode ser expresso por uma equação de regressão do tipo $\hat{y}_i = \hat{a}_i + \hat{b}_i x$.

A diferença estatisticamente significativa entre os coeficientes angulares das retas de regressão dos ensaios do conjunto m_2 , de certa forma pode ser explicada pelo baixo valor da variância do resíduo (0,4802) em relação à variância do resíduo dos ensaios do conjunto m_1 (2,0700). Isso indica que os coeficientes angulares para este caso foram determinados com um erro bem inferior, indicando maior acuracidade dos ensaios.

Em vista disso, estabeleceram-se as quatro equações de regressão:

$$y = - 3,0267 + 1,5503x \quad (\text{ensaio } 0 - 10 \text{ m.kgf})$$

$$y = - 4,0024 + 1,6707x \quad (\text{ensaio } 0 - 20 \text{ m.kgf})$$

$$y = - 4,2879 + 1,7047x \quad (\text{ensaio } 0 - 30 \text{ m.kgf})$$

$$y = - 3,3944 + 1,7716x \quad (\text{ensaio } 0 - 40 \text{ m.kgf})$$

Embora haja diferença entre os quatro coeficientes angulares, visando a aplicação do torciômetro, procurou-se reduzir o número de equações, determinando-se quais os coeficientes que não diferem estatisticamente. Assim, um simples exame visual das equações leva à comparação dos três últimos, que são menos discrepantes.

Isto consiste em se fazer a hipótese de que:

$b_{12} = b_{13} = b_{14} = b_1$; para isso fêz-se a seguinte análise de variância:

Causa da Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
R(a_i, b_{1i})	6	27 431,0888		
R(a_i, b_1)	4	27 427,4004		
R(b_{1i}/b_1)	2	3,6884	1,8442	4,31*
Resíduo	24	10,2712	0,4280	
Total	30	27 441,3600		

Os três últimos coeficientes angulares das equações mostram-se diferentes ao nível de 5% de probabilidade.

Com isso, pode-se levantar a hipótese de que:

$b_{12} = b_{13} = b_1$; do que resultou a seguinte análise de variância:

Causa da Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
$R(a_i, b_{1i})$	4	10 774,3460		
$R(a_i, b_1)$	3	10 774,0828		
$R(b_{1i}/b_1)$	1	0,2632	0,2632	1,22 n.s.
Resíduo	16	3,4540	0,2159	
Total	20	10 777,8000		

Os valores b_{12} e b_{13} não diferem com 95% de probabilidade. E para a hipótese de que:

$b_{13} = b_{14} = b_1$; resultou a seguinte análise de variância:

Causa da Variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	F
$R(a_i, b_{1i})$	4	24 450,9803		
$R(a_i, b_1)$	3	24 448,9346		
$R(b_{1i}/b_1)$	1	2,0457	2,0457	3,94 n.s.
Resíduo	16	8,2997	0,5187	
Total	20	24 459,2800		

Os valores b_{13} e b_{14} não diferem com 95% de probabilidade.

Com base nestas análises, juntaram-se os dados dos ensaios 0 -20 e 0 - 30 m.kgf, obtendo-se a equação de regressão : $y = - 4,2350 + 1,6976x$. Isso reduz de uma equação o número total de equações para o conjunto m_2 , as quais são apresentadas a

seguir:

$$y = - 3,0267 + 1,5503x \quad (50)$$

$$y = - 4,2350 + 1,6976x \quad (51)$$

$$y = - 3,3944 + 1,7716x \quad (52)$$

Uma vez estabelecidas as equações para os dois conjuntos, procurou-se interpretar as mesmas visando a aplicação do torciômetro.

Interpretação da análise para o conjunto m_1

A equação (49), quando se procura determinar o torque, torna-se:

$$x = 1,02 + 0,09y \quad (53)$$

Um exame na equação (53) leva às seguintes interpretações com relação a aplicação do torciômetro:

. o conjunto m_1 só detecta variações de torque acima de 1,02 m.kgf;

. a sensibilidade em termos de carga é dada pela relação $dx/dy = 0,09$ ou aproximadamente 0,1 m.kgf;

. para a determinação do erro com que se pode medir o torque, aplicando a equação, estabeleceu-se o intervalo de confiança da mesma.

Ainda que os valores de \underline{x} não sigam em geral distribuição normal, de acôrdo com BENNETT & FRANKLIN (1961), desde que a relação b/σ_b^2 , seja suficientemente grande, como é o presente caso, os valores dos \underline{x} podem ser admitidos como seguindo distribuição normal.

Se \underline{y} é a média de \underline{n} observações, tôdas da mesma incógnita \underline{x} , resulta o seguinte valor da variância:

$$\sigma_x^2 = \frac{\frac{\sigma_y^2}{n} + \frac{\sigma_y^2}{y}}{b^2} + \frac{\sigma_b^2}{b^4} (y - \bar{y})^2 \quad (54)$$

Com base nesta equação, calculou-se os valores do limite superior e inferior para cada \hat{x} esperado, correspondente a uma dada leitura \hat{y} , média de 5 observações, obtendo-se o intervalo de confiança IC, com o auxílio do valor t ao nível de 5% de probabilidade:

$$IC = \hat{x} \pm t \cdot s(x)$$

$$s(x) = \text{desvio padrão de } \hat{x}$$

Com os dados assim calculados, elaborou-se a tabela 1 do Apêndice 2. Nesta, por exemplo, para uma leitura $\hat{y} = 42$ deflexões, espera-se um valor de torque igual a 4,93 m.kgf, com 95% de probabilidade do intervalo de 4,79 - 5,07 m.kgf conter o verdadeiro valor do torque. Na condição mais adversa, o erro máximo possível seria $\pm 0,14$ m.kgf, o que corresponde a um erro de 2,8% máximo, ao nível de 5% de probabilidade.

Desta maneira, calcularam-se, a partir do intervalo de confiança, os erros máximos em função das cargas esperadas ao nível de 5% de probabilidade e levantou-se a curva da Figura 26. A partir desta curva, pode-se estabelecer o erro máximo percentual do conjunto medidor quando operando com um determinado torque.

Como a variância de \underline{x} diminui com o número de observações \underline{n} conforme mostra a equação (54), pode-se restringir o intervalo de confiança tomando-se um maior número de observações.

Calculou-se o intervalo de confiança para cada \hat{x} esperado, correspondente a uma dada leitura \hat{y} , média de 10 observações, elaborando-se a tabela 2 do Apêndice 2. Nesta, por exemplo, para uma leitura $\hat{y} = 42$ deflexões, o erro máximo passou de 2,8% para 2%. Entretanto, esta redução no erro percentual máximo implica em duplicar o número de observações, razão pela qual foi preferível, do ponto de vista da utilização do torçômetro, realizar 5 repetições, ficando o critério final na dependência de cada pesquisador.

Desta forma, em consonância com o limite de erro máxi-

mo da ordem de 5%, estabelecido "a priori", o conjunto m_1 só se aplica para medições acima de 2,8 m.kgf.

Interpretação da análise para o conjunto m_2

Em virtude da análise estatística conduzir a três equações distintas, conforme a faixa de aferição estática, o passo inicial que se faz necessário é o estabelecimento do intervalo

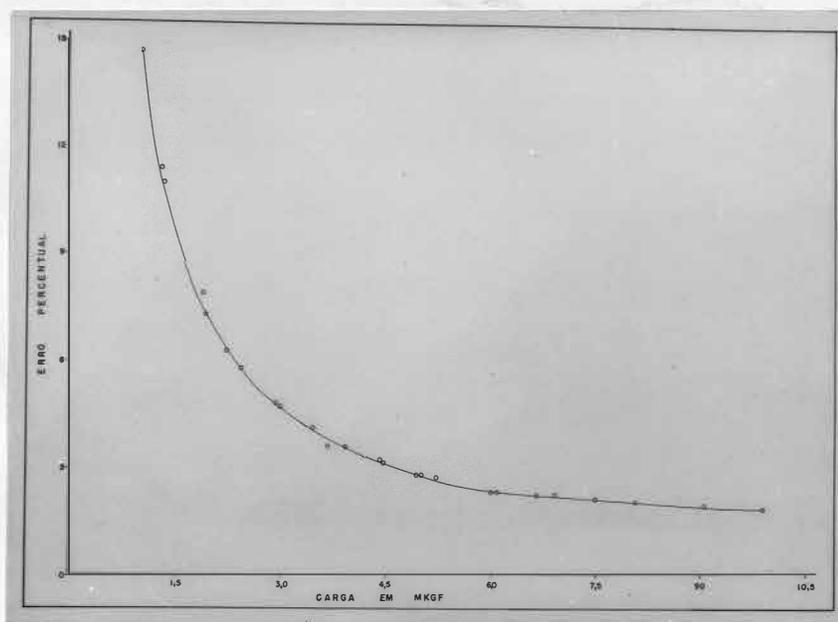


Figura 26. Curva do erro percentual máximo para o conjunto m_1 , ao nível de 5% de probabilidade.

lo de confiança, tendo em vista o limite de erro máximo.

Calculou-se o intervalo de confiança em função das cargas esperadas \hat{x} , correspondentes às leituras \hat{y} , média de 5 e 10 observações para as equações (50), (51) e (52), elaborando-se as tabelas 3 a 8 do Apêndice 2.

A partir do intervalo de confiança destas retas, determinaram-se os erros máximos ao nível de 5% de probabilidade, o que leva às seguintes interpretações:

. na aplicação da equação (50), mesmo realizando 10 observações para a leitura \hat{y} , o erro máximo, em termos de carga, supera sempre o limite de 5%. Isso elimina a possibilidade de utilização do conjunto m_2 na faixa de 0 - 10 m.kgf, tendo-se em vista os objetivos dêste trabalho.

. considerando-se fielmente o rigor estatístico, as equações a serem aplicadas são:

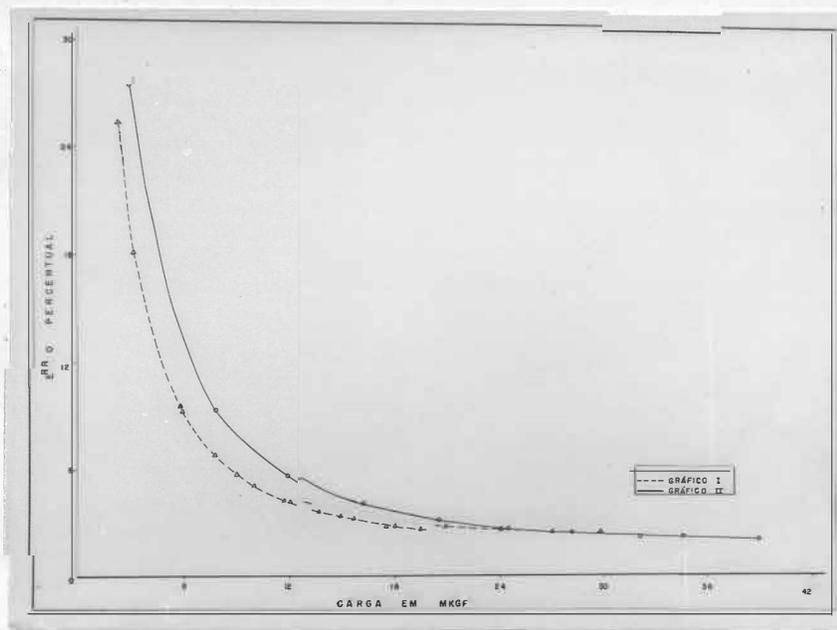


Figura 27. Curvas do erro percentual máximo para o conjunto m_2 , ao nível de 5% de probabilidade. Gráfico I - intervalo 0 - 30 m.kgf. Gráfico II - intervalo 0 - 40 m.kgf.

$$x = 2,49 + 0,59y \quad (55)$$

$$x = 1,92 + 0,56y \quad (56)$$

As equações (55) e (56) correspondem respectivamente aos intervalos de 0 - 30 e 0 - 40 m.kgf.

Os gráficos da Figura 27, estabelecem as curvas do erro máximo ao nível de 5% de probabilidade, obtidos para as cargas esperadas \hat{x} , correspondentes aos valores \hat{y} , média de 5 ob

servações. Dêstes, se deduz que a equação (55) só se aplica para determinações acima de 10,8 m.kgf, enquanto que a equação (56) se aplica para determinações acima de 13,8 m.kgf, implicando sempre num erro percentual máximo inferior a 5%.

. em medições reais, segundo COBRA (1962), a diferença estatisticamente significativa, entre os coeficientes angulares b_{12} , b_{13} e b_{14} , perde sua importância. Isto porque ela é diluída em erros inerentes ao próprio detector - transdutor e que fogem ao limiar de percepção do conjunto medidor.

As equações de regressão de m_2 , sendo resultantes de um mesmo número de dados, autoriza a tomar-se uma única equação de regressão, cujos coeficientes são as médias aritméticas dos coeficientes das equações correspondentes aos intervalos de carga 0 - 20, 0 - 30 e 0 - 40 m.kgf, do que resulta:

$$y = - 3,8949 + 1,7157x \quad (57)$$

Na aplicação do conjunto m_2 para determinações do torque em máquinas agrícolas, a equação (57) torna-se:

$$x = 2,27 + 0,58y \quad (58)$$

Um exame na equação (58) leva às seguintes interpretações:

a) o conjunto m_2 só detecta variações de torque acima de 2,27 m.kgf;

b) a sensibilidade em termos de carga é dada pela relação $dx/dy = 0,58$, ou aproximadamente 0,6 m.kgf.

c) a faixa de utilização, tendo-se em vista o erro percentual máximo de 5%, pode ser tomada no gráfico II da Figura 27, de onde se conclui que o conjunto m_2 só se aplica para medições acima de 13,8 m.kgf.

6.3. Análise e Discussão dos Ensaio Dinâmicos

A partir dos dados das tabelas 5.8 e 5.9, elaboraram-se os gráficos das Figuras 28 e 29. Estes representam as curvas de ressonância para os conjuntos m_1 e m_2 , tomando-se no eixo das abscissas as frequências de excitação em c.p.s. e no das ordenadas as amplitudes em mV.

Embora tenha um interesse secundário sob o ponto de vista da aplicação do conjunto medidor, determinou-se o índice

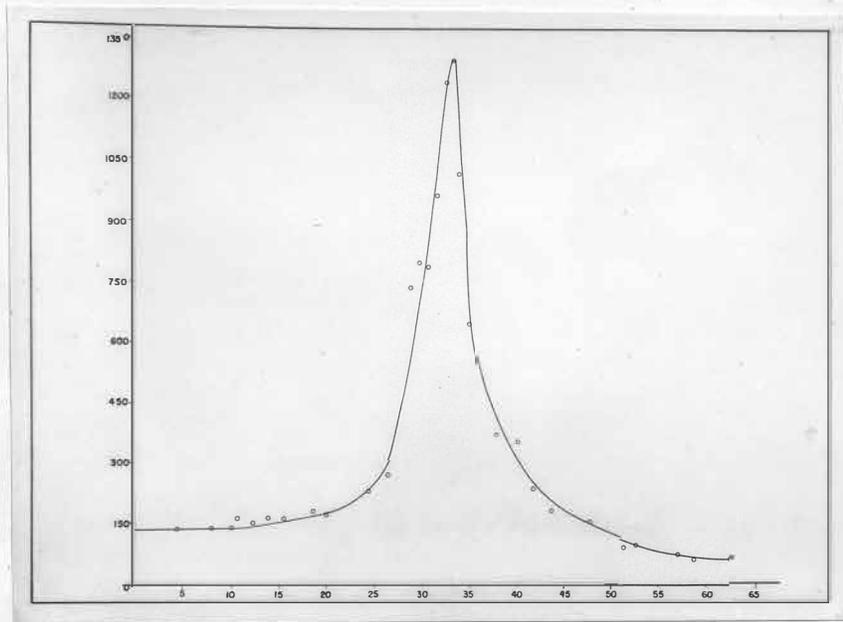


Figura 28. Curva de ressonância obtida em ensaio dinâmico do conjunto m_1 .

de amortecimento δ do sistema por via gráfica. Demonstra-se que existem dois valores f_1 e f_2 , que satisfazem a equação (44), apresentada no Capítulo 3, na condição $a_{\max}/\sqrt{2}$, de onde se obtém o valor do índice de amortecimento:

$$\delta = \frac{f_1 - f_2}{2f_n}$$

No caso da Figura 28, traçando-se uma paralela ao eixo

xo das abscissas com ordenada igual a $1300/\sqrt{2}$ mV, intercepta-se a curva de ressonância nos pontos correspondentes a 34,7 c.p.s. e 31,3 c.p.s., sendo 33,3 c.p.s. a frequência natural do sistema. O índice de amortecimento será portanto:

$$\delta = \frac{34,7 - 31,3}{66,6}$$

$$\delta = 0,05$$

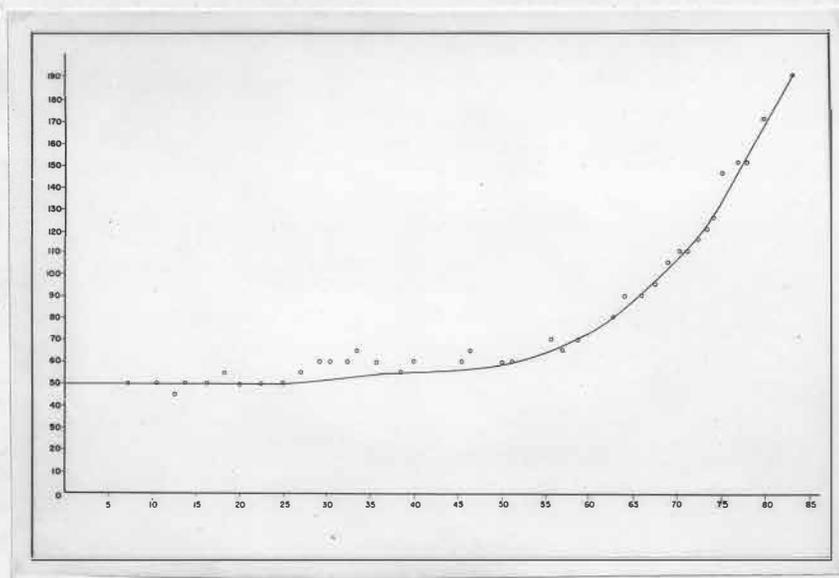


Figura 29. Curva de ressonância obtida em ensaio dinâmico do conjunto m_2 .

O fator de amplificação na condição de ressonância é $\Phi = 1/2\delta$ e portanto tem-se:

$$\Phi = 10$$

O módulo dinâmico de rigidez $K_d = K_1/\Phi$ será portanto $K_d = 3,0$ kgf/cm. Com isso, ficam estabelecidos os parâmetros dinâmicos do conjunto m_1 , os quais determinam o comportamento dinâmico do sistema.

Sob o ponto de vista da aplicação do torciômetro, bas-

ta apenas estabelecer-se um limite superior de freqüência, dentro do qual o sistema se mostra insensível a variações na freqüência do torque a ser medido.

A curva de ressonância do sistema mostra ϕ sensivelmente igual a 1, na faixa de 0 - 10 c.p.s. à qual ficam restritas as determinações do conjunto m_1 .

No caso da Figura 29, de modo semelhante levantou-se a curva de ressonância do conjunto m_2 . Entretanto, pôde-se estabelecer apenas o limite superior de freqüência de utilização, uma vez que os dados obtidos não atingiram a ressonância do sistema. Isto não traz qualquer prejuízo na aplicação, mesmo porque o índice de amortecimento ξ pode ser considerado o mesmo obtido anteriormente, desprezando-se o efeito de histerese das molas.

Um exame da Figura 29 revela que as amplitudes se mantêm sensivelmente iguais, $\phi = 1$, na gama de 0 - 25 c.p.s., faixa esta à qual ficam restritas as determinações do conjunto m_2 .

Os resultados obtidos nos ensaios estáticos e dinâmicos se revelam coerentes com o que se afirmou anteriormente. Para o conjunto m_1 , a sensibilidade é aproximadamente 0,1 m.kgf e a freqüência máxima de utilização é 10 c.p.s. Para o conjunto m_2 , a sensibilidade é aproximadamente 0,6 m.kgf e a freqüência máxima de utilização 25 c.p.s., mostrando que a sensibilidade é ganha às custas da freqüência de resposta.

7. APLICAÇÃO EM LABORATÓRIO

A aplicação do torciômetro, em laboratório, foi realizada utilizando-se do mecanismo descascador de mamona proposto por MIALHE (1969). O motivo da escolha, além de se prender às facilidades inerentes a um ensaio de laboratório, também visam fornecer subsídios àquele estudo.

O torciômetro eletromecânico foi intercalado entre a TDP de um trator da marca Massey-Ferguson, modelo MF-65, e a máquina descascadora, conforme ilustra a Figura 30, com um ângulo de acoplamento da ordem de 23° através de juntas universais.

A escolha das condições de regulagem da máquina foi feita com base nas conclusões a que chegou aquele autor. Para os ensaios, utilizou-se:

- . rotação média do disco inferior..... 700 rpm;
- . anéis móveis F_1 e F_2 ;
- . espaçamento entre anéis $E_2 = 8$ mm.

A mamona utilizada nos ensaios é da variedade "Campinas", parte proveniente da Secção de Oleaginosas do I.A.C., designada por V₁, e parte de procedência ignorada, por V₂. Va-



Figura 30. Aspecto da montagem para ensaio de descascamento de mamona, empregando o torçímetro eletromecânico.

le ainda ressaltar que V₂ apresentava maior dificuldade para

remoção manual das cascas que V_1 .

O procedimento adotado nos ensaios de descascamento é o mesmo que foi empregado **pelo autor, com a moega carregada até nivelar o bordo superior.** Foram realizadas 5 repetições para cada tratamento, com alimentação plena até esgotamento do produto.

O circuito empregado é o mesmo da Figura 18, Capítulo 3, alimentado por uma bateria de 6V. O sinal elétrico trans-

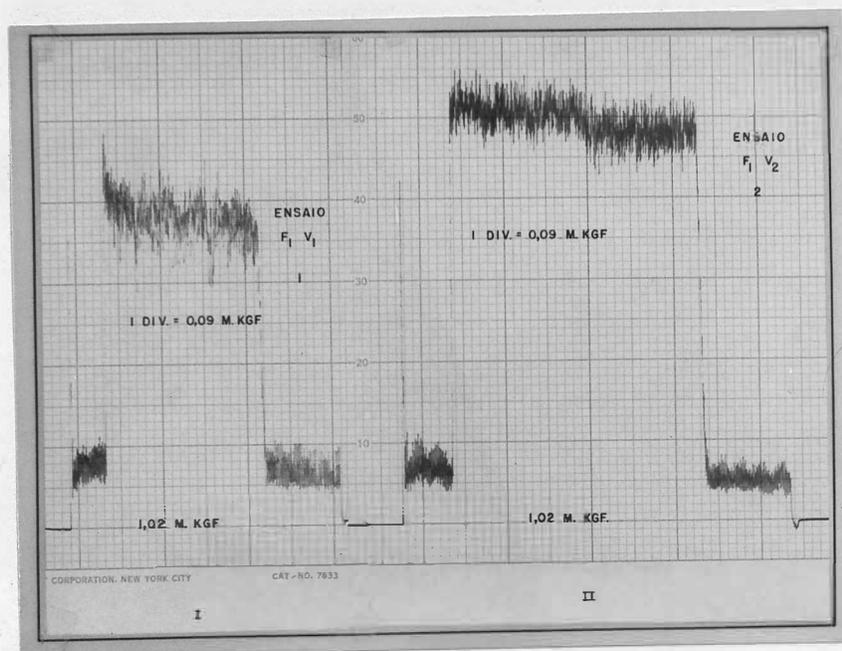


Figura 31. Gráficos obtidos nos ensaios de descascamento de mamona, empregando o torçômetro eletromecânico com o conjunto m_1 .

duzido é recebido no Microcord 44 e registrado no papel, que se desloca com velocidade de 2 pol/min.

Utilizou-se nas determinações do torque o conjunto m_1 , porque a ordem de grandezas a serem medidas se enquadra nas características deste sistema. O conjunto m_2 ainda que apresente uma faixa de frequência de utilização mais ampla, se empregado levaria a erros superiores a 5%.

Dos ensaios resultam gráficos como os da Figura 31.

Nestes, determinaram-se as leituras máximas, mínimas e médias pelo processo de integração das áreas.

As médias \hat{y} das 5 leituras máximas, mínimas e médias obtidas para cada tratamento, levadas à equação (53), fornecem os valores dos torques máximos, mínimos e médios esperados e mostrados na tabela 7.1. Os valores das cargas esperadas colocadas no gráfico da Figura 26 fornecem, com erro percentual máximo sempre inferior a 5%, dados a serem considerados no projeto dêsse tipo de máquina.

Com os dados de torque médio e rotação média da árvore pode-se calcular a potência absorvida pela máquina, nas condições do ensaio, pela relação:

$$P = \frac{T r}{716,2}$$

onde:

P = potência em C.V.

T = torque em m.kgf

r = rotações por minuto

Assim, no caso da tabela 7.1, o torque médio de 5,48 m.kgf, a uma rotação média do torciômetro de 540 rpm, medida no ensaio, corresponde a uma potência média de 4,13 C.V. absorvida para o descascamento naquelas condições.

Tabela 7.1. Dados obtidos com 5 repetições para a unidade descascadora de mamona em ensaios de laboratório.

TRATAMENTOS	TORQUES OBSERVADOS		
	Máximo	Mínimo	Médio
F ₁ V ₁	4,91	3,43	4,37
F ₁ V ₂	5,94	4,78	5,34
F ₂ V ₁	5,38	3,63	4,46
F ₂ V ₂	6,06	4,89	5,48

8. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho leva às seguintes conclusões:

8.1. O estágio detector - transdutor satisfaz aos objetivos propostos, no que concerne ao baixo custo e simplicidade de construção. Isto, facilmente, se conclui pelo exame do Capítulo 4, que descreve os materiais e a execução do projeto.

Quanto à aplicabilidade do conjunto medidor, empregou-se o torciômetro somente em ensaio de laboratório, o que autoriza a concluir que o sistema se presta para medições em máquinas agrícolas estacionárias. Ainda que resulte num sistema rústico, com elementos robustos, capaz de resistir a choques e vibrações, somente ensaios de campo futuros poderão levar a um juízo definitivo.

8.2. Quando se considera o torciômetro como a unidade operacional completa aqui empregada, ver-se-á que o preço do detector - transdutor se torna desprezível quando comparado ao do registrador. Entretanto, ressalte-se que embora o objetivo visado seja um sistema de baixo custo como um todo, o emprego do Microcord 44 se deve a um motivo meramente circunstancial. É que o registrador estava disponível na 15ª Cadeira. O fato forçou o emprêgo de um estágio intermediário modificador, para atenuar o sinal elétrico transduzido. Portanto, não fica eliminada a possibilidade de se empregar um sistema de indicação ou registro para uma gama um tanto mais elevada de sinais potenciométricos. Este equipamento deve ter um custo mais baixo.

8.3. A capacidade e sensibilidade do torciômetro, dadas por um sistema de molas helicoidais, conferem uma flexibilidade bastante desejável para este tipo de equipamento. Empregando-se arbitrariamente os conjuntos m_1 e m_2 , obteve-se uma capacidade de 9,93 e 39,75 m.kgf, sem utilizar a plena capacidade os dois conjuntos. Portanto, com base na ordem de grandeza e sensibilidade requeridas pelas medições, o projetista poderá jogar com numerosas associações e geometrias, de modo a atingir o objetivo colimado.

8.4. Com os conjuntos m_1 e m_2 obteve-se uma faixa de frequência de utilização de 10 e 25 c.p.s. respectivamente. Estes dados se enquadram na faixa de 0 a 80 c.p.s., segundo indicação da literatura como desejável em muitas medições requeridas em máquinas agrícolas. Portanto, frequências diferentes podem ser obtidas em função do módulo de rigidez das molas empregadas, tendo-se sempre em mira que a sensibilidade é ganha às custas da frequência de resposta.

8.5. As faixas de frequências dos conjuntos m_1 e m_2

tornam o sistema aplicável em medições para baixas frequências, o que o recomenda para ensaios de determinação do torque e potência médias em máquinas agrícolas. Isto se reforça, levando-se em consideração que o registrador empregado apresenta uma frequência máxima da ordem de 100 c.p.s. Portanto, o sistema não se ajusta para determinações de alta frequência, sendo insensível para detectar os "picos" de torque instantâneos (alta frequência), que são de grande importância em certos estudos.

8.6. A análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios estáticos autoriza a concluir-se que, para o conjunto m_1 , a resposta do sistema é linear para as cargas até 9,93 m.kgf, enquanto que para o conjunto m_2 a linearidade de resposta se manteve até 39,75 m.kgf.

8.7. Com base nas diferenças apresentadas pelos coeficientes angulares das retas de regressão obtidas para o conjunto m_2 , conclui-se que, no caso de medições reais, uma única equação de regressão é suficiente para determinação do torque. Entretanto, num estudo apenas teórico e mais aprofundado, o fato dos coeficientes angulares das retas de regressão se apresentarem crescentes com as séries de carregamentos, sugere que uma outra curva pode ser buscada, e sua equação determinada.

8.8. Com base na análise estatística e em consonância com o limite de erro máximo da ordem de 5% estabelecido "a priori", conclui-se que o conjunto m_1 se aplica para determinações acima de 2,8 m.kgf e o conjunto m_2 somente em medições acima de 13,8 m.kgf, quando se fazem pelo menos 5 leituras para cada carga esperada. Isto, porém, é facilmente contornado levando-se em consideração que outros conjuntos de molas podem ser acoplados de acordo com a faixa desejada. No presente caso, este fato se evidencia, posto que o conjunto m_1 cobre a

maior parte da faixa indesejável de m₂.

8.9. Os ensaios de laboratório revelaram que o conjunto m₁ se comporta satisfatoriamente para medições do torque na descascadora de mamona, apresentando-se o sistema com acuracidade e resposta muito boas. Pela ordem das grandezas medidas, o erro máximo foi sempre inferior a 5%. A deflexão real para valores da ordem de 3,0 m.kgf, que foi o mínimo observado para o descascamento, é cêrca de 60 mm, satisfazendo plenamente.

8.10. Os resultados obtidos nos ensaios de descascamento de mamona e constantes da tabela 7.1, autorizam a concluir-se que, nas condições de ensaio, o anel móvel designado por F₂, requer um torque médio superior ao anel F₁. Com relação à procedência da variedade, os ensaios vieram confirmar o que se verificou "a priori" manualmente, ou seja, V₂ requer um torque médio superior a V₁. Tratando-se de mesma variedade, pode-se supor que haja influência do microclima e solo na espessura das cascas ou ainda do teor de umidade no produto. Cabe aqui um estudo mais aprofundado.

9. RESUMO

O presente trabalho abrange o estudo e aplicação de um torciômetro para máquinas agrícolas, baseado no princípio da transdução eletromecânica.

Inicialmente, foram feitas considerações de ordem teórica sobre os diversos componentes, sob o ponto de vista estático e dinâmico. Isto, visando a seleção dos elementos, de modo a assegurar acuracidade nas medidas, aliada à simplicidade de construção e ao baixo custo da unidade de torque. Visa-se ainda a possibilidade de adaptá-la a um equipamento de indicação ou registro relativamente baratos.

Em seguida, passou-se para o projeto e execução da unidade de torque, que basicamente é constituída de dois discos cinemáticos, acoplados por um conjunto de duas molas helicoidais. O deslocamento relativo entre os discos, provocado pela transmissão do torque, é convertido em sinal elétrico pelo potenciômetro ligado a um circuito meia ponte de Wheatstone,

alimentado por uma bateria de 6V. A captação do sinal elétrico é feita por meio de um sistema coletor, com anéis e escovas. O sinal é recebido num registrador Microcord 44.

O sistema, que emprega dois conjuntos de molas foi aferido estáticamente e determinadas as equações de regressão linear. Com base no intervalo de confiança destas equações, estabeleceu-se a faixa de utilização, de modo a assegurar medições com erro máximo sempre inferior a 5%.

Realizou-se, também, a aferição dinâmica, por meio das curvas de ressonância do sistema, estabelecendo-se a faixa de frequência de utilização para cada conjunto.

O sistema, que emprega o conjunto de molas designado por m_1 , apresenta uma faixa de utilização de 2,8 a 9,93 m.kgf, com uma frequência máxima de 10 c.p.s. O sistema com o conjunto m_2 se aplica para determinações de 13,8 a 39,75 m.kgf, com uma frequência máxima de 25 c.p.s.

Finalmente, o torciômetro eletromecânico foi empregado em ensaio de laboratório no estudo de um mecanismo descascador de mamona. Nestes ensaios, o conjunto medidor mostrou-se com acuracidade e resposta muito boas, detectando inclusive variações de torque no descascamento esperadas "a priori", por uma constatação manual.

O sistema pode ser ainda melhorado em estudos posteriores e adaptado para aplicação em ensaios de campo.

10. SUMMARY

This work deals with the study and application of a torquemeter for farm machinery based on the principle of electromechanical transduction.

Initially theoretical considerations were made about several components under a static and dynamic point of view. The purpose was to select elements to insure accuracy in measurements, and simplicity and low cost of the torque unit making possible the adoption of a relatively inexpensive indicating and recording device.

Following the preliminary considerations, the design and construction of the torque unit were made. This unit is basically composed of a couple of kinematic discs attached by a set of two helicoidal springs.

The relative displacement between the discs by the torque action is transduced into an electrical signal by a potentiometer connected with a half Wheatstone bridge connect

ed to a 6V. battery.

The electrical signal is received by a Microcord 44 recorder through a collector system with graphite brushes and slip rings.

The unit was statically gauged and the linear regression equations were determined. Based on the confidence interval of these equations the useful range was established to insure measurements with a 5% maximum error.

The dynamic gauging was made by means of a resonance graph establishing the useful range of frequency of each unit.

The set of spring designated by m_1 has a useful range of 2.8 to 9.93 m.kgf; with a maximum frequency of 10 c.p.s. The set of springs designated by m_2 has a useful range of 13.8 to 39.75 m.kgf, with a maximum frequency of 25 c.p.s.

Finally a laboratory test was made with the electro-mechanical torquemeter to study the hulling system of a castor bean huller. The recording system showed a very good accuracy and response, recording inclusively torque variations visualized initially in the manual hulling of the castor bean.

The system can be improved by further studies and made adaptable for field applications.

11. BIBLIOGRAFIA

11.1. Bibliografia Citada

- ALPE, ANGELO. Manovelle Dinamometriche. Estratto da
Macchine e Motori Agricoli. Bologna, Itália. Edi-
zione Agricole - Bologna. 1951. 8 p.
- BAHASOEAN, A.A. & VERDUIN, M. An Instrument for Meas-
uring the Power Transmitted between the **Tractor**
P.T.O. and the Agricultural Machine. Journal of
Agricultural Engineering Research. Silsoe,
Bedfordshire, Inghilterra. 8(4):345-348. 1963.
- BALDWIN-LIMA-HAMILTON CORPORATION. TESTING EQUIPMENT
DEPARTMENT. The SR-4 Torquemeter. Philadelphia,
Pennsylvania, USA. Boletim nº 4308. 1954. 11p.
- BECKWITH, T.G. & BUCK, N.LEWIS. Mechanical Measure-

- ments. Massachusetts, USA. Addison - Wesley Publishing Co., Inc. Reading. 1964. 559 p.
- BENNETT, CARL A. & FRANKLIN, NORMAN L. Statistical Analysis in Chemistry and Chemical Industry. 2ª edição. Nova Iorque, USA. John Wiley & Sons, Inc. 1961. 724 p.
- COBRA, ANIVALDO PEDRO. Extensômetro Elétrico de Resistência: Estudo e Aplicação em Dinamometria Agrícola. Tese não publicada. Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil, E.S.A. "Luiz de Queiroz", 1962. 88 p., ilust. (mimeografada).
- FONSECA, ADEMAR. Vibrações. Rio de Janeiro, Brasil, Ao Livro Técnico S.A. 1964. 339 p.
- HANSEN, MERLIN. Loads Imposed on Power - Take - Off Shafts by Farm Implements. Agricultural Engineering. St. Joseph, Michigan, USA. 33(2):67-70 1952.
- HARTOG, J.P.DEN. Vibrations Mécaniques. H.L.SUPPER & H.ABERDAM. 10ª edição. Paris, França, Dunod Editeur. 1960. 460 p.
- DIEGO LOPES, JESUS GARCIA DE. Medida de la Potencia en los Grupos Moto-bomba mediante Dinamómetro de de Torsión. Cuaderno nº 248, 2ª Edição. Madrid, Espanha. Instituto Nacional de Investigaciones Agronomicas-Estacion de Mecanica Agrícola. 1966. 20 p.
- MABIE, HAMILTON H. & OCVIK, FRED W. Mecanismos e Dinâmica das Máquinas. EDUARDO HINGST. Rio de Janeiro, Guanabara, Brasil, Ao Livro Técnico e Editora da Universidade de São Paulo. 1967. 562 p.
- MCCALL, R.J. Transmission Dynamometer for Traction

- and Power Take-off Power Measurements. Agricultural Engineering. St. Joseph, Michigan, USA. 28(1):19-21. 1947.
- MIALHE, LUIZ GERALDO. Estudo de Um Mecanismo Descascador de Mamona (Ricinus Communis, L.). Tese não publicada. Piracicaba, Estado de São Paulo, Brasil, E.S.A. "Luiz de Queiroz", 1969. 81 p., illust. (mimeografada).
- REED, I.F. & BERRY, M.O. Recording Torquemeter. Agricultural Engineering. St. Joseph, Michigan, USA. 34(5):307,311. 1953.
- RICHARDSON, R.D. & FILBY, D.E. A Tractor Pulley Torquemeter employing Electrical Resistance Strain Gauges. Journal of Agricultural Engineering Research. Silsoe, Bedfordshire, Inglaterra. 4(1):16-23. 1959.
- SCHCHWAZABAJA, G.J. Arbeits-und Leistungsmessungen an umlaufenden Wellen. Archiv für Landtechnik. Berlin, Alemanha. 2(2):125-131. 1960.
- SCHOENLEBER, L.H. Strain Gauges and Stresscoat in Machinery Design. Agricultural Engineering. St. Joseph, Michigan, USA. 36(5):309-317-323. 1955.
- STEFANELLI, GIUSEPPE. Strumenti Elettrici di Misura per la Meccanica Agraria: Trazimetri e Torsiometri Estensimetrici a Variazione di Resistenza. Florença, Itália. Instituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo. 1956. 21 p.
- TAYLOR, P.A. & WILSON, E.R. A Dual Range Torquemeter for a Tractor P.T.O. Journal of Agricultural Engineering Research. Silsoe, Bedfordshire, Inglaterra. 8(4):310-311. 1963.

11.2. Bibliografia Consultada

- BAADER, W. Ein Beitrag zur Methodik der Messung des Zapfwellendrehmoments und der Zugkraft an Landmaschinen. Landtechnische Forschung. Munique, Alemanha. Institut für Landmaschinenforschung. 7 (6):156-158. 1957.
- BAHASOEAN, A.A. Eine tragbare Zapfwellenleistungs-Meßvorrichtung und ihre Anwendung. Grundlagen der Landtechnik. Berlin, Alemanha. 15(2):54-57. 1965.
- HOLOWENKO, A.R. Dynamics of Machinery. Nova Iorque, USA. John Wiley & Sons, Inc. 1955. 464 p.
- LOCKERY, H.E. Theory and Applications of Strain Gage Torque-Measuring Devices. Waltham, Massachusetts, USA. BLH-Boletim nº 4771. 1959. 9 p.
- PERRY, C.C. & LISSNER, H.R. The Strain Gage Primer. Nova Iorque, USA. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1955. 281 p.
- POTGIETER, FRED M. Application of Universal Joints to Farm Machinery. Agricultural Engineering. St. Joseph, Michigan, USA. 33(1):21-27. 1952.
- RAYBOULD, F.W. & EVERNDEN, D.W. A Lightweight Portable Torque-meter. Journal of Agricultural Engineering Research. Silsoe, Bedfordshire, Inglaterra. 3(4): 348-349. 1958.
- SCANIA-VABIS A/S. Drehmomentmessers für Schlepper. Landtechnische Forschung. Copenhagen, Dinamarca. 10(6):166-167. 1960.
- SLAYMAKER, R.R. Mechanical Design and Analysis. Nova Iorque, USA. John Wiley & Sons, Inc. 1959. 418 p.

A P Ê N D I C E 1

Este Apêndice contém as matrizes X e Y para os dois conjuntos.

Matriz X para o conjunto m₁

X =	1	0	0	0,50	0,00	0,00	38,4	0,00	0,00
	1	0	0	1,00	0,00	0,00	38,4	0,00	0,00
	1	0	0	1,50	0,00	0,00	38,2	0,00	0,00
	1	0	0	2,00	0,00	0,00	38,2	0,00	0,00
	1	0	0	2,50	0,00	0,00	38,4	0,00	0,00
	1	0	0	3,00	0,00	0,00	38,0	0,00	0,00
	1	0	0	3,50	0,00	0,00	38,0	0,00	0,00
	1	0	0	4,00	0,00	0,00	38,2	0,00	0,00
	1	0	0	4,49	0,00	0,00	38,0	0,00	0,00
	1	0	0	4,99	0,00	0,00	38,0	0,00	0,00
	0	1	0	0,00	0,75	0,00	0,00	37,8	0,00
	0	1	0	0,00	1,50	0,00	0,00	37,8	0,00
	0	1	0	0,00	2,25	0,00	0,00	37,8	0,00
	0	1	0	0,00	3,00	0,00	0,00	37,8	0,00
	0	1	0	0,00	3,75	0,00	0,00	37,6	0,00
	0	1	0	0,00	4,49	0,00	0,00	37,8	0,00
	0	1	0	0,00	5,24	0,00	0,00	38,0	0,00
	0	1	0	0,00	5,99	0,00	0,00	38,2	0,00
	0	1	0	0,00	6,73	0,00	0,00	38,0	0,00
	0	1	0	0,00	7,47	0,00	0,00	38,2	0,00
	0	0	1	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	38,8
	0	0	1	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	38,8
	0	0	1	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	38,8
	0	0	1	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	38,8
	0	0	1	0,00	0,00	4,99	0,00	0,00	38,8
	0	0	1	0,00	0,00	5,99	0,00	0,00	38,8
	0	0	1	0,00	0,00	6,98	0,00	0,00	38,8
	0	0	1	0,00	0,00	7,96	0,00	0,00	39,0
0	0	1	0,00	0,00	8,95	0,00	0,00	39,0	
0	0	1	0,00	0,00	9,93	0,00	0,00	39,0	

Matriz Y para o conjunto m₁

	0,0
	0,0
	3,2
	9,8
	15,0
	20,4
	26,0
	31,0
	36,4
	42,0
	0,0
	3,6
	12,8
	20,2
Y =	28,4
	36,8
	45,0
	53,6
	61,2
	69,6
	0,0
	9,4
	21,0
	31,8
	42,6
	54,4
	65,6
	75,6
	86,4
	95,4

Matriz X para o conjunto m_2

X =

1	0	0	0	1,00	0,000	0,000	0,000	38,8	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	2,00	0,000	0,000	0,000	38,8	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	3,00	0,000	0,000	0,000	38,8	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	4,00	0,000	0,000	0,000	38,8	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	5,00	0,000	0,000	0,000	38,8	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	6,00	0,000	0,000	0,000	38,8	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	7,00	0,000	0,000	0,000	38,6	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	8,00	0,000	0,000	0,000	38,8	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	9,00	0,000	0,000	0,000	39,0	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	10,00	0,000	0,000	0,000	38,4	0,00	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	2,00	0,000	0,000	0,00	37,8	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	4,00	0,000	0,000	0,00	37,6	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	6,00	0,000	0,000	0,00	37,6	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	8,00	0,000	0,000	0,00	37,4	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	10,00	0,000	0,000	0,00	37,8	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	11,99	0,000	0,000	0,00	37,4	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	13,99	0,000	0,000	0,00	37,4	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	15,98	0,000	0,000	0,00	37,4	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	17,98	0,000	0,000	0,00	37,4	0,00	0,00
0	1	0	0	0,000	19,97	0,000	0,000	0,00	37,4	0,00	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	3,00	0,000	0,00	0,00	37,6	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	6,00	0,000	0,00	0,00	37,8	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	9,00	0,000	0,00	0,00	37,4	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	11,99	0,000	0,00	0,00	38,0	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	14,99	0,000	0,00	0,00	37,8	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	17,98	0,000	0,00	0,00	37,8	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	20,96	0,000	0,00	0,00	37,6	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	23,94	0,000	0,00	0,00	37,8	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	26,91	0,000	0,00	0,00	37,8	0,00
0	0	1	0	0,000	0,000	29,88	0,000	0,00	0,00	38,0	0,00
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	4,00	0,00	0,00	0,00	39,0
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	8,00	0,00	0,00	0,00	38,6
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	11,99	0,00	0,00	0,00	38,8
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	15,98	0,00	0,00	0,00	38,6
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	19,97	0,00	0,00	0,00	39,0
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	23,94	0,00	0,00	0,00	39,0
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	27,91	0,00	0,00	0,00	39,2
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	31,86	0,00	0,00	0,00	39,2
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	35,81	0,00	0,00	0,00	39,2
0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	39,75	0,00	0,00	0,00	39,2

Matriz Y para o conjunto m₂

	0,0
	0,0
	0,8
	2,0
	4,8
	6,0
	7,8
	9,8
	11,0
	12,8
	0,0
	1,6
	6,2
	9,2
	13,0
	16,0
	19,8
	22,6
	26,0
	29,2
	0,0
Y =	6,0
	11,4
	16,6
	21,4
	26,8
	31,2
	36,6
	41,6
	46,2
	2,2
	10,8
	18,0
	25,4
	33,0
	40,0
	46,4
	53,4
	59,8
	65,6

A P Ê N D I C E 2

Este apêndice contém as tabelas que mostram os intervalos de confiança para os dois conjuntos.

Tabela 1. Intervalo de confiança para a equação (53), obtido com 5 leituras para cada carga esperada.

LEITURA MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CARGA ESPERADA	LIMITE INFERIOR	LIMETE SUPERIOR
0,0000	0,0737	1,0229	0,8718	1,1740
3,2000	0,0724	1,3206	1,1720	1,4692
3,6000	0,0723	1,3578	1,2095	1,5061
9,4000	0,0704	1,8973	1,7530	2,0416
9,8000	0,0702	1,9345	1,7904	2,0786
12,800	0,0694	2,2136	2,0712	2,3559
15,000	0,0688	2,4182	2,2770	2,5595
20,200	0,0678	2,9020	2,7629	3,0410
20,400	0,0678	2,9206	2,7816	3,0596
21,000	0,0677	2,9764	2,8376	3,1152
26,000	0,0670	3,4415	3,3040	3,5790
28,400	0,0668	3,6647	3,5276	3,8018
31,000	0,0677	3,9066	3,7698	4,0434
36,400	0,0667	4,4089	4,2720	4,5458
36,800	0,0667	4,4461	4,3092	4,5831
42,000	0,0672	4,9298	4,7920	5,0676
42,600	0,0672	4,9857	4,8477	5,1236
45,000	0,0676	5,2089	5,0703	5,3475
53,600	0,0694	6,0089	5,8666	6,1512
54,400	0,0696	6,0833	5,9406	6,2261
61,200	0,0717	6,7159	6,5688	6,8629
65,600	0,0733	7,1252	6,9748	7,2756
69,600	0,0750	7,4973	7,3435	7,6510
75,600	0,0777	8,0554	7,8960	8,2148
86,400	0,0824	9,0600	8,8890	9,2311
95,400	0,0888	9,8972	9,7152	10,0793

Tabela 2. Intervalo de confiança para a equação (53), obtido com 10 leituras para cada carga esperada.

LEITURA MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CARGA ESPERADA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
0,0000	0,0593	1,0229	0,9012	1,1446
3,2000	0,0578	1,3206	1,2020	1,4391
3,6000	0,0576	1,3578	1,2396	1,4760
9,4000	0,0552	1,8973	1,7841	2,0105
9,8000	0,0550	1,9345	1,8216	2,0474
12,800	0,0539	2,2136	2,1029	2,3243
15,000	0,0532	2,4182	2,3090	2,5275
20,200	0,0519	2,9020	2,7955	3,0084
20,400	0,0518	2,9206	2,8142	3,0269
21,000	0,0517	2,9764	2,8703	3,0824
26,000	0,0508	3,4415	3,3372	3,5458
28,400	0,0506	3,6647	3,5609	3,7685
31,000	0,0504	3,9066	3,8031	4,0101
36,400	0,0505	4,4089	4,3053	4,5125
36,800	0,0505	4,4461	4,3425	4,5497
42,000	0,0511	4,9298	4,8251	5,0346
42,600	0,0511	4,9857	4,8807	5,0906
45,000	0,0516	5,2089	5,1031	5,3148
53,600	0,0539	6,0089	5,8983	6,1195
54,400	0,0542	6,0833	5,9721	6,1945
61,200	0,0569	6,7159	6,5992	6,8325
65,600	0,0589	7,1252	7,0043	7,2460
69,600	0,0609	7,4973	7,3722	7,6223
75,600	0,0643	8,0554	7,9235	8,1873
86,400	0,0711	9,0600	8,9143	9,2158
95,400	0,0773	9,8972	9,7387	10,0557

Tabela 3. Intervalo de confiança para a equação (50), obtido com 5 leituras para cada carga esperada.

LEITURA MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CARGA ESPERADA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
0,0000	0,3296	1,9523	1,1907	2,7138
0,8000	0,3143	2,4683	1,7422	3,1944
2,0000	0,2947	3,2424	2,5615	3,9233
4,8000	0,2695	5,0485	4,4259	5,6710
6,0000	0,2689	5,8225	5,2212	6,4438
7,8000	0,2800	6,9836	6,3365	7,6306
9,8000	0,3073	8,2736	7,5637	8,9835
11,000	0,3296	9,0477	8,2661	9,8092
12,800	0,3695	10,2087	9,3550	11,0625

Tabela 4. Intervalo de confiança para a equação (52), obtido com 5 leituras para cada carga esperada.

LEITURA MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CARGA ESPERADA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
2,2000	0,3785	3,1578	2,2833	4,0322
10,800	0,3356	8,0121	7,2367	8,7876
18,000	0,3066	12,0763	11,3678	12,7847
25,400	0,2855	16,2533	15,5936	16,9129
33,000	0,2751	20,5432	19,9076	21,1788
40,000	0,2767	24,4944	23,8551	25,1337
46,400	0,2875	28,1060	27,4427	28,7712
53,400	0,3083	32,0582	31,3458	32,7706
59,800	0,3342	35,6708	34,8986	36,4429
65,600	0,3621	38,9446	36,1081	39,7812

Tabela 5. Intervalo de confiança para a equação (51), obtido com 5 leituras para cada carga esperada.

LEITURA MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CARGA ESPERADA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
0,0000	0,3054	2,4946	1,8533	3,1360
1,6000	0,2981	3,4372	2,8111	4,0632
6,0000	0,2806	6,0290	5,4397	6,6184
6,2000	0,2799	6,1469	5,5590	6,7348
9,2000	0,2706	7,9141	7,3457	8,4824
11,400	0,2652	9,2100	8,6531	9,7669
13,000	0,2620	10,1525	9,6022	10,7029
16,000	0,2580	11,9197	11,3777	12,4617
16,600	0,2576	12,2732	11,7322	12,8141
19,800	0,2567	14,1582	13,6189	14,6974
21,400	0,2575	15,1007	14,5599	15,6415
22,600	0,2585	15,8076	15,2646	16,3505
26,000	0,2636	17,8104	17,2567	18,3641
26,800	0,2653	18,2816	17,7244	18,8388
29,200	0,2713	19,6954	19,1256	20,2652
31,200	0,2774	20,8735	20,2909	21,4562
36,600	0,2983	24,0545	23,4279	24,6811
41,600	0,3226	26,9998	26,3222	27,6775
46,200	0,3483	29,7095	28,9781	30,4410

Tabela 6. Intervalo de confiança para a equação (50), obtido com 10 leituras para cada carga esperada.

LEITURA MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CARGA ESPERADA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
0,0000	0,2909	1,9523	1,2801	2,6244
0,8000	0,2734	2,4683	1,8366	3,1000
2,0000	0,2507	3,2424	2,6632	3,8216
4,8000	0,2205	5,0485	4,5391	5,5578
6,0000	0,2198	5,8225	5,3146	6,3304
7,8000	0,2333	6,9836	6,4446	7,5225
9,8000	0,2653	8,2736	7,6606	8,8867
11,000	0,2909	9,0477	8,3755	9,7198
12,800	0,3355	10,2087	9,4337	10,9838

Tabela 7. Intervalo de confiança para a equação (51), obtido com 10 leituras para cada carga esperada.

LEITURA MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CARGA ESPERADA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
0,0000	0,2586	2,4946	1,9514	3,0379
1,6000	0,2500	3,4372	2,9121	3,9622
6,0000	0,2289	6,0290	5,5483	6,5098
6,2000	0,2280	6,1469	5,6679	6,6258
9,2000	0,2165	7,9141	7,4594	8,3687
11,400	0,2096	9,2100	8,7697	9,6504
13,000	0,2057	10,1525	9,7205	10,5845
16,000	0,2006	11,9197	11,4984	12,3410
16,600	0,2000	12,2732	11,8532	12,6932
19,800	0,1989	14,1582	13,7404	14,5760
21,400	0,1998	15,1007	14,6809	15,5204
22,600	0,2011	15,8076	15,3850	16,2301
26,000	0,2077	17,8104	17,3741	18,2467
26,800	0,2098	18,2816	17,8409	18,7223
29,200	0,2174	19,6954	19,2388	20,1520
31,200	0,2249	20,8735	20,4011	21,3460
36,600	0,2503	24,0545	23,5287	24,5803
41,600	0,2788	26,9998	26,4142	27,5854
46,200	0,3081	29,7095	29,0624	30,3567

Tabela 8. Intervalo de confiança para a equação (52), obtido com 10 leituras para cada carga esperada.

LEITURA MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CARGA ESPERADA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
2,2000	0,3437	3,1578	2,3636	3,9519
10,800	0,2959	8,0121	7,3285	8,6958
18,000	0,2625	12,0763	11,4697	12,6828
25,400	0,2375	16,2533	15,7045	16,8021
33,000	0,2249	20,5432	20,0236	21,0628
40,000	0,2269	24,4944	23,9703	25,0186
46,400	0,2399	28,1070	27,5527	28,6612
53,400	0,2645	32,0582	31,4471	32,6693
59,800	0,2943	35,6708	34,9909	35,2506
65,600	0,3256	38,9446	38,1924	39,6968