

Sys 134/133

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO
Departamento de Engenharia Mecânica
PROJETO MECÂNICO

EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE FADIGA DE MEMBRANAS
BIOLÓGICAS

AUTOR: Alexandre Frascari
ORIENTADOR: Prof. Dr. Octávio Maizza
Neto

SUMÁRIO

Este trabalho trata do projeto de um equipamento para ensaiar membranas biológicas (duramãter humana e pericárdio bovino), utilizadas para a confecção de válvulas cardíacas artificiais, à fadiga.

É feito um levantamento das exigências e características que o sistema deve possuir.

Como solução para o problema propoe-se propoe-se uma solução hidráulica, que é analisada e para a qual se desenvolve um modelo matemático que descreve o seu comportamento dinâmico.

Apresenta-se um protótipo do equipamento para ser ensaiado e verificar se seu comportamento corresponde ao esperado.

INDICE

INTRODUÇÃO	1
DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1) O ensaio de fadiga	2
2) O ensaio de fadiga no caso da memb.....	8
3) Características das membranas.....	8
4) Exigencias do equipamento de ensaio	11
SOLUÇÕES PROPOSTAS	13
1) Modos construtivos dos elementos	13
2) Soluções	16
SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS	24
ANÁLISE E PROJETO BÁSICO DA SOLUÇÃO	25
Modelo matemático	25
Equação do amortecedor	25
Obtenção da constante de amortecimento	26
Dedução do modelo para a solução proposta	27
Resposta em frequência do sistema	29
Alguns problemas do sistema	37
Compensação do alongamento da membrana	40
Conclusões	42
CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DO EQUIPAMENTO	43
Parâmetros de projeto	43
Valores dos parâmetros no problema	46
O protótipo proposto	48
Cálculo do transdutor	49
APENDICE: Sistema de controle da solução com dois motores..	52
BIBLIOGRAFIA	67

INTRODUÇÃO

As válvulas cardíacas que tem se desenvolvido nos últimos tempos utilizando tecidos biológicos, apresentam vantagens em relação às não biológicas quanto a trombogenicidade, hemólise e dinâmica do escoamento. O problema principal que ainda necessita de melhores estudos é quanto à sua durabilidade, isto é, quanto tempo ela pode permanecer em uso sem que ocorra a rotura de alguma das membranas de que é constituída.

Utilizam-se dois métodos ⁽¹⁾ para se estimar a vida de uma prótese biológica. No primeiro, a válvula é colocada num sistema que reproduz a forma das pressões fisiológicas antes e depois dela. O outro consiste em se verificar quantos ciclos de tensão a membrana pode suportar até que se rompa.

O objetivo deste trabalho, é apresentar um equipamento capaz de realizar ensaios de fadiga em membranas biológicas utilizadas na confecção de válvulas cardíacas artificiais (duramater e pericárdio bovino).

DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

1) O ensaio de fadiga (2,3,4)

Quando se submete um material a uma tensão repetida ele rompe com uma tensão muito menor do que aquela que seria necessária se fosse aplicada estaticamente. As fraturas ocasionadas por esse tipo de tensão são chamadas falhas por fadiga.

Os ensaios de fadiga podem ser feitos com o material... ("material type tests",) com o objetivo de se obter suas propriedades e fornecer informações sobre fatores que afetam a fadiga como geometria e tratamento físicos ou químicos. É útil também para se obter correlações com outras propriedades mecânicas e para verificar a qualidade de diferentes lotes de um dado material (3). Ou, pode-se ensaiar toda uma estrutura sob condições simuladas de carga para se determinar o seu desempenho em relação à fadiga. Este tipo de ensaio exige equipamentos especiais e seu custo é elevado, além de as informações obtidas se limitarem ao projeto específico testado.

Nos ensaios de fadiga, geralmente utilizam-se tensões senoidais em ciclos chamados de: ciclo de tensão alternada (fig. 1) e ciclo de tensão flutuante (fig. 2) (2)

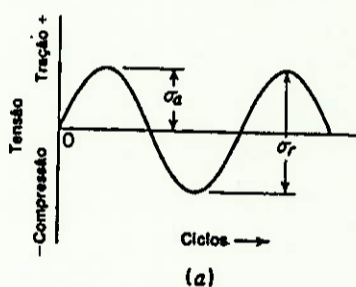


figura 1 : Ciclo de tensão alternada ($\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_{m\grave{i}n}$)

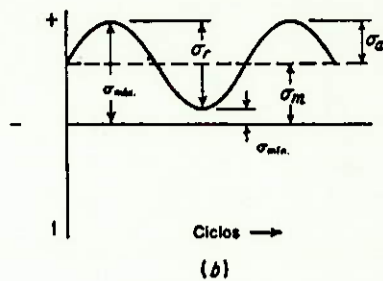


figura 2 : Ciclo de tensões flutuante ($\sigma_{m\acute{a}x} \neq \sigma_{m\acute{i}n}$)

As variáveis usadas para caracterizar estes tipos de tensões são:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: tensão máxima no ciclo

$\sigma_{m\acute{i}n}$: tensão mínima no ciclo

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} : \text{tensão variável}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} : \text{tensão média}$$

Outras quantidades que podem ser usadas para apresentar os dados de fadiga são:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{m\acute{i}n}}$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

Com isso, pode-se definir o ciclo de tensão alternada como aquele cuja tensão média é nula ($R=1$), enquanto que no de tensão flutuante ela assume valores diferentes de zero.

A maior parte dos ensaios de fadiga são feitos com o ciclo de tensão alternada. Os resultados destes ensaios são colocados numa curva chamada de S-N (ou curva de Wohler) que tem como abscissa o logarítimo do número de ciclos efetuados até o rompimento e como ordenada a σ_a (fig. 3).

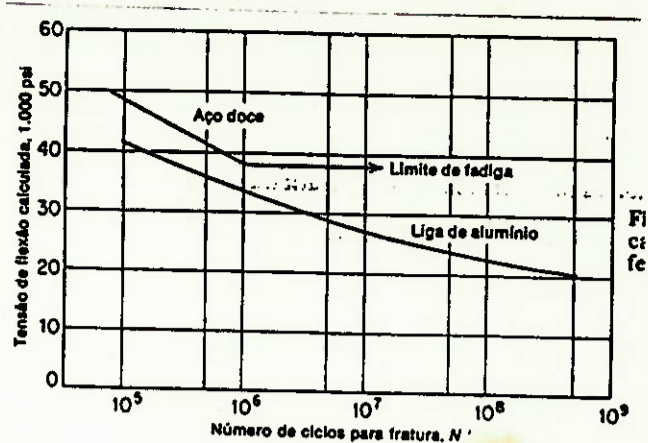


figura 3 : Comportamentos possíveis da curva S-N.

A curva S-N pode assumir dois tipos de comportamento. Ela pode tornar-se horizontal abaixo de um determinado nível de tensão. Esta tensão é chamada de limite de resistência à fadiga, para a qual, o corpo pode sofrer um número infinito de ciclos sem se romper. Ou ela pode cair assintoticamente, e neste caso costuma-se definir o limite de resistência à fadiga como a tensão em que o corpo resiste a um número de ciclos fixado arbitrariamente (por exemplo 10^8 ciclos).

Um procedimento para se determinar a curva S-N é o seguinte: i) o ensaio com uma tensão igual a $2/3$ do limite de resistência estático do material; ii) diminuir a tensão do ensaio até que 1 ou 2 amostras não se rompam para 10 ciclos (valor geralmente adotado).

Uma folha sugerida para anotar dados de ensaios de fadiga para plásticos pela ASTM D671 é mostrada na figura 4.

Deste modo a curva é determinada com 8 a 12 corpos de prova. Mas para se obter os parâmetros necessários para se estimar a probabilidade da ocorrência de rompimento do corpo (\bar{x}, σ), já que a fadiga e o limite de fadiga são quantidades estatísticas, o número de amostras deve ser muito maior.

O efeito da tensão média é verificado fazendo-se ensaios com o ciclo de tensão flutuante ($\sigma_m \neq 0$), que podem ser apresentados na forma da figura 5.

Material: _____ Data _____
Tipo de máquina de ensaio _____ Teste realizado por _____
Amostra: _____
Largura, 'b' _____ mm Tensão média do ciclo _____ MPa
Espessura, d _____ mm Deformação média do ciclo _____ mm/mm
Temperatura ambiente _____ °C Umidade relativa do ambiente _____ %
Rotação do teste _____ rpm
Amplitude da componente alternada da tensão no ciclo _____ MPa
Amplitude da componente de deformação alternada no ciclo _____ mm/mm
Número de ciclos _____ Relação de tensão (A ou R) _____
Temperatura em regime permanente da amostra _____
Temperatura da amostra no momento do rompimento _____
Comentários _____

figura 4 : Folha de dados para teste de fadiga de plásticos (ASTM-D671-71)

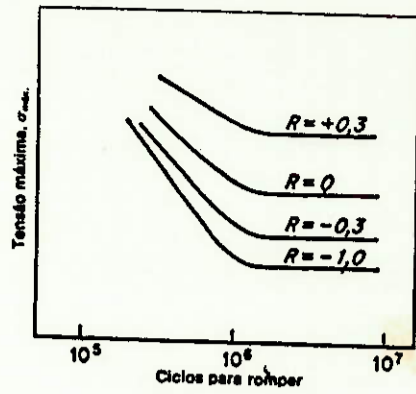


figura 5 : Curvas S-N para $\sigma_m \neq 0$

Outra maneira de se apresentar estes resultados é o diagrama de Haig Soderberg, figura 6.

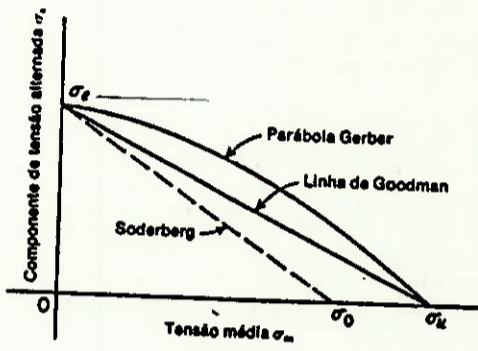


figura 6 : Diagrama de Haig Soderberg.

As curvas acima podem ser expressas pela seguinte equação:

$$\sigma_a = \sigma_e \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)^x \right)$$

onde:

- σ_a : limite de fadiga p/carregamento alternado ($\sigma_m=0$)
- σ_0 : tensão de escoamento
- σ_u : limite de resistência estático

Para a linha de Goodman, $x = 1$ e $\sigma = \sigma_u$; para a parábola de Gerder $x = 2$ e $\sigma = \sigma_u$ e para Soderberg $x = 1$ e $\sigma = \sigma_0$.

Há ainda outros modos de se ensaiar um material à fadiga, como por exemplo o ensaio de Prot (4). Neste ensaio utiliza-se uma tensão senoidal que aumenta sua amplitude linearmente até que ocorra a fratura (fig. 7).

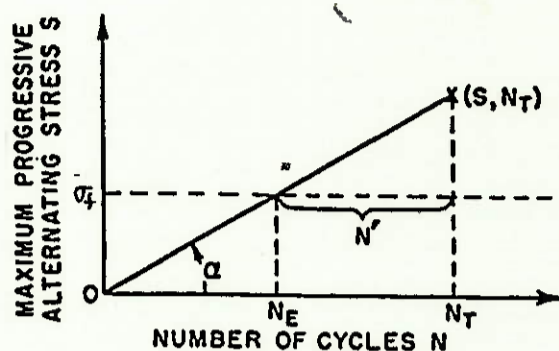


figura 7 : Tensão usada no ensaio de Prot

Variando-se as taxas de crescimento da amplitude (x) obtêm-se a chamada curva de Prot (fig. 8) que é o lugar geométrico dos pontos (σ, N).

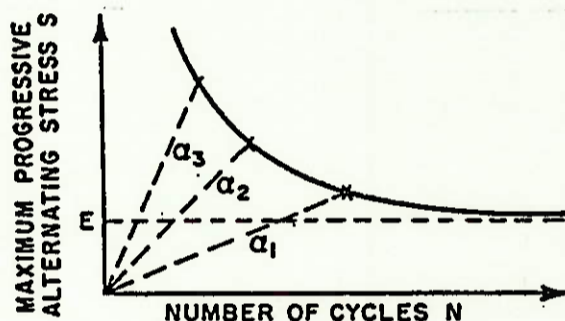


figura 8 : Curva de Prot

A curva acima é descrita pela equação

$$\sigma = k \sqrt{\alpha} + \sigma_f \quad \text{onde} \quad \sigma_f : \text{limite de fadiga obtido pela curva de Wohler}$$

k : constante

2. O ensaio de fadiga no caso de membranas

A membrana, por suas características geométricas e pelo material de que é constituída, só apresenta resistência à tração. Portanto, deve-se utilizar o ciclo de tensão flutuante com $|\sigma_m| > |\sigma_a|$ para que $\sigma(t) \geq 0$. Sugere-se como forma ideal o caso em que $\sigma_{mín} = 0$, onde,

$$\sigma = \frac{\sigma_{máx}}{2} (1 + \sin wt)$$

w: frequência de oscilação.

3. Características das membranas:

Apresentaremos alguns dados de membranas de duramãter e pericárdio com a finalidade de estabelecer faixas a que o equipamento deve atender na realização do ensaio.

Para o corpo de prova com as dimensões dadas na figura 9, obtiveram-se⁽⁵⁾ as curvas de tensão x deformação ao ensaio de tração apresentadas na figura 10.

A partir destes ensaios obtiveram-se os seguintes valores:

Duramãter

espessura	:	(0,38 ± 0,11)mm
área da secção transversal	:	(2,27 ± 0,61)mm ²
tensão de ruptura	:	(1,17 ± 0,75)kgf/mm ²
elongação	:	(22,74 ± 5,24)%
módulo de elasticidade	:	(10,26 ± 5,83)kgf/mm ²

Pericárdio bovino

espessura	:	(0,28 ± 0,07)mm
área da secção transversal	:	(1,86 ± 0,44)mm ²
tensão de ruptura	:	(1,15 ± 0,53)kgf/mm ²
elongação	:	(40,2 ± 7,3)%
módulo de elasticidade	:	(6,76 ± 2,42)kgf/mm ²

Ensaios de fadiga realizados⁽¹⁾ com duramãter podem ser sintetizados na equação

$$\sigma = e^{(6,4222 - 0,2436N)}$$

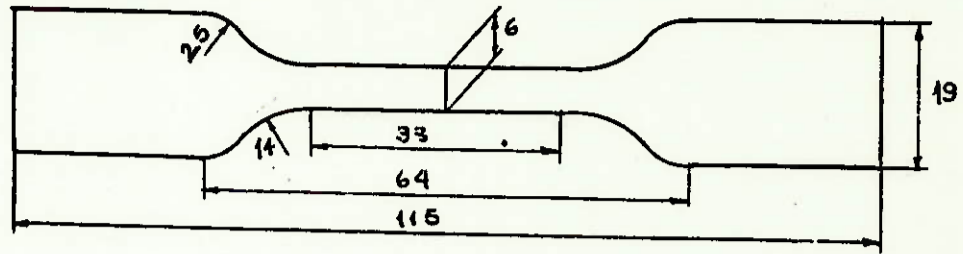


figura 9 : Dimensões do corpo de prova

TRAÇADO MODELO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO

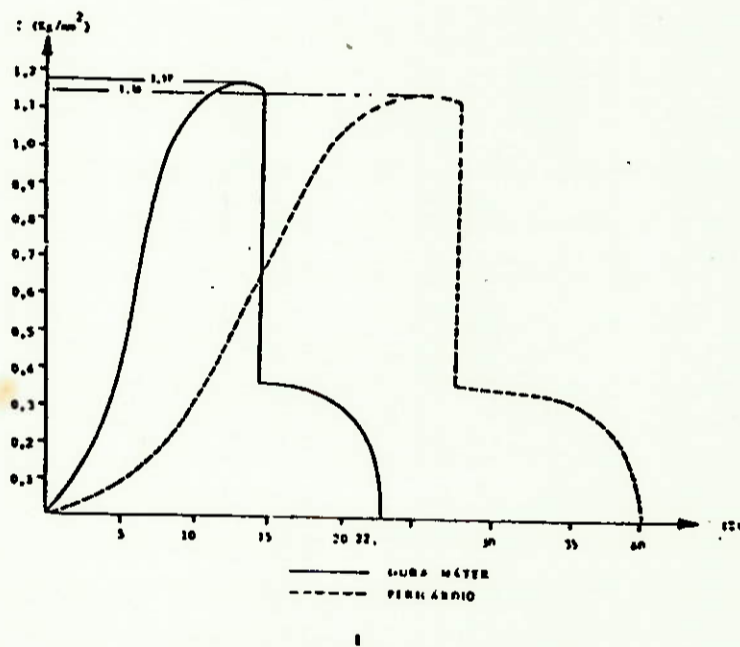


figura 10 : Curva de tensão x deformação.

Estes ensaios foram feitos com tensões que variaram de 6 a 133 kgf/cm² com curvas não senoidais. Nestes ensaios, um corpo de prova chegou a alcançar 80.000.000 ciclos com 14 kgf/cm².

As tensões fisiológicas medidas ⁽¹⁾ em válvulas cardíacas são da ordem de 4 kgf/cm².

Uma outra característica importante para o projeto é o fato de a membrana ir se alongando durante o ensaio de fadiga.

Muitos materiais poliméricos, como é o caso da membrana, possuem um comportamento viscoelástico, isto é, a deformação sob uma dada tensão é dependente do tempo. (fig. 11)

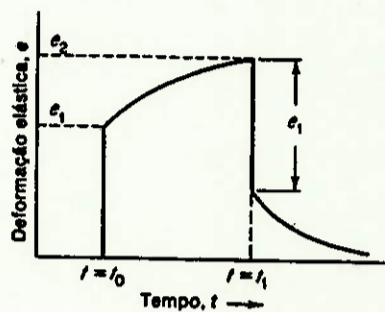


figura 11 : Comportamento viscoelástico:

- 1 : aplicação de uma carga constante
- 1-2-3 : curva de carregamento
- 2 : retirada da carga
- 3-4-5 : curva de descarregamento

Há varios modelos que procuram descrever esta propriedade, alguns deles mostrados na figura 12.⁽⁶⁾

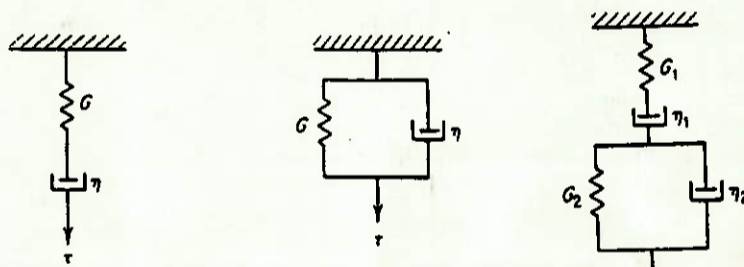


figura 12 : Modelo do comportamento viscoelástico
a) Elemento de Maxwell
b) Elemento de Voigt
c) Modelo de 4 elementos.

Mas, devido a falta de dados a este respeito relativos a membranas, vamos considerar que elas tenham apenas um comportamento elástico de mola, que resiste apenas a esforços de tração.

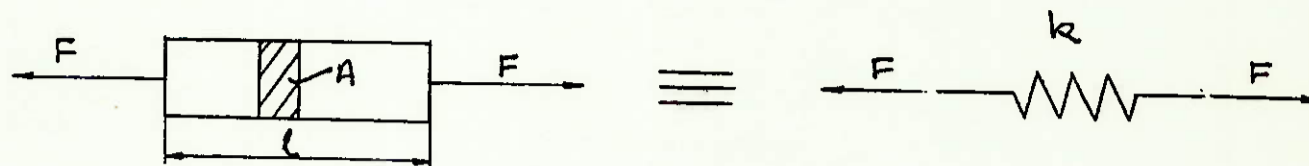


figura 13 : onde $K = \frac{EA}{l}$: constante de mola

E : módulo de elasticidade

A : área da secção transversal

l : comprimento

Além disso, é razoável admitir que esta mola seja linear, isto é, $\sigma = E\varepsilon$, na faixa de tensões de ensaio.

4. Exigências do equipamento de ensaio

Para cumprir os requisitos do ensaio de fadiga proposto o equipamento deve atender às exigências relacionadas a seguir:

1. Produzir tensões senoidais na membrana.
2. Possibilitar a variação contínua dos parâmetros que definem a senóide dentro das seguintes faixas:
 $0 \leq \sigma_{\max} \leq 130 \text{ kgf/cm}^2$
3. O tempo de ensaio deve ser o mais breve possível.
4. O equipamento deve compensar o alongamento da membrana durante o ensaio.
5. Deve prover meios de evitar a deterioração da membrana durante o ensaio.
6. Baixo custo.

A seguir, analisaremos sumariamente algumas das exigências acima.

As tensões senoidais são exigidas quanto seja possível aplicar-se os métodos e critérios existentes aos resultados. Podem ser conseguidas pela aplicação de uma força senoidal à membrana

ou aplicando uma deformação apropriada.

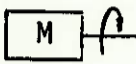
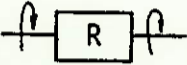
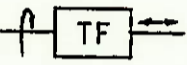
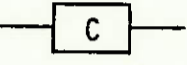
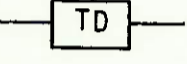
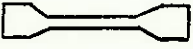
A duração do ensaio é um fator importante para que seja viável sua realização. Não se estabeleceu um tempo limite porque isso depende do valor da tensão média e máxima que se está usando.

A membrana, sendo de origem biológica, está sujeita a ataques do meio. Estes ataques podem ser por microorganismos que desagreguem a membrana ou por ressecamento da mesma, além de outros contaminados, o que alteram as suas características mecânicas invalidando os resultados.

SOLUÇÕES PROPOSTAS

Apresentaremos algumas das soluções propostas para o problema, baseados na hipótese de que uma deformação senoidal imposta à membrana produza tensões senoidais na mesma.

os esquemas das soluções, usaremos os seguintes símbolos para representar os elementos dos sistemas sob seu aspecto funcional:

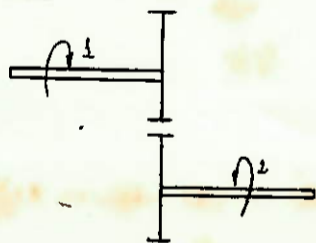
<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
	motor elétrico AC ou DC
	reductor de rotação
	elemento transformador de rotação em translação alternada.
	elemento de controle
	transdutor de força
	membrana a ensaiar

1. Modos construtivos dos elementos

A construção física desses elementos pode assumir uma série de formas, algumas das quais mostradas abaixo:

1. Redutores 

a. Engrenagens cilíndricas

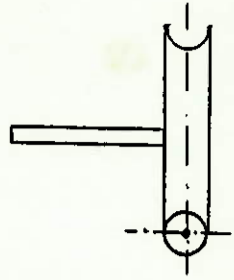


$$n_2 = i \cdot n_1$$

$$T_2 = \frac{1}{i} \cdot T_1$$

onde n_i : rotação
 T_i : torque

b. Coroa com parafuso sem fim

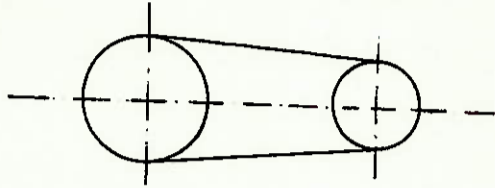


$$n_2 = i Z_1$$

$$T_2 =$$

onde Z_1 : nº de entradas do parafuso

c. Correias



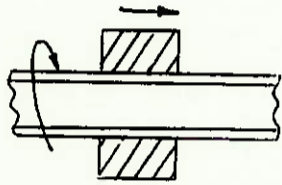
$$n_2 = i n_1$$

$$T_2 = \frac{1}{i} T_1$$

2. Transformadores



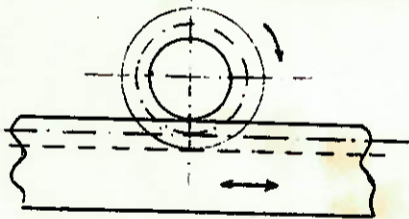
a. Parafuso de movimento com porca



$$\text{avanço} = n^{\circ} \text{entradas} \times \text{passo}$$

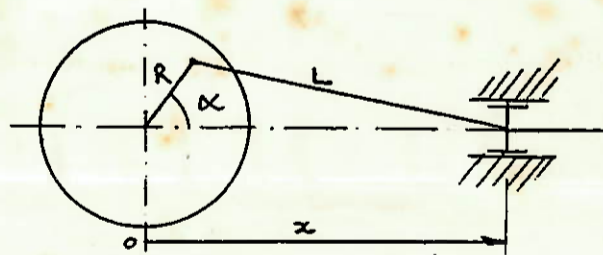
Dependendo das características da rosca, este sistema pode ter propriedade de autoretenção, isto é, uma carga aplicada na porca não faz com que o parafuso gire.

b. Cremalheira



c. Sistemas com excêntricos

i) Biela - manivela



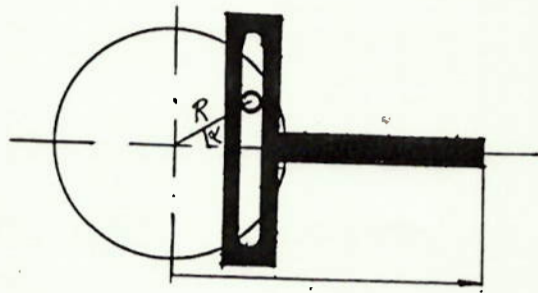
$$x = R \cdot \cos \alpha + L \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}$$

onde: x : posição linear da biela
 R : excentricidade
 L : comprimento da biela
 $\lambda = R/L$

ou de forma simplificada (7):

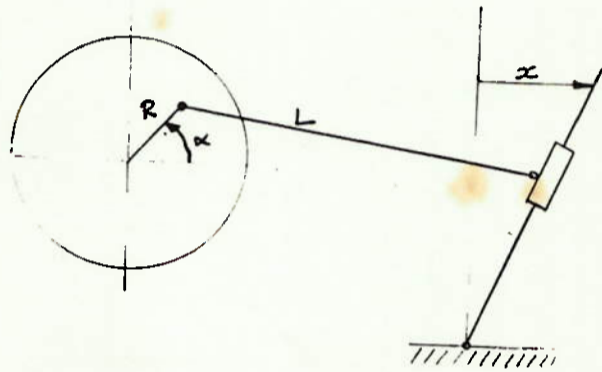
$$x = R \cos \alpha + L \left(1 + \frac{\lambda^2}{4} \cos 2\alpha \right)$$

ii) Came

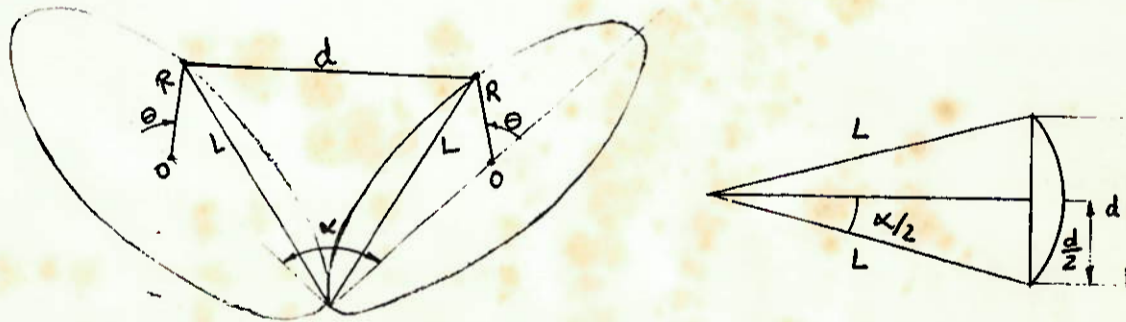


$$x = R \cdot \cos \alpha$$

iii)

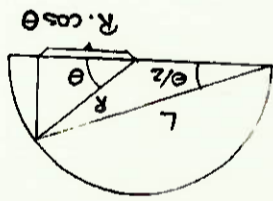


iv) Discos inclinados, usados em ensaios de fadiga de fios.



$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{d/2}{L}$$

$$dm = 2 \cdot L \cdot \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)$$



$$L \cdot \cos \theta = R (1 + \cos \theta)$$

$$L = R \frac{\cos(\theta/2)}{1 + \cos \theta}$$

Finalmente tem-se

$$d = 2 \cdot R \cdot \sin(\alpha) \cdot \left(\frac{\cos(\theta/2)}{1 + \cos \theta} \right)$$

O termo em θ pode ser aproximado por $2 \cos(\theta/2)$, e a equação fica:

$$d = 4 \cdot R \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\theta/2)$$

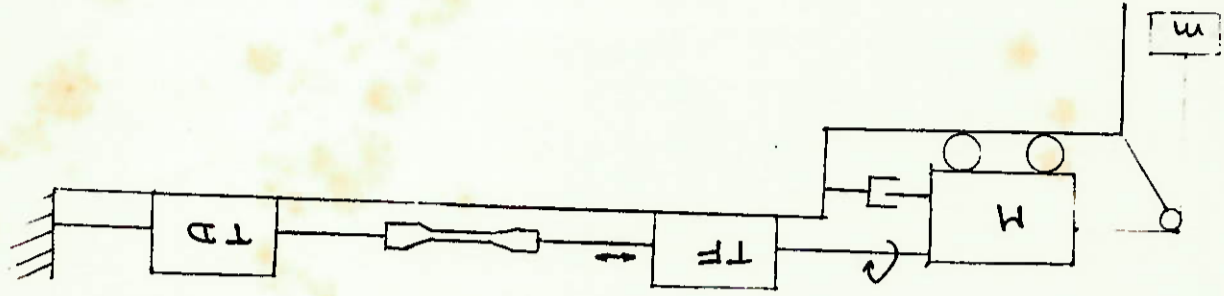
2. Soluções

1ª Solução: Motor flutuante

Esta solução é a existente no INCOR do HCFMUSP e está representada esquematicamente nas figuras 14 e 15.

Este sistema compensa o alongamento da membrana através do afastamento do motor que está montado sobre uma base móvel articulada. A variação da tensão média é dada pela variação da \bar{m} , que define em torno de qual ponto o sistema oscila.

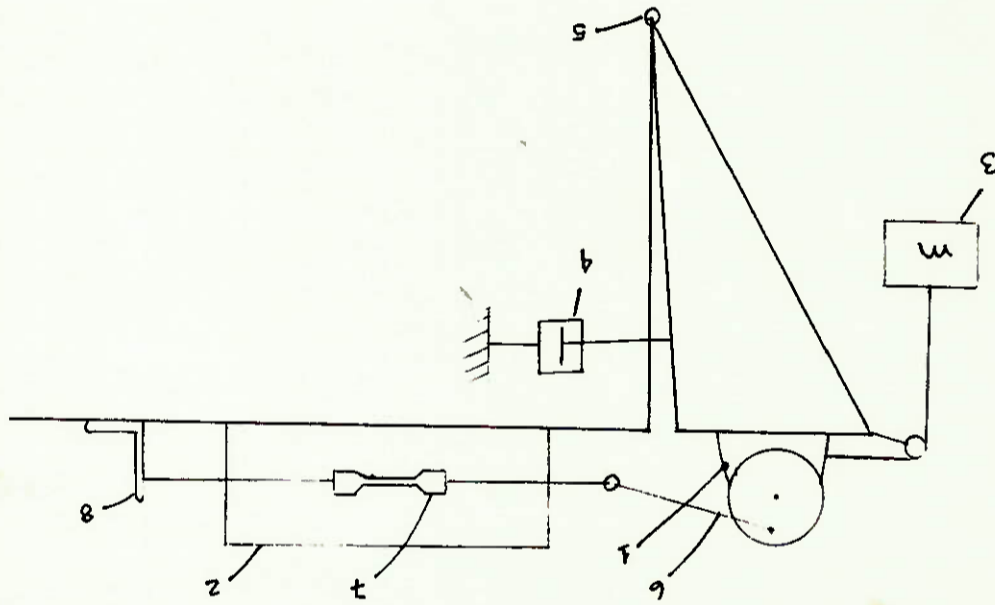
figura 15 : Esquema em termos dos símbolos definidos



Utilizando-se os símbolos definidos ela fica:

- 1 - motor c/excêntrico
- 2 - caixa hermética c/fluido aséptico
- 3 - massa que dá o valor médio de tensão
- 4 - amortecedor ligado à base do motor
- 5 - articulação
- 6 - biela
- 7 - membrana
- 8 - transdutor de força

figura 14 : Esquema da solução c/motor flutuante



A membrana é colocada em uma caixa hermética com um flui-
do asséptico que garante a sua preservação.

O motor, com uma inércia alta, e o amortecedor, com um al-
to valor da constante de amortecimento, devem garantir uma "rigidez"
ao sistema suficiente que o motor não oscile.

Um dos inconvenientes que apresenta é que a amplitude de
oscilação é fixa, pois a excentricidade é fixa em 6mm. Outro pro-
blema que apresenta é que as curvas de tensão não são senoidais, a
parecendo inclusive, tensões negativas (compressão) no registro o
que não pode ser devido à membrana. Observando-se o ensaio vê-se
que a membrana oscila e não só na direção em que ela é tracionada.
Isto pode ser causado pelas folgas existentes entre a haste que ã
ne a biela à membrana e a sua bucha.

Uma modificação que poderia se pensar em fazer, seria a
introdução de um sistema de controle que agisse sobre o motor.

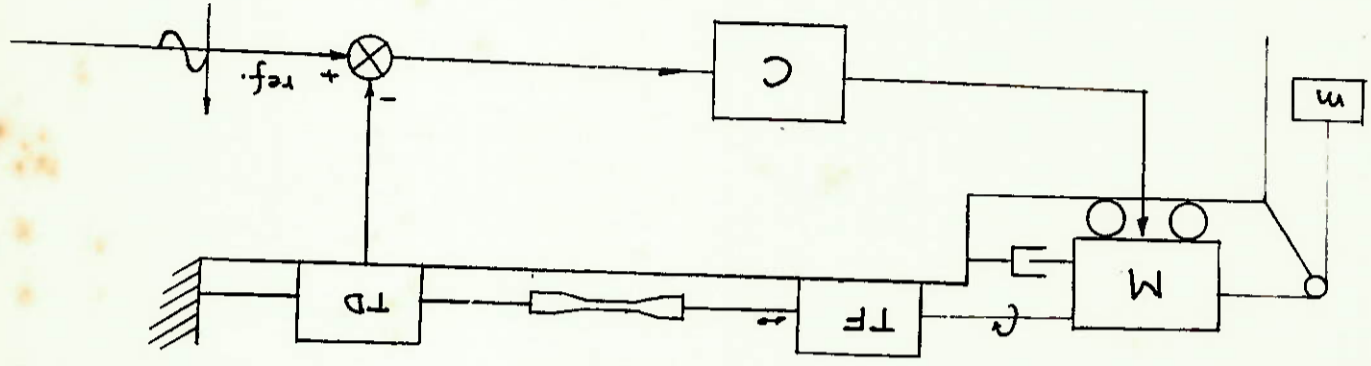


figura 16: Solução de motor flutuante com controle.

Este sistema compararia a tensão na membrana medida pelo
transdutor com uma tensão elétrica senoidal usada como referência
e em função disso agiria sobre o motor. A objeção que se faz a es-
se sistema é que pode haver perda de controle devido ao fato de o
motor estar "flutuante".

2a. solução: Reversão do motor

Esta solução prevê a inversão da solução do motor para produzir o movimento oscilatório na membrana.

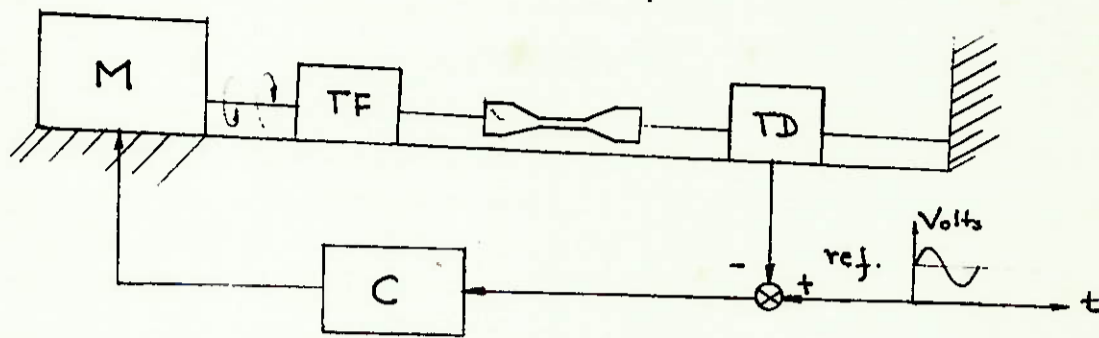


figura 17 : Esquema da solução de reversão do motor

O alongamento, neste caso, é compensado pelo próprio motor, que altera a posição angular em torno do qual ele oscila mandado pelo controle C:

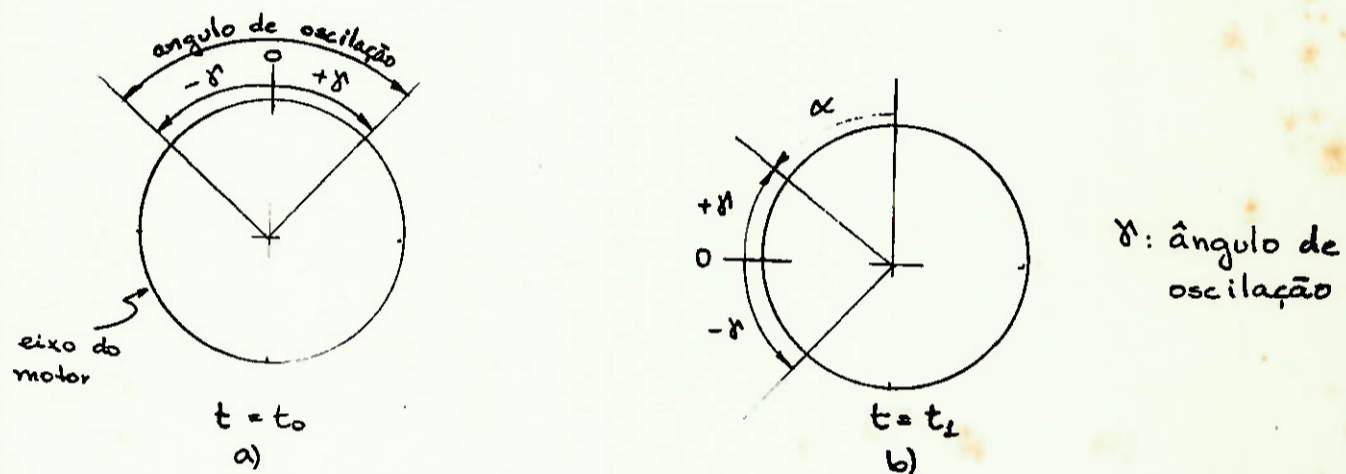


figura 18 : Compensação do alongamento do motor

- a) posição angular do eixo do motor num instante t_0
- b) posição da oscilação do eixo do motor num instante t_1 em que a membrana tenha se alongado o equivalente a um ângulo α .

— O principal inconveniente a esta proposta é o fato de o motor poder se sobreaquecer muito devido às inversões do sentido de rotação do motor serem de frequência alta, além do que a frequência alta, além do que a frequência de ensaio deveria ser reduzida em muito.

3a. solução: Magnética

Consiste em se utilizar um eletroímã para se gerar o movimento oscilatório e para compensar o alongamento.

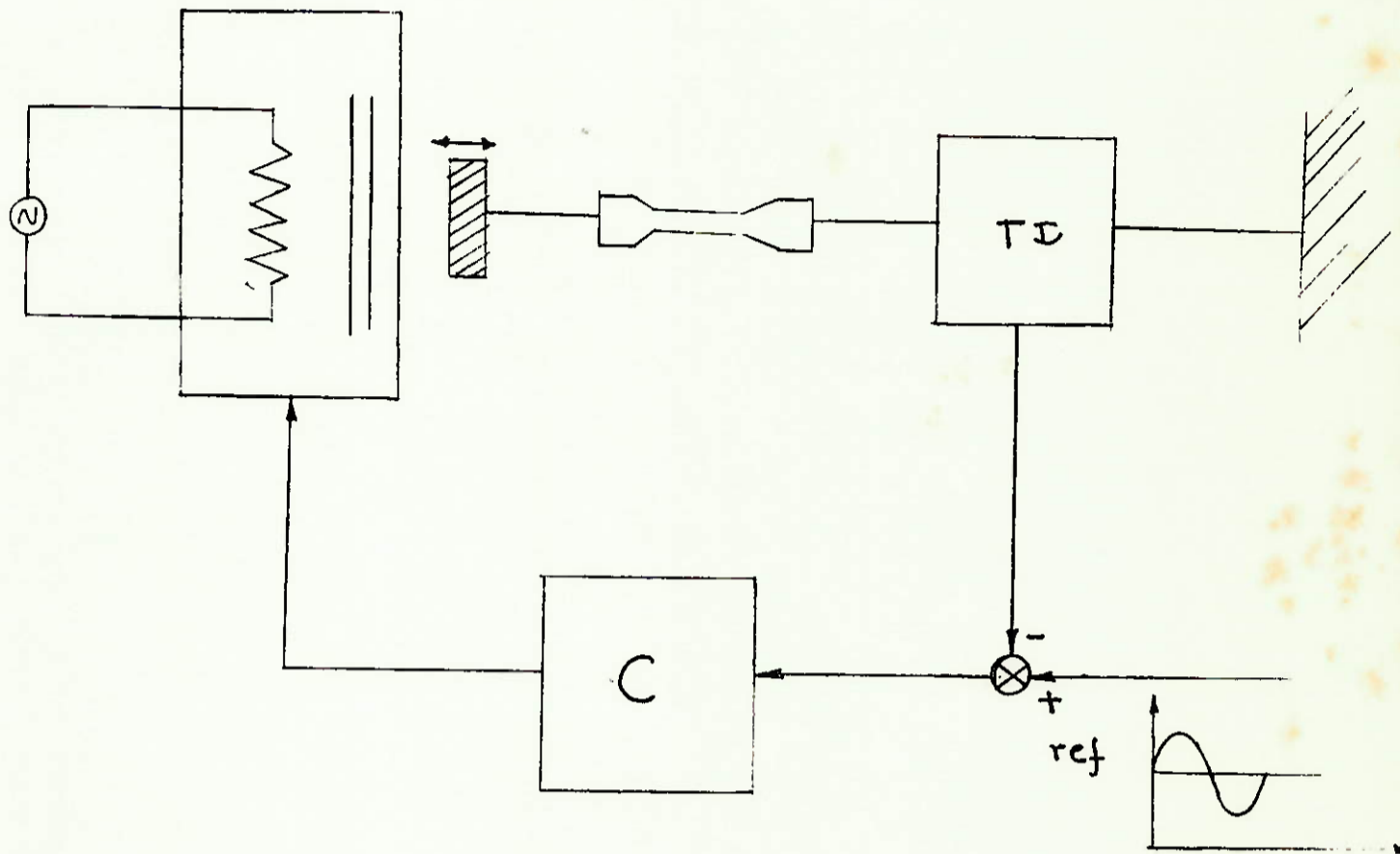


figura 19 : Sistema magnético

Este sistema permite um ajuste bastante preciso dos parâmetros da senóide, mas para que o eletroímã forneça as forças necessárias ao ensaio, é preciso uma tensão elétrica tal que dificulta a realização do sistema de controle.

4a. solução: Dois motores

É constituído por dois motores: um para produzir o movimento senoidal e outro, para possibilitar a compensação do alongamento.

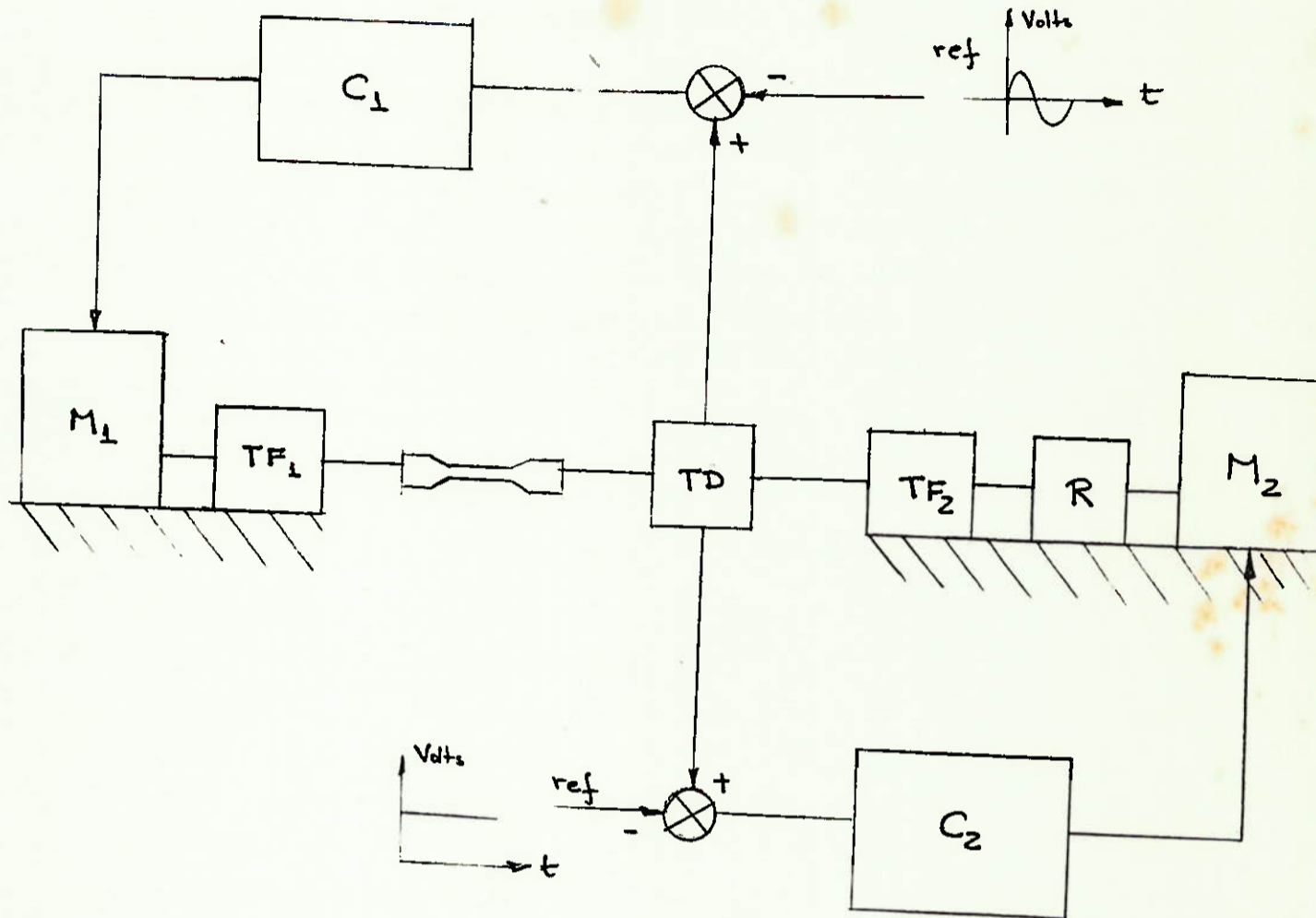


figura 20 : Sistema com dois motores

Esta solução tem a vantagem de poder controlar todas as variáveis do sistema o permitir um ajustado valor médio do sistema pela referência do controle C_2 e de assegurar a forma de onda senoidal através de C_1 . Suas desvantagens são a complexidade e o custo mais elevado que as demais soluções.

5a. solução: Hidráulica

Esta proposta consiste no seguinte:

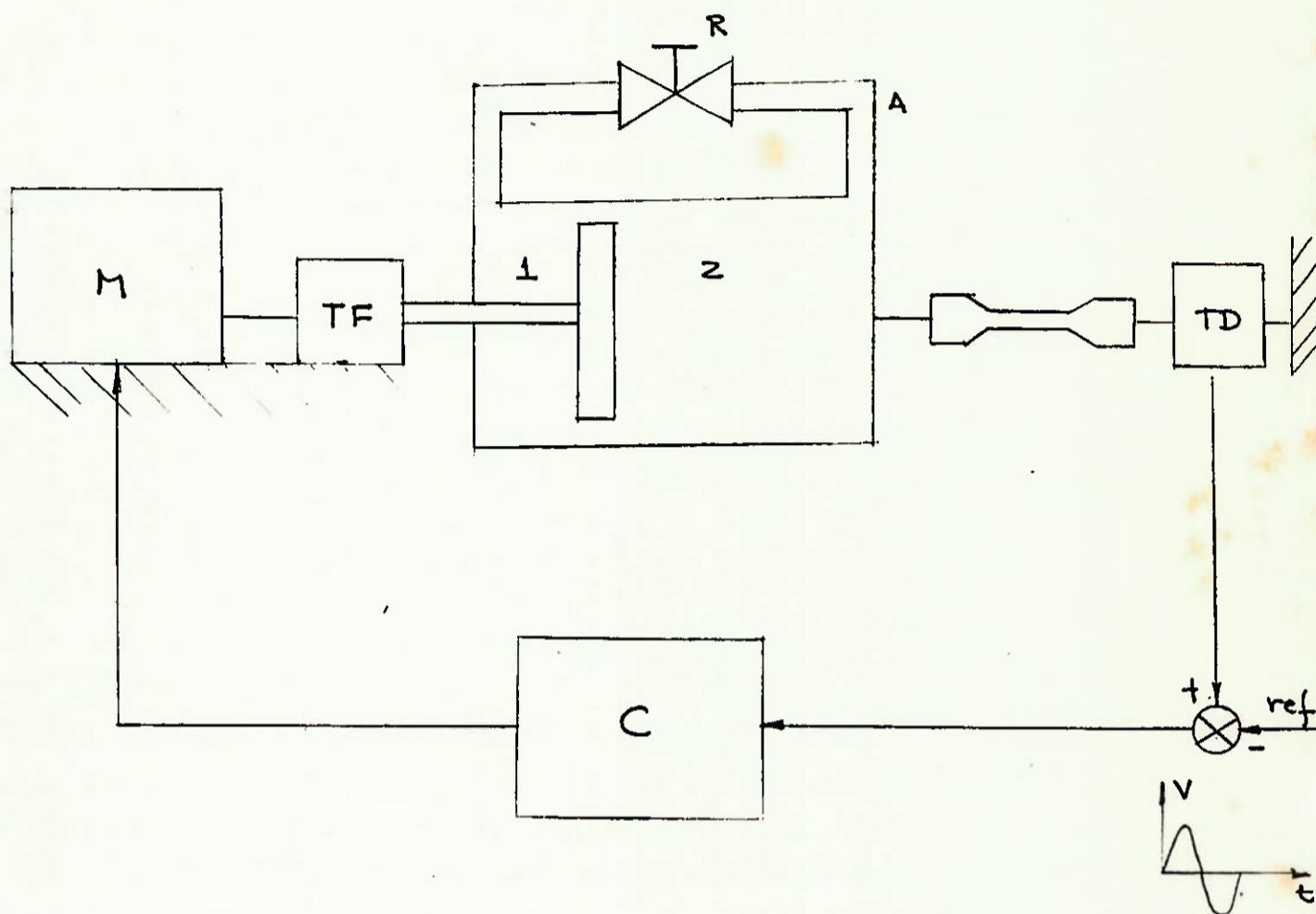


figura 21 : Sistema hidráulico

0. seu funcionamento é o seguinte: a oscilação linear do embolo faria o fluido escoar da câmara 1 para a 2 e da 2 para 1, o que promoveria o deslocamento do cilindro externo. A amplitude de oscilação do cilindro é função da resistência ao escoamento R do ramo A: As situações extremas são as seguintes:

$R = 0$ (registro todo aberto e sem
perda na linha)

cilindro externo
não se move.

$R = \infty$ (registro fechado)

cilindro externo se move
junto com o embolo
(deslocamento relativo nulo)

O próprio deslocamento do cilindro compensa o alongamento da membrana à medida em que vai ocorrendo, por ele oscilar em torno da posição de equilíbrio de forças. O valor médio da tensão na membrana é ajustado pelo posicionamento inicial entre embolo e cilindro fixado no início do funcionamento. Sua principal vantagem é o custo ser baixo e ser simples construtivamente.

SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS

A seleção da alternativa mais satisfatória é baseada numa matriz de decisão em que são relacionados vários critérios aos quais são atribuídos pesos. A cada critério avalia-se o desempenho esperado das soluções em relação a ele através de uma nota. A solução cuja somatória dos pesos multiplicado por suas notas é a escolhida para ser desenvolvida.

CRITERIO	Peso	SOLUÇÕES				
		Flut.	Rever.	Hidr.	Magn.	2 Mot
Forma de onda sen.	10	5	7	8	8	8
Juracao do ensaio	10	8	5	5	6	8
Simplicid. construo	6	6	8	8	4	4
Confiabilidade	7	6	3	6	7	5
Variacao paramet.	8	4	7	8	8	8
Facilid. de const.	6	6	7	7	5	5
TOTAL		276	287	326	307	313

Como se pode ver na matriz montada, a solução hidráulica é a que se mostra mais propícia, estando a seguir a de dois motores. A solução hidráulica será a escolhida para desenvolvimento no projeto básico e será proposto um protótipo que deve ser ensaiado para se verificar seu desempenho. A solução dos dois motores fica como uma alternativa a ser desenvolvida posteriormente caso o sistema hidráulico se mostre ineficiente na prática. Uma possibilidade para o sistema de controle para compensação do alongamento para esta última solução está discutida no apêndice.

ANÁLISE E PROJETO BÁSICO DA SOLUÇÃO

SISTEMA HIDRÁULICO

A seguir, faremos uma análise mais detalhada da solução hidráulica proposta. Será deduzido e analisado um modelo matemático, além de alguns problemas que ocorrem a fim de se chegar a uma conclusão a respeito de sua viabilidade técnica.

1. Modelo matemático

a. Equação do amortecedor⁽⁶⁾

Substituindo a membrana por uma mola K , temos:

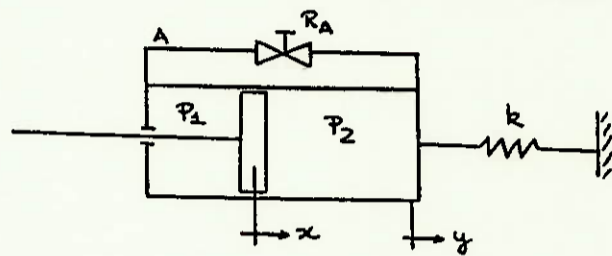


figura 22 : Sistema hidráulico

$$F_{\text{pistão}} = F_{\text{mola}}$$

$$A(P_2 - P_1) = ky \quad (1)$$

onde: A : área de embolo

P_1 : pressão na câmara 1

P_2 : pressão na camara 2

K : constante de mola

y : coordenada do cilindro

$$q = \frac{P_2 - P_1}{R} \quad (2)$$

onde: q : vazão em massa pela restrição
 R : resistência da restrição

$$q = \rho \cdot A \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \quad (3)$$

onde: ρ : densidade suposta constante
(fluido incompressível)

\dot{x} : velocidade do embolo

\dot{y} : velocidade do cilindro

Das equações (1), (2) e (3) obtêm-se:

$$q = \frac{P_2 - P_1}{R} = \frac{k}{A R} y = \rho A (\dot{x} - \dot{y})$$

$$\dot{y} + \left(\frac{k}{\rho A^2 R} \right) y = \dot{x} \quad (4)$$

b. Obtenção da constante de amortecimento c .

Vamos determinar a seguir, a equação de um sistema equivalente ao do item a) e por analogia obter o valor de c .

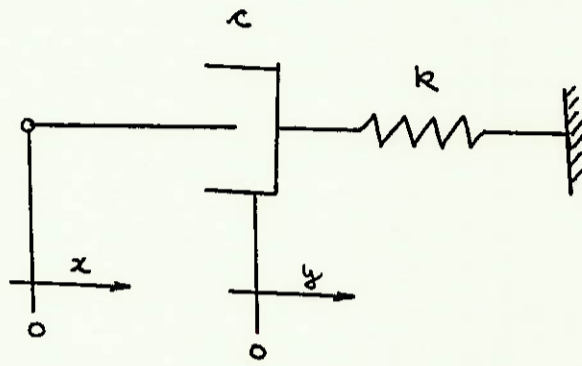


figura 23 : Sistema equivalente ao do item a).

$$F_{\text{amortecedor}} = c (\dot{x} - \dot{y})$$

$$F_{\text{mola}} = k y$$

$$F_{\text{amort.}} = F_{\text{mola}}$$

$$c (\dot{x} - \dot{y}) = k y$$

$$\dot{y} + \left(\frac{k}{c} \right) y = \dot{x} \quad (5)$$

Comparando a equação 5 com a (4) vê-se que:

$$c = \rho A^2 R \quad (6)$$

c. Dedução do modelo para a solução proposta

Devido a constante de mola da membrana ter um valor muito baixo, é importante levar em conta a inércia do cilindro.

esquema:

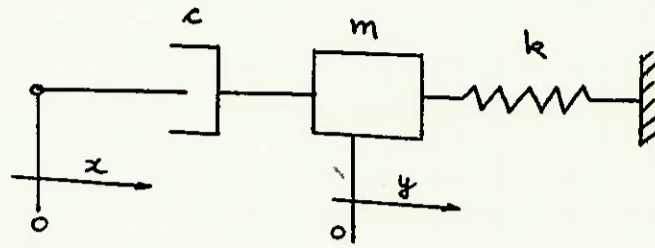
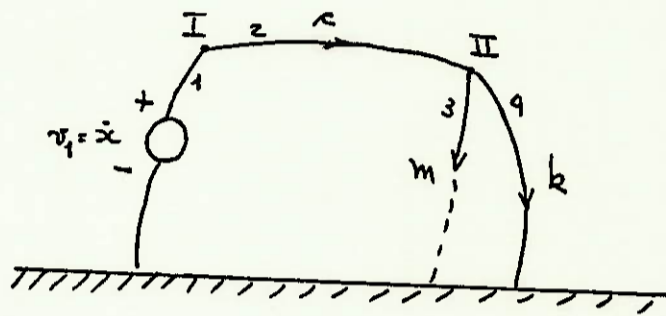


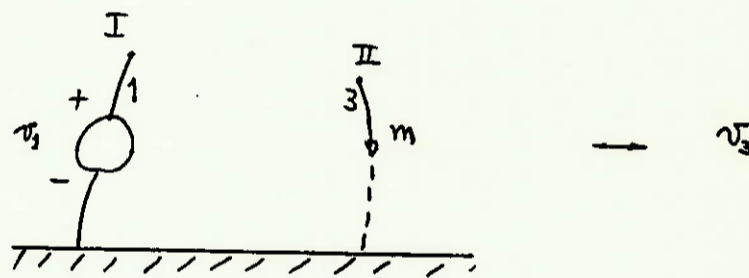
figura 24 : Esquema da sol. levando em conta a inércia m do cilindro.

gráfico linear:

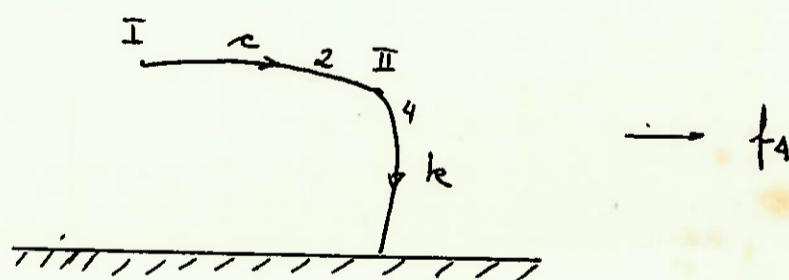


Variáveis de estado:

árvore normal



ligações



Equações elementares:

$$f_2 = c \cdot v_2$$

$$f_3 = m \dot{v}_3$$

$$v_4 = \frac{1}{4} \dot{f}_4$$

Equações de continuidade:

$$f_2 = f_3 + f_4$$

$$f_1 = f_2$$

Equações de compatibilidade:

$$v_1 = v_2 + v_3$$

$$v_3 = v_4$$

Equações de estado:

$$\begin{aligned} \dot{v}_3 &= \frac{1}{m} f_3 = \frac{1}{m} (f_2 - f_4) = \frac{1}{m} (c v_2 - f_4) = \\ &= \frac{1}{m} [c(v_1 - v_3) - f_4] \end{aligned}$$

$$\dot{f}_4 = kv_4 = kv_3$$

Rearranjando as equações acima:

$$\dot{v}_3 = \frac{c}{m} v_1 - \frac{c}{m} v_3 - \frac{k}{m} y_3$$

$$y_3 = \frac{c}{m} v_1 - \frac{c}{m} \dot{v}_3 - \frac{b}{m} y_3$$

$$y_3 + \frac{c}{m} \dot{v}_3 + \frac{k}{m} y_3 = \frac{c}{m} v_1$$

chamando \underline{y}_3 de y e \underline{v}_1 de \underline{v}

$$\underline{y} + \frac{c}{m} \dot{\underline{y}} + \frac{k}{m} \underline{y} = \frac{c}{m} \underline{v}$$

Portanto:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad : \quad \text{frequência natural}$$

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad : \quad \text{fator de amortecimento}$$

Com estes fatores pode-se escrever a equação (7) da seguinte forma:

$$\ddot{y} + 2\xi w_n \dot{y} + w_n^2 y = 2\xi w_n v \quad (8)$$

Para uma excitação senoidal do tipo $x = -\cos wt$ tem-se:

$$x = -\cos wt$$

$$\dot{x} = w \sin wt$$

E a equação (8) fica:

$$\ddot{y} + 2\xi w_n \dot{y} + w_n^2 y = 2\xi w_n w \sin wt$$

$$\ddot{y} + 2\xi w_n \dot{y} + w_n^2 y = 2\xi w_n^2 r \sin wt$$

$$\text{onde } r = \frac{w}{w_n}$$

d. Resposta em frequência (9)

Escrevendo a equação (9) para uma entrada genérica $Z(t)$

$$\ddot{y} + 2\xi w_n \dot{y} + w_n^2 y = Z(t)$$

Pode-se obter a função de transferência aplicando-se a Transformada de Laplace à equação acima, admitindo condições iniciais nulas:

$$s^2 \cdot Y(s) + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s \cdot Y(s) + \omega_n^2 Y(s) = Z(s)$$

$$Y(s) [s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2] = Z(s)$$

$$\boxed{\frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{1}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}} \quad (10)$$

A resposta $Y(t)$ a uma entrada $Z(t) = \sin \omega t$ pode ser obtida da seguinte forma:

$$\frac{X}{Z}(s) = \frac{1}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$

$$\frac{X}{Z}(j\omega) = \frac{1}{-\omega^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot \omega j + \omega_n^2} =$$

$$= \frac{1}{(\omega_n^2 - \omega^2) + (2 \xi \omega_n \omega) j} =$$

$$= \frac{1}{\omega_n^2 [(1 - r^2) + (2 \xi \cdot r) j]} =$$

$$= \frac{(1 - r^2) - (2 \xi \cdot r) j}{\omega_n^2 [(1 - r^2)^2 + (2 \xi \cdot r)^2]}$$

Como

$$\frac{X}{Z}(j\omega) = a + bj = M \angle \theta$$

$$\text{onde: } M = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = \arctg \frac{b}{a}$$

Temos:

$$M = \frac{1}{\omega_n^2} \sqrt{\frac{[(1 - r^2)^2 + (2 \xi r)^2]}{[(1 - r^2)^2 + (2 \xi r)^2]}}$$

$$M = \frac{1}{\omega_n^2 \sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (11)$$

$$\theta = \arctg \frac{2\xi r}{r^2-1} \quad (12)$$

Para uma entrada:

$$Z(t) = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n^2 \cdot r \cdot \sin \omega t$$

tem-se:

$$M = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n^2 \cdot r}{\omega_n^2 \cdot \sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$$

$$M = \frac{2 \cdot \xi \cdot r}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (13)$$

Pode-se modificar esta equação da seguinte forma:

$$\begin{aligned} M &= \frac{2 \cdot \xi \cdot r}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2 \cdot r)^2}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{1-r^2}{2 \cdot \xi \cdot r} + 1}} = \\ &= \frac{1}{\operatorname{cosec} \theta} = \sin \theta \end{aligned}$$

$$M = \sin \theta \quad (14)$$

A equação (13) está representada graficamente na figura

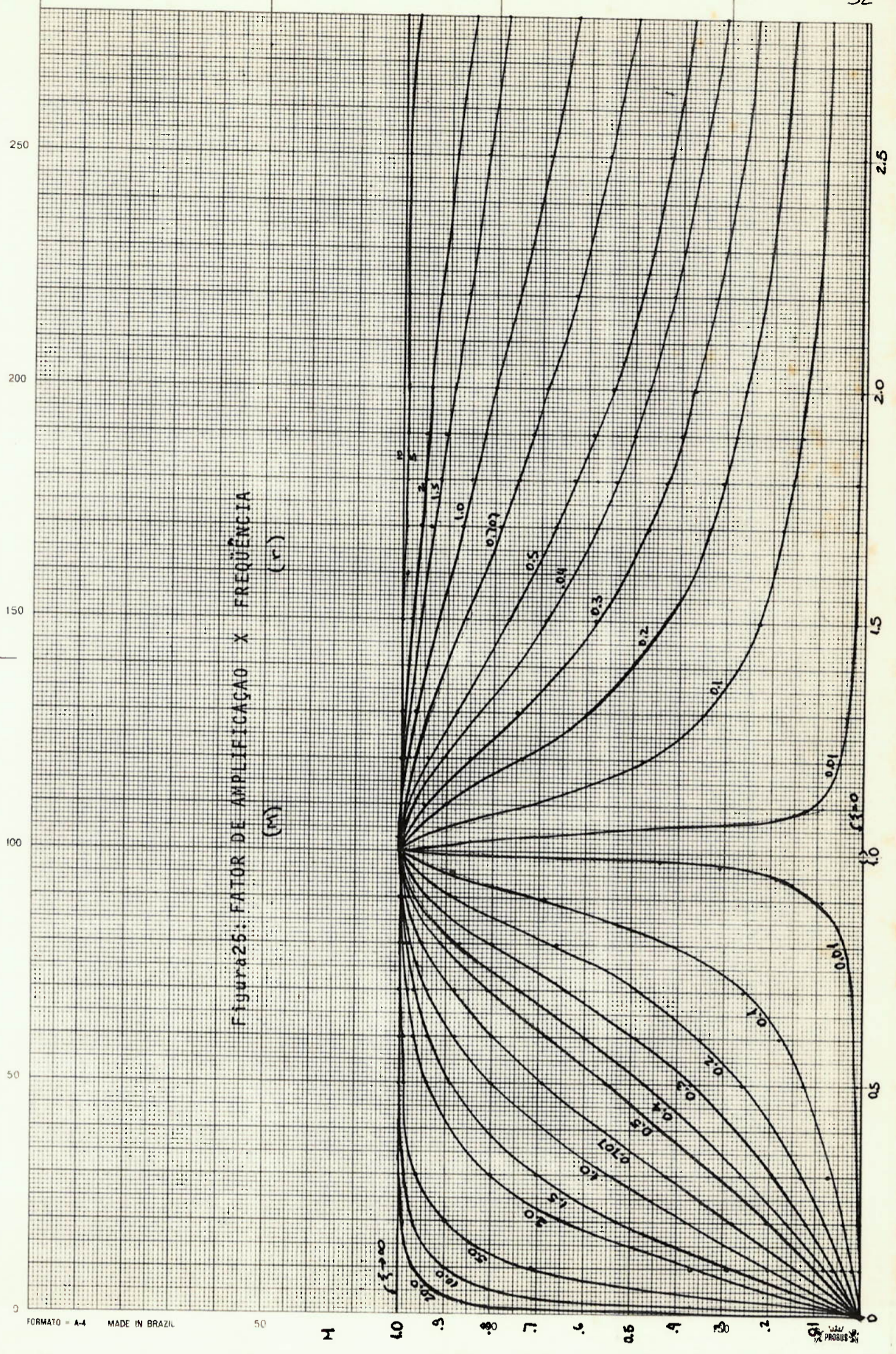


Figura 25: FATOR DE AMPLIFICAÇÃO X FREQUÊNCIA (r)

A seguir deduziremos uma equação para a sensibilidade do fator de amplificação M em relação ao fator de amortecimento ξ , e outra para a sensibilidade de M em relação à frequência de oscilação do embolo ($r = w/w_n$).

Para isto, utilizaremos a seguinte definição de sensibilidade:

$$S_y^x \triangleq \frac{dx}{dy}$$

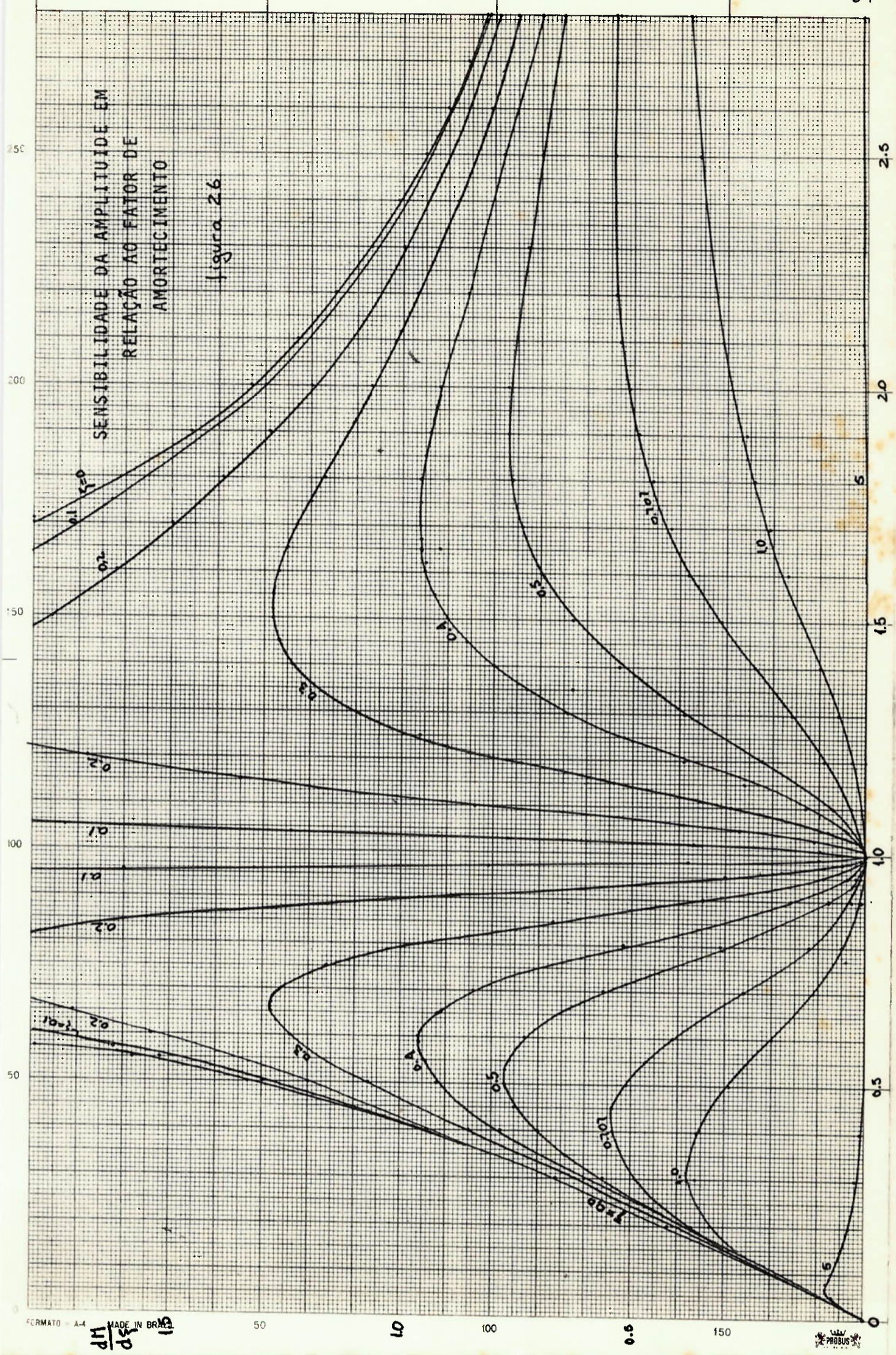
i) Sensibilidade de M em relação a ξ : S_ξ^M

$$\begin{aligned} \frac{dM}{d\xi} &= 2.r \cdot \left[\frac{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2} - \frac{4 \cdot \xi \cdot r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}}{[(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2]} \right] = \\ &= 2.r \cdot \left[\frac{(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2 - 4 \cdot \xi^2 \cdot r^2}{[(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2]} \right] = \\ &= 2.r \cdot \frac{(1-r^2)^2}{[(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2]} \end{aligned}$$

$$S_\xi^M = \xi \cdot \frac{dM}{M \cdot d\xi} = \frac{r \cdot \sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}{2 \cdot \xi} \cdot \frac{2}{r} \cdot \frac{\xi (1-r^2)^2}{[(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2]^{5/2}}$$

$$S_\xi^M = \frac{2 \cdot r \cdot (1-r^2)^2}{[(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2]^{3/2}} \quad (14)$$

Esta equação está representada graficamente na figura 26.



Para a equação acima, quando:

$$\begin{aligned} r=0 &\longrightarrow S_{\xi}^M = 0 \\ r=1 &\longrightarrow S_{\xi}^M = 0 \end{aligned}$$

O que concorda com a equação (13), isto é, para $r=0$ e $r=1$ o fator de amplificação M vale 0 e 1 respectivamente, independente - mente do valor de ξ (vide figura 25).

O comportamento da equação (15) pode ser observado na fi- gura 26.

ii) Sensibilidade de M em relação a r : S_r^M

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dr} &= 2 \cdot \xi \cdot \left[\frac{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2} - r \cdot \frac{2(1-r^2)(-2r) + 2(2\xi r)2\xi}{2\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}}{(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2} \right] = \\ &= 2 \cdot \xi \cdot \left[\frac{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2} - \frac{r \cdot (-2r(1-r^2) + 4 \cdot \xi^2 \cdot r)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2}}}{(1-r^2)^2 - (2 \cdot \xi \cdot r)^2} \right] = \\ &= 2 \cdot \xi \cdot \left[\frac{(1-r^2)^2 - (2 \cdot \xi \cdot r)^2 - 2 \cdot r^2(1-r^2) - 4 \cdot \xi^2 \cdot r^2}{\left[(1-r^2)^2 - (2 \cdot \xi \cdot r)^2 \right]^{3/2}} \right] = \end{aligned}$$

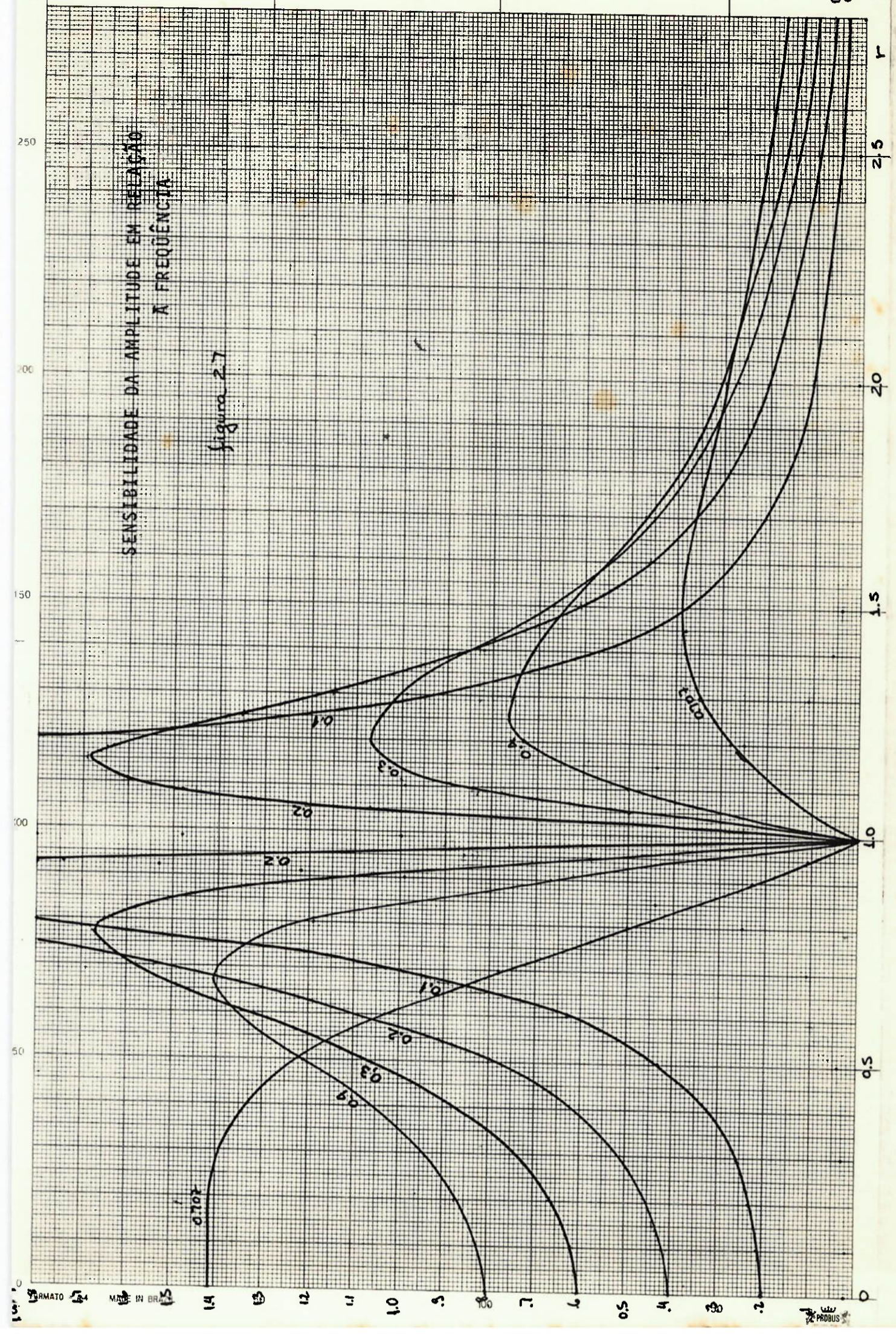
Então,

$$S_r^M = \frac{2 \cdot \xi \cdot (1-r^4)}{\left[(1-r^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot r)^2 \right]^{3/2}} \quad (16)$$

Esta equação está representada graficamente na figura 27.

SENSIBILIDADE DA AMPLITUDE EM RELAÇÃO
À FREQUÊNCIA

figura 27



144 0 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

e . Alguns problemas do sistema

Um problema que aparece no sistema, é o fato de a membrana por sô aplicar a força num sentido no cilindro, faz com que a vazão quando o embolo se move num sentido é menor que quando ele se move no outro. Isto leva a posição em torno da qual o cilindro ^{oscila} ir se deslocando em relação ao embolo até que a camara 1 (da esquerda nas figuras) fique com volume nulo.

Este fato, está demonstrado na figura 28. Uma solução para este problema é a colocação de uma válvula de retenção com um registro como mostrado na figura .

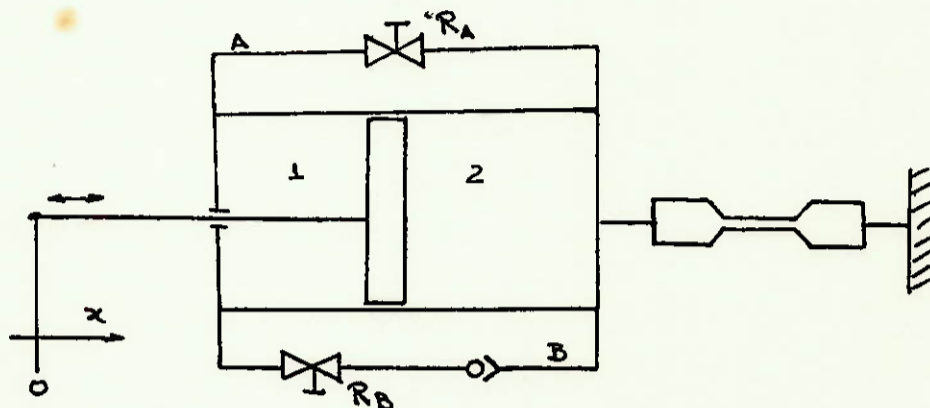
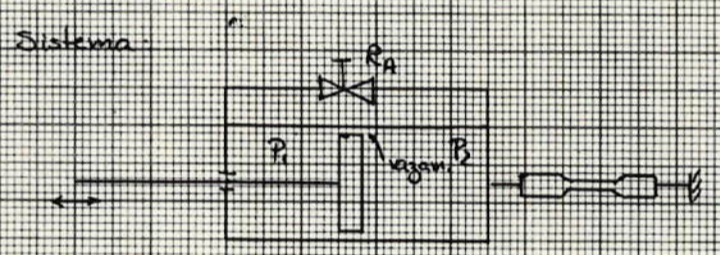
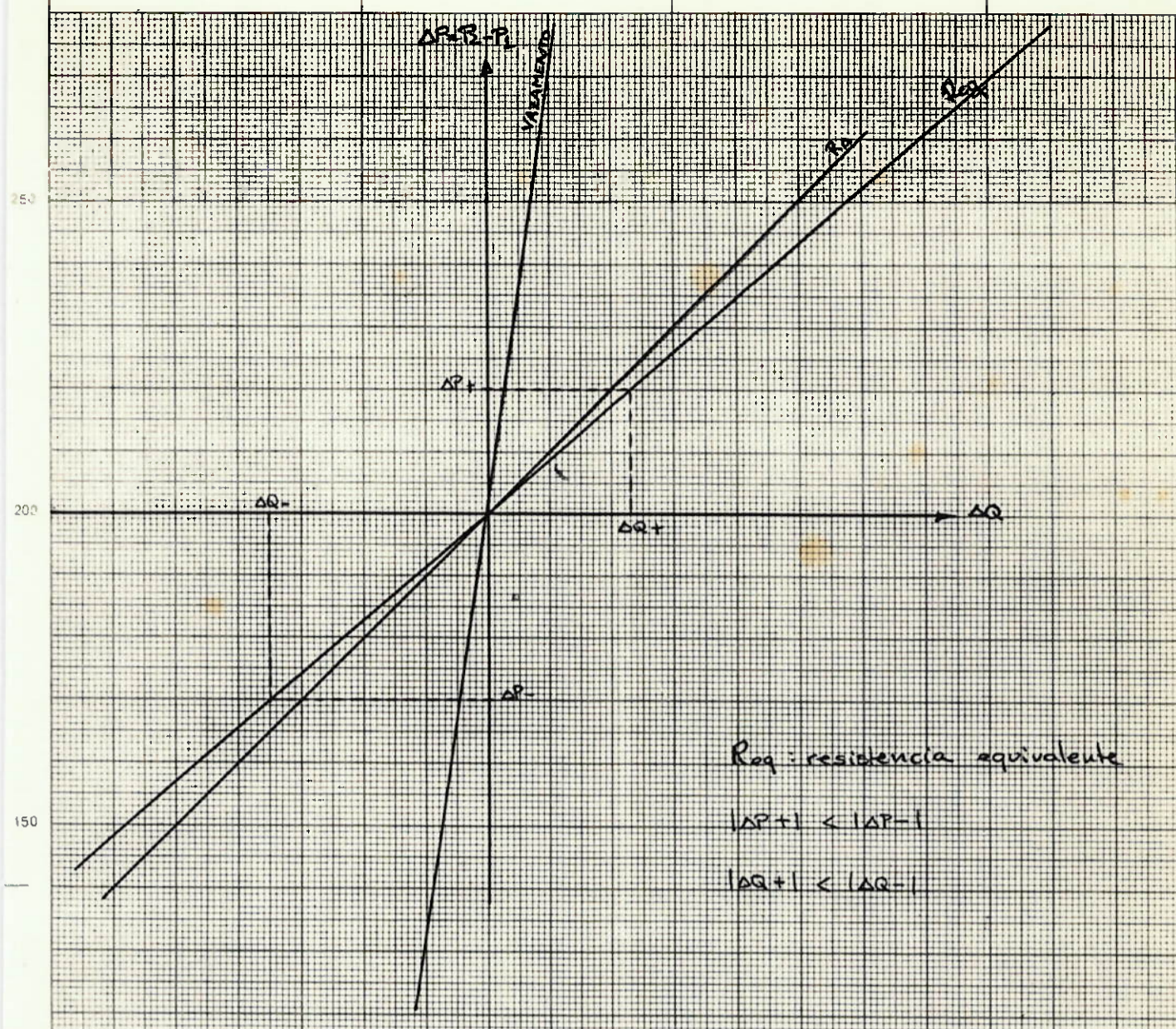


figura 31 : Sistema hidráulico modificado

Com esta modificação, a resistência fluida quando o embolo se move num sentido é maior que quando ele se move no outro.

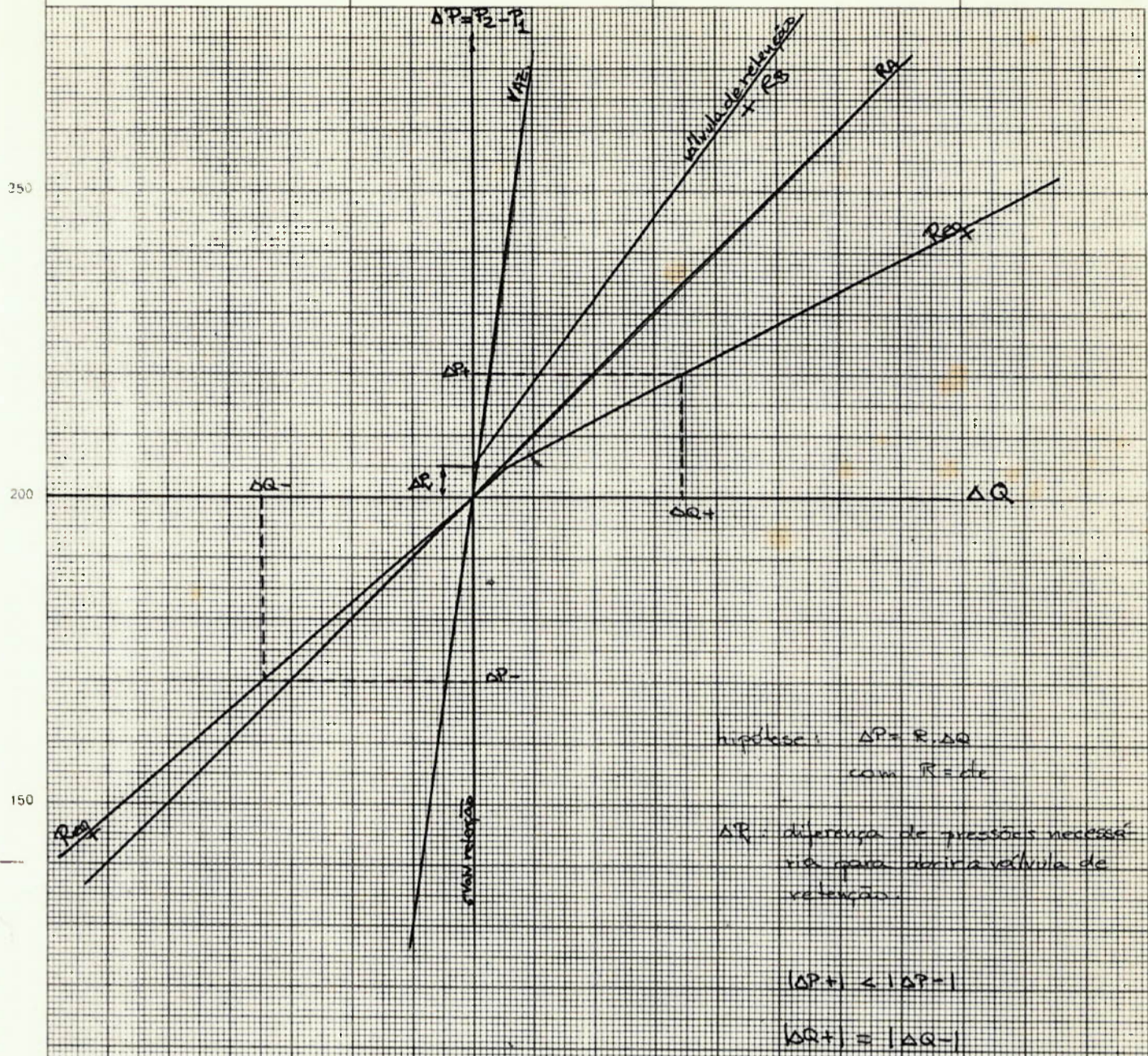
Quando o embolo se move no sentido de \odot (para a direita), o fluído da camara 2 escoa para a camara 1 através dos ramos R_A e R_B (resistência menor).

Ao contrário, quando o embolo se move no sentido de \ominus (para a esquerda) a válvula de retenção bloqueia o ramo B e o escoamento da camara 1 para a camara 2 se dá sô pelo ramo A (portanto, a resistência é maior). Dessa forma, quando P é menor, devido a força exercida pela membrana ser "favorável", a resistência também é menor. Através do registro R_B é possível ajustar-se a perda de carga na linha de forma que as vazões nos dois sentidos sejam iguais, o que faz com que a posição de equilíbrio seja em torno do valor médio de tensão ajustado para a membrana. Isto é mostrado na figura 29 e também na figura 30 em gráfico.



Devido a diferença entre as vazões ΔQ_+ e ΔQ_- , este sistema tende a esvaziar a câmara B. Uma solução para este problema pode ser vista na figura seguinte.

figura 2B



Como pode-se ver acima, é possível ajustar uma resistência R_B de forma a se conseguir a mesma vazão nos dois sentidos do movimento (ΔP_+ e ΔP_- , com $|\Delta P_+| \neq |\Delta P_-|$). O sistema que permite o efeito acima é o seguinte:

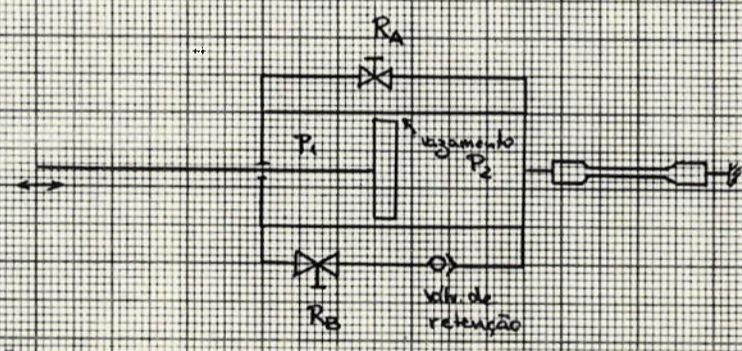


figura 29

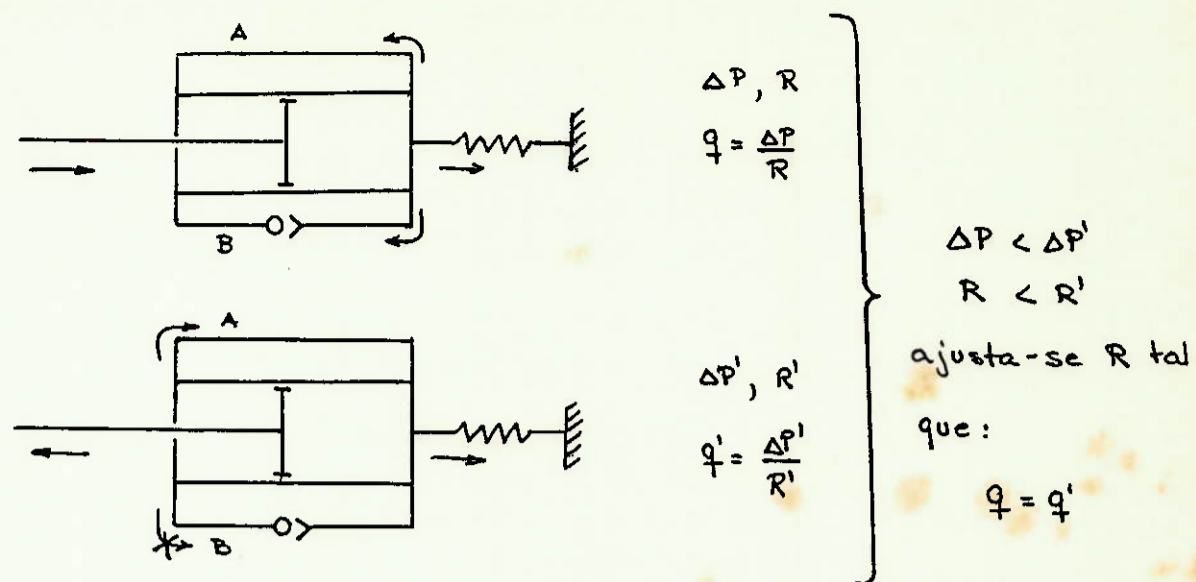


figura 30 : Ajuste das vazões.

Um outro problema relativo a esse sistema é que, para a oscilação do cilindro ser senoidal quando a oscilação do êmbolo é senoidal, a resistência nos ramos A e B devem ser lineares. Para garantir isso, é preciso utilizar diâmetros pequenos nestes ramos de forma a manter o escoamento em forma laminar. ($Re < 2320$).

f. Compensação do alongamento da membrana

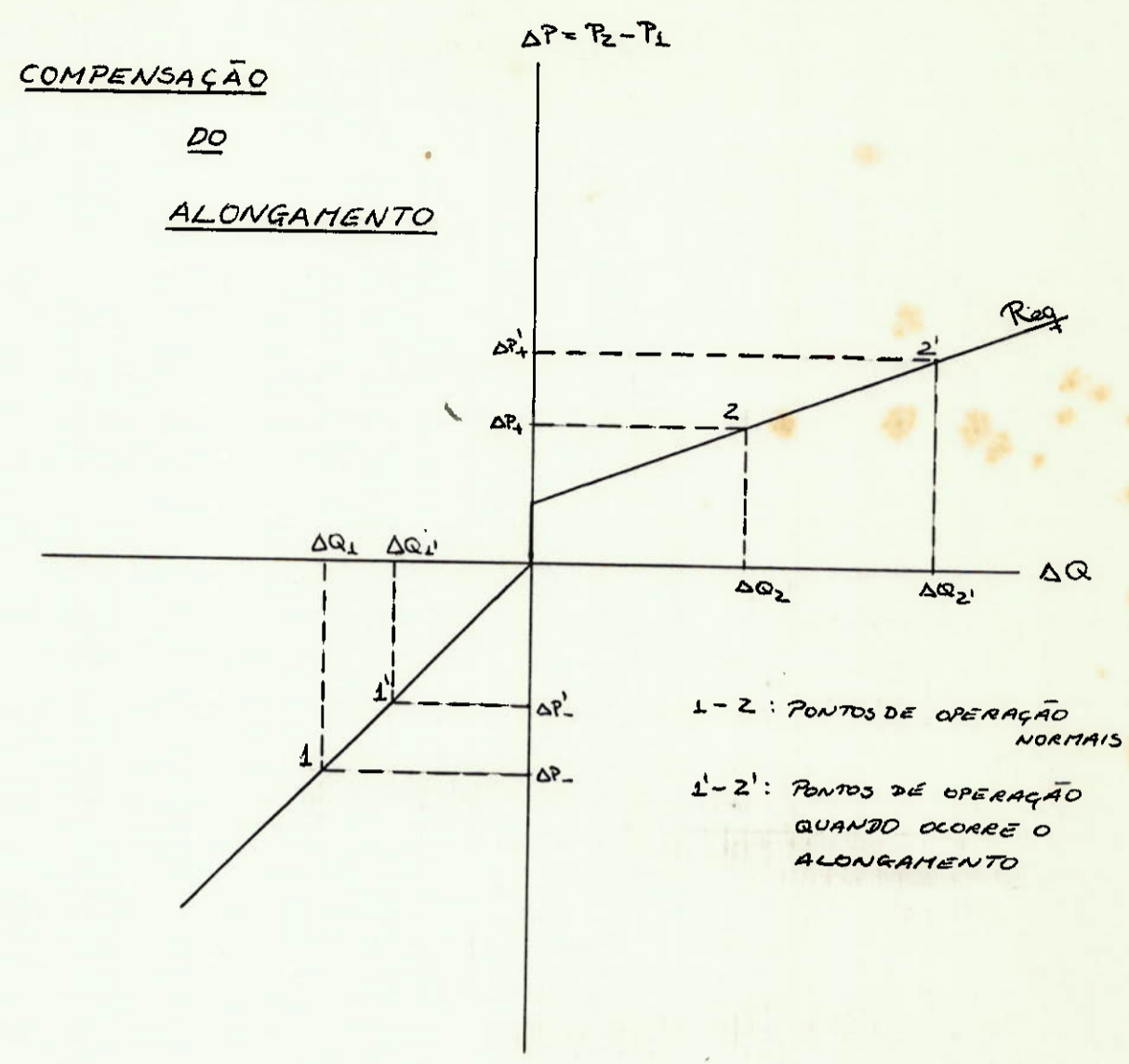
Uma vantagem deste sistema é que ele promove a compensação do alongamento da membrana que ocorre durante o ensaio sem a necessidade de outros sistemas (detecção, regulação,...).

O princípio desta compensação é explicado a seguir e também é mostrado graficamente na figura 32.

O sistema está ajustado numa determinada condição de funcionamento dada pelas posições dos registros R_A e R_B . Nesta condição, tanto quando o êmbolo se move para a esquerda, como para a direita as vazões q_1 e q_2 são iguais.

No momento em que a membrana aumenta de comprimento ela diminui a força que ela exerce sobre o cilindro. Isto significa que o movimento do cilindro para a direita é dificultado (ΔP_+ aumenta) e o movimento para a esquerda é facilitado (ΔP_- diminui).

Portanto, há um aumento de pressão quando a resistência ao escoamento é menor e uma diminuição da pressão quando a resistência é maior. Desta forma, há uma vazão maior da câmara 2 para a câmara 1 do



OPERAÇÃO NORMAL : $\Delta P^+ \neq \Delta P^-$ e $\Delta Q_1 = \Delta Q_2$

OPERAÇÃO COM ALONG. : $\Delta P_1' > \Delta P_1 \Rightarrow \Delta Q_2' > \Delta Q_2$
 $|\Delta P_1'| < |\Delta P_1| \Rightarrow \Delta Q_1' < \Delta Q_1$ } $\Delta Q_2' > \Delta Q_1'$

$\Delta Q_2' > \Delta Q_1'$ SIGNIFICA QUE A CÂMARA 1 AUMENTA DE VOLUME ATÉ QUE AS CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO SEJAM RE-ESTABELECIDAS, ISTO É, ATÉ QUE $\Delta Q_1 = \Delta Q_2$ NOVAMENTE.

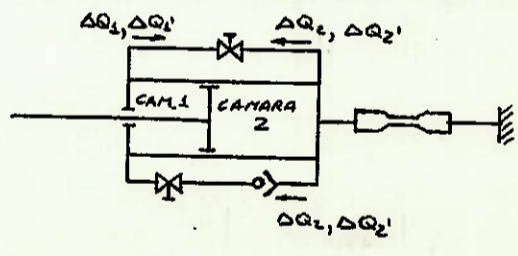


figura 32: Compensação do alongamento

cilindro do que o inverso. Pode-se ver facilmente que a câmara 1 vai aumentando de volume até que as condições de pressão para as quais R_A e R_B haviam sido ajustadas sejam restabelecidas.

g. Conclusões

- 1) A amplitude do cilindro pode ser ajustada através do registro R_A , desde 0 até a amplitude de oscilação do embolo.
- 2) Há uma limitação na frequência de ensaio (frequência de oscilação do embolo), que deve ser compatibilizada com o diâmetro do cilindro, devido à imposição que o escoamento seja laminar para que a oscilação do cilindro seja senoidal.
- 3) O modelo matemático concorda com o comportamento intuitivo esperado para o sistema ($R \neq 0$ então $M=0$: o embolo se move e o cilindro não; $R=$ então $M=1$: o embolo e o cilindro se movem juntos).
- 4) O sistema é capaz de compensar o alongamento sozinho. Isto equivale a dizer que a tensão média na membrana pode ser ajustada através do registro R_B .
- 5) Pela figura 26 nota-se que: para frequências baixas, para a ressonância, e para frequências muito altas a amplitude do cilindro é pouco sensível a variações no amortecimento, isto é, na resistência R_A . O mesmo se observa para valores altos do amortecimento, qualquer que seja a frequência. Estes são fatores críticos na operação do sistema porque implicam numa perda de controle sobre o comportamento do mesmo.
- 6) Através da figura 27 vê-se que para amortecimentos baixos e frequências abaixo de $r=1,5$ a amplitude é bastante sensível a variações na frequência. Isto é significativo porque o motor elétrico não mantém a sua rotação constante e as variações a que submete o sistema podem perturbar seu funcionamento.
- 7) Uma situação satisfatória à operação do sistema é para $r=1,5$, desde que satisfaça o item 2, e para valores baixos do amortecimento. Ou para valores médios da frequência entre 0 e w_n desde que a frequência de ressonância não seja muito baixa, o que faria o ensaio ser muito demorado.
- 8) Vários fatores podem alterar o comportamento descrito pelo modelo utilizado, dentre os quais: resistência fluida não linear, não linearidades introduzidas pela válvula de retenção e pela membrana, aquecimento do fluido interno ao cilindro, ... Estes problemas devem ser avaliados através de ensaios a serem realizados com o protótipo registrando seu comportamento num registrador X-Y por exemplo.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DO EQUIPAMENTO

A seguir faremos uma análise dos parâmetros que afetam o desempenho do equipamento e as limitações impostas a ele pelas exigências do projeto. Podemos classificar estes parâmetros em parâmetros de ajuste e parâmetros de projeto.

Os ajustáveis são aqueles que se pode alterar para se conseguir uma determinada condição de operação do equipamento. São:

- registro R_A : através deste registro varia-se o amortecimento do sistema, e portanto, o fator de amplificação, isto é, da amplitude de oscilação do cilindro. Esta amplitude pode variar desde zero até o valor da amplitude do embolo ("escentricidade"), já que $M \approx 1$. Equivale a ajustar ϵ_a (componente alternada) do ciclo de tensões flutuante.

- registro R_B : com este registro pode-se estabelecer em torno de qual ponto o sistema oscila. Corresponde ao ajuste da tensão média do ciclo de tensão flutuante ϵ_m . Esta tensão é mantida devido à sua capacidade em compensar o alongamento.

- rotação do motor n : deve ser ajustado de forma a permitir a regulação do sistema, através de R_A e R_B , e a realização do ensaio o mais breve possível.

Os parâmetros de projeto são aqueles especificados em função das exigências: massa do cilindro, diâmetro do cilindro, fluido, amplitude do embolo, ... Estes fatores estão analisados mais detidamente abaixo.

1. Parâmetros de projeto

a) Rotação máxima do motor

Para que a oscilação do cilindro seja seno-dal, é necessário que o escoamento seja laminar no interior do cilindro, pois, neste escoamento as perdas são proporcionais à velocidade média do fluido. Isto impõe uma restrição sobre a rotação máxima do motor.

Para avaliar este efeito vamos utilizar o número de Reynolds (Re), apesar de ele não estar definido para as condições do equipamento, já que o escoamento não é em regime permanente.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\gamma} < 2300 \text{ para escoamento laminar}$$

onde V : velocidade média do fluido

D : diâmetro do duto

γ : viscosidade cinemática

Vamos admitir a situação limite em que o embolo e o cilindro tem a mesma velocidade, mas defasadas de 180°.

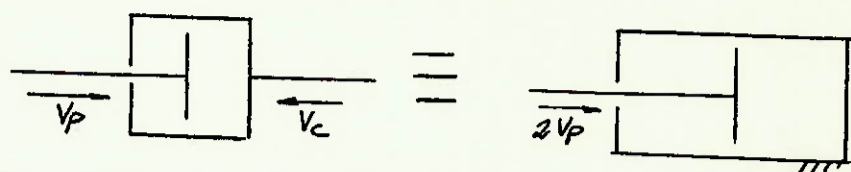


figura 33 : situação de velocidades admitida

Admitiremos também ^{que} a velocidade máxima do fluido no cilindro é igual à velocidade do pistão relativa ao cilindro. Como no escoamento laminar temos:

$$v = \frac{v_{\max}}{2}$$

Temos:

$$v = \frac{2 \cdot v_p}{2} = v_p$$

$$Re = (v_p \cdot D_{\text{cil}}) / \nu = 2300$$

$$v_p = \frac{2300 \cdot \nu}{D_{\text{cil}}}$$

b) Excentricidade Δl :

A excentricidade, isto é, o valor máximo da amplitude de oscilação do embolo é função da tensão máxima que se deseja produzir nas membranas. Como:

Temos

$$\Delta l = \frac{\sigma_{\max} \cdot l_0}{E}$$

Admitindo um valor de tensão alternada máxima igual à metade da tensão de ruptura temos:

pericárdio: $\Delta l = \frac{60 \text{ kgf/cm}^2 \times 6,4 \text{ cm}}{(6,76) \times 10^2} = 0,6 \text{ cm}$

duramáter: $\Delta l = \frac{65 \times 6,4}{(10,26 \times 10^2)} = 0,4 \text{ cm}$

Portanto, vamos adotar uma excentricidade de 0,6 cm, mesmo porque, valores mais altos provocam velocidades muito altas no fluido.

c) Potencia do motor

Vamos utilizar um motor de 1600rpm, já que a utilização de frequencia superiores a esta é improvável.

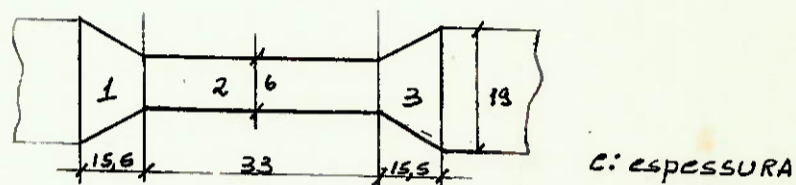
Neste caso temos:

$$N = \frac{M_t \cdot n}{71620} = \frac{(1,17 \pm 64\%) \cdot (1600 \pm 9\%)}{71620} = (0,03 \pm 64\%)$$

Adotaremos um valor mínimo de 0,05CV.

d) Constante de mola da membrana:

Para este cálculo vamos admitir a seguinte geometria para a membrana.



$$k = \frac{EA}{L}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} = \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_1}$$

$$k_1 = E \cdot e \cdot \frac{19+6}{2} \cdot \frac{1}{15,5} = 0,81 \cdot E \cdot e$$

$$k_2 = E \cdot e \cdot b \cdot \frac{1}{33} = 0,18 \cdot E \cdot e$$

$$\frac{1}{k} = \frac{5,5}{E \cdot e} + \frac{2,48}{E \cdot e}$$

$$k = \frac{E \cdot e}{7,98}$$

-duramãter: $k = \frac{(10,26 \pm 57\%) \cdot (0,38 \pm 29\%)}{7,98} = (0,49 \pm 36\%) \text{ kgf/mm}$
 $= (4793 \pm 64\%) \text{ N/m}$

- peric. : $k = \frac{(6,76 \pm 36\%) (0,28 \pm 25\%)}{7,98} = (0,24 \pm 44\%) \text{ kgf/mm} =$
 $= (2327 \pm 94\%) \text{ N/m}$

e) Massa do cilindro:

Pela análise dos gráficos de resposta em frequência (vide fig. 25, 26 e 27) podemos estabelecer as regiões de frequência em que é mais propício se trabalhar. Com estes valores de r , o valor da rotação máx. (a), e o valor de k (d) podemos estabelecer a massa.

$$r = \frac{\omega_{\text{máx}}}{\omega_n}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

f) Fator de amortecimento:

A limitação existente neste fator é em seu valor mínimo. Por isto, deve-se reduzir as perdas nos dutos de retorno A e B ao mínimo. Desta forma podemos permitir um maior campo de utilização do equipamento.

2. Valores dos parâmetros relativamente ao problema.

O transformador de rotação em translação que será utilizado é o do tipo came já mostrado anteriormente.

O motivo de adoção deste sistema é o fato de ele fornecer um deslocamento linear do êmbolo perfeitamente senoidal, elimina os problemas que porventura poderiam ocorrer pela utilização de outro tipo de função. Neste caso, a velocidade máx é dada por:

$$V_p = \omega \cdot \Delta l = \frac{n \pi}{30} \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Podemos substituir este valor na equação do nº de Reynolds:

$$6,28 \cdot 10^{-4} n_{\text{máx}} = 2300 \frac{V}{D_{\text{cil}}}$$

$$n_{\text{m\`a}x} = 3,66 \cdot 10^6 \cdot \frac{\sqrt{V}}{D_{\text{cil}}}$$

Para um valor de $\sqrt{V} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e um valor de $D_{\text{cil}} = 4 \text{ cm}$ temos:

$$n_{\text{m\`a}x} = 1830 \text{ rpm}$$

Pelas fig. 25/26/27 vê-se que as faixas de frequência que oferecem maiores vantagens são:

$$0,3 < r_1 < 0,6$$

$$1,5 < r_2 < 2,5$$

Adotando para $n_{\text{m\`a}x}$ 1600 rpm temos:

$$5333 > n_1 > 2666$$

$$1066 < n_2 < 640$$

Para estes valores tem-se:

duram.: $m_1 = \frac{k}{\omega_{n_1}^2} :$ $0,015 < m_1 < 0,06 \text{ kg}$

$m_2 = \frac{k}{\omega_{n_2}^2} :$ $0,39 < m_2 < 1,1 \text{ kg}$

pericárdio:

$m_1 = \frac{k}{\omega_{n_1}^2} :$ $0,008 < m_1 < 0,03 \text{ kg}$

$m_2 = \frac{k}{\omega_{n_2}^2} :$ $0,19 < m_2 < 0,52 \text{ kg}$

Pode-se ver que para se trabalhar na região de r_1 (m_1) é necessária uma massa muito baixa do cilindro, o que impossibilita sua construção. Um valor da massa, para a região de r_2 , intermediário entre os valores para o pericárdio e a duramãter é 0,46 kg.

3. O protótipo proposto:

Os esforços envolvidos nas peças mecânicas são pequenos em relação à resistência que os materiais empregados possuem. Por essa razão os elementos serão apenas verificados em alguns pontos mais críticos.

3a) Cálculo da massa do conjunto do cilindro.

Este conjunto é constituído por dois materiais:

Alumínio - = 2,4 g/cm³
Nylon - = 1,14 g/cm³

- cilindro (Al) :	58,3 g
- base do cilindro (Ny) :	82,2 g
- topo do cilindro (Ny) :	80,1 g
- suporte das garras (Ny) :	84,3 g
- válvulas (Ny) : peso total estimado	160 g

Portanto, a massa total é de 470g. Acrescentando uma segurança de 5% chegamos a um valor de:

$$m = 0,49 \text{ kg}$$

3b) Frequência natural do conjunto.

Com os valores de k já calculados no item 2d) temos:

duramãter : $\omega_n = 99 \pm 32\% \text{ rad/s} \equiv 944 \pm 32\% \text{ rpm}$

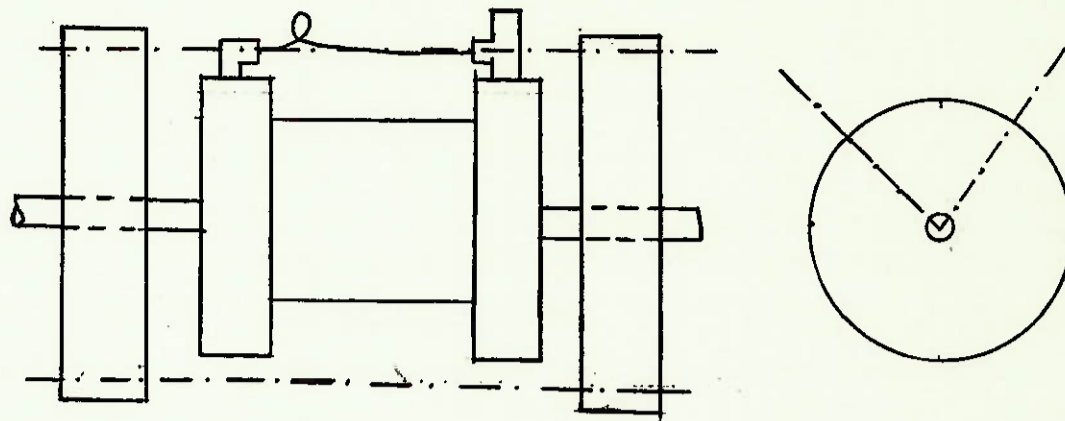
pericárdio: $\omega_n = 69 \pm 22\% \equiv 659 \pm 22\% \text{ rpm}$

Pode-se ver que ω_n varia entre 580 e 1246 rpm. Para uma rotação do motor de 1600 rpm temos r variando entre 2,8 e 1,28, que são valores razoáveis dentro da faixa proposta.

3c) Aspecto construtivo.

Como se vê nos desenhos anexos, no ramo 3, há apenas uma válvula de retenção com pressão de abertura dada pela mola variável. A figura 33 mostra como ela pode substituir a função do registro no ajuste de vazões.

Os condutos por onde passam os fluídos de uma câmara para a outra do cilindro são de nylon flexível, o que permite a montagem como indicado abaixo.



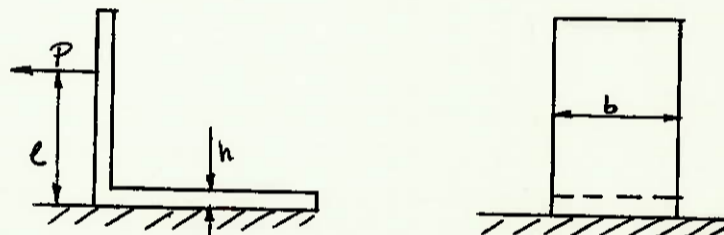
O conjunto todo, inclusive o motor (blindado), devem permanecer inseridos em uma caixa que contém o líquido usado para a conservação da membrana.

Como se pode observar nas equações mostradas anteriormente, a dimensão crítica do sistema é o diâmetro do cilindro. Modificações que possam vir a ser necessárias devem ser baseadas nesta característica.

Cálculo do transdutor.

O transdutor a ser utilizado para registrar o desempenho do sistema será constituído de uma barra engastada sob flexão sobre a qual serão colocados dois extensômetros em braços adjacentes de uma ponte de Wheatstone.

A seguir faremos alguns cálculos relativos ao transdutor.



Supondo o extensômetro colocado a uma distância l , da base, temos para a tensão agindo neste ponto :

$$\sigma = \frac{M}{I_x} \cdot \frac{h}{2} \quad \text{com} \quad I_x = \frac{bh^3}{12} \quad \text{e} \quad M = P \cdot l$$

portanto:

$$\sigma = \frac{6Pl}{bh^2}$$

Vamos admitir os seguintes valores:

$$P = 3 \text{ kgf}$$

$$l = 35 \text{ mm}$$

$$b = 30 \text{ mm}$$

$$h = 2 \text{ mm}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (aço)}$$

Entao, temos:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{E} = 0,0016$$

Considerando $GF = 2$ e $V_0 = 6V$ temos:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot GF \rightarrow \Delta V = V_0 \cdot \frac{\Delta R}{2R} = 9,6 \text{ mV}$$

Este valor de v deve ser amplificado afim de que possa ser utilizado.

A frequência de ressonância do transdutor é dada por:

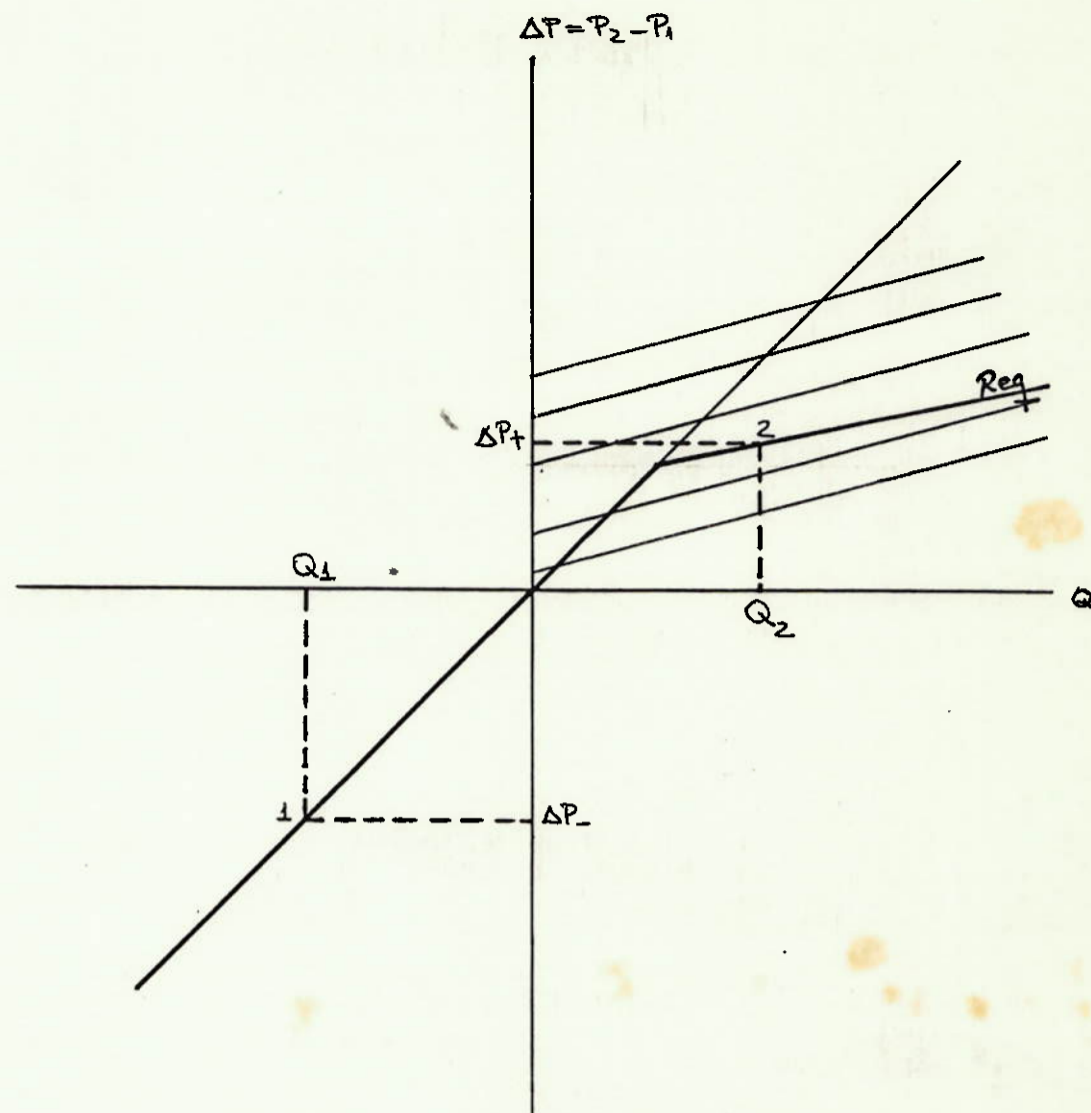
$$\omega = \frac{3,52}{\sqrt{m}} \sqrt{\frac{EI_x}{l^3}}$$

$$m = 0,02 \text{ kg}$$

$$E = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\omega = 2332 \text{ rpm}$$

Como o sistema será utilizado em torno de 1600rpm, este valor é aceitável.



Utilização da variação na pressão necessária para a abertura da válvula de retenção mantendo a mesma perda na linha, para ajustar as vazões: $Q_1 = Q_2$.

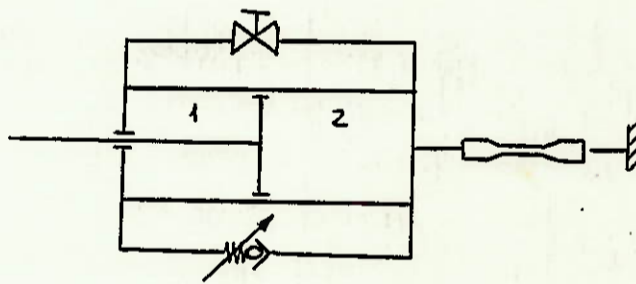


figura 34

APENDICE:

O SISTEMA DE CONTROLE

Como ponto de partida para um sistema de controle para a compensação do alongamento durante o ensaio, vamos usar um controle desenvolvido para um dosador de mistura⁽¹¹⁾ um dia lise peritonal.

A seguir faremos uma análise do sistema do dosador e proporemos as modificações necessárias, além de alguns aperfeiçoamentos para melhorar as respostas do sistema.

a) SISTEMA DOSADOR DE MISTURA

O esquema do dosador de mistura é mostrado na figura 35. O objetivo deste sistema é produzir uma solução de concentração controlada através da mistura entre água e uma solução muito concentrada ("concentrado"). A vazão de água é dada ao desnível entre o reservatório de água e o da solução, enquanto que a do concentrado é controlada por uma bomba de roletes. O transdutor de concentração utilizado é uma célula de condutividade, constituída por dois eletrodos imersos na solução, entre os quais faz-se aplicar uma tensão alternada. A corrente que circula entre estes eletrodos é proporcional à resistência elétrica oferecida pela solução, que por sua vez é proporcional à concentração de soluto. O condutivímetro converte esta resistência em tensão que serve como base para o sistema de controle agir sobre o motor da bomba.

O esquema elétrico do condutivímetro pode ser visto na figura 36. É constituído pelos seguintes blocos:

- bloco amplificador: amplifica o sinal alternado proveniente da célula de condutividade.
- bloco retificador: retifica o sinal alternado, isto é, torna-o pulsante; é utilizado um retificador implementado com amplificadores operacionais, porque os níveis de tensão envolvidos são muito baixos.

O módulo de controle está na figura 37 e é constituído pelos seguintes blocos:

- bloco somador: soma o sinal de referência (nível DC) com o sinal proveniente do condutivímetro; como o sinal do condutivímetro é pulsante, o par R1 C1 tira o valor médio da onda antes de entrar no somador propriamente dito.

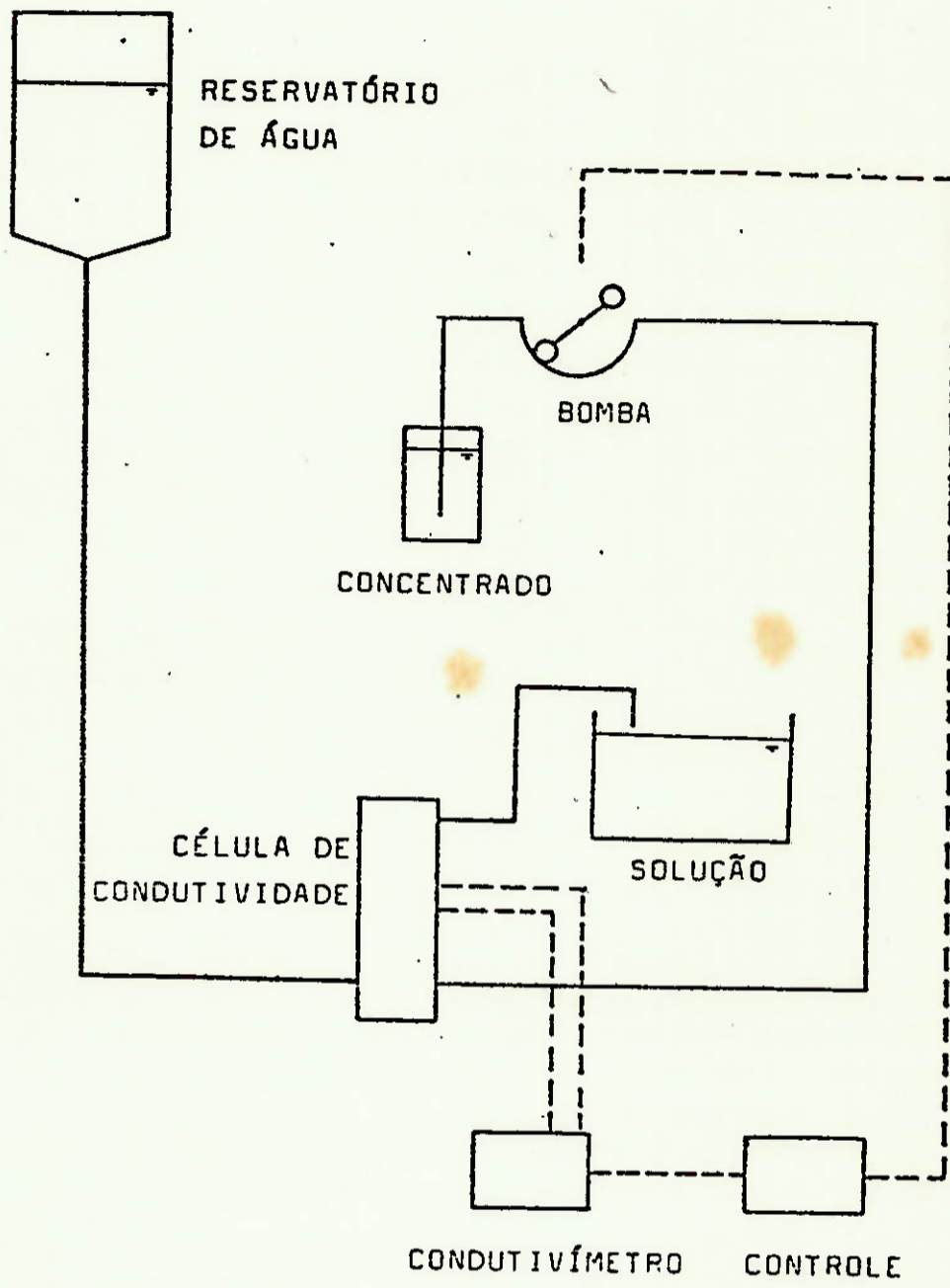


fig. 35 : ESQUEMA DO PROTÓTIPO⁽¹¹⁾

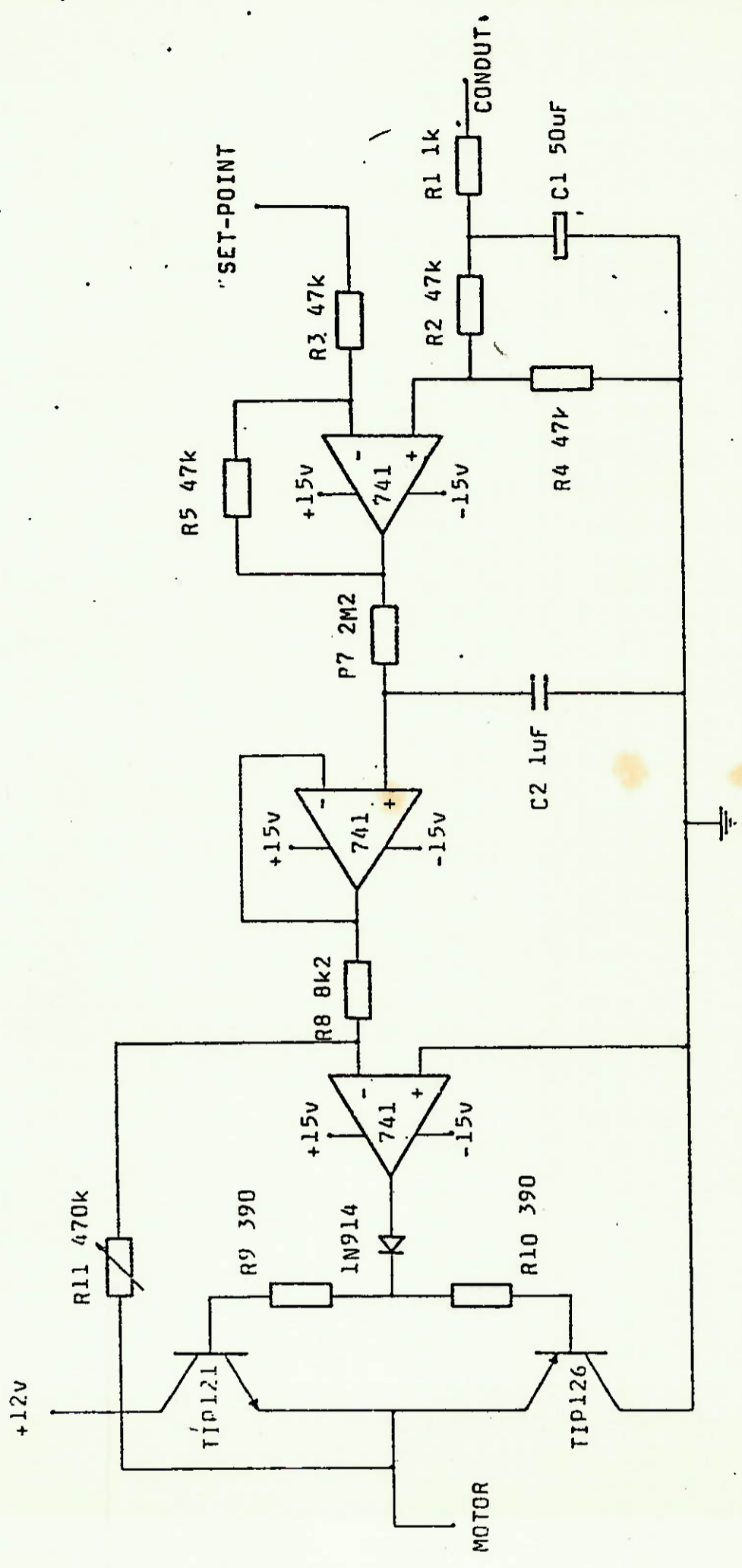


fig 37 : ESQUEMA DO CIRCUITO DE REALIMENTAÇÃO (11)

-Bloco de filtro:na verdade é um integrador;o amplificador operacional montado em seguidor de tensão serve para desacoplar o integrador do amplificador de potência,i.é, evita que o capacitor C2 se descarregue.

-bloco amplificador:é um estágio de potência que permite acionar o motor da bomba (que no caso é um motor de parabrisa de caminhão de 12 V de alimentação)

Ensaio feitos (14) com o condutivímetro e com o motor a fim de se levantar as características destes elementos estão nas figuras 38 e 39 .

Pode-se colocar este sistema em termos de diagrama de blocos como mostrado na fig .A entrada é em tensão elétrica e a saída em concentração.O motor,a bomba,o redutor e amplificados podem ser reduzidos a um ganho no ramo direto chamado de K . A vazão de água A que é misturada ao concentrado para fornecer a concentração C de saída é equivalente a um ganho $1/A$,já que

$$C = \frac{\text{VAZAO DE CONCENTRADO}}{\text{VAZAO DE ÁGUA}}$$

O par R1 C1 colocado no ramo de realimentação para tirar o valor médio,na verdade funciona como um diferenciador.

Um exemplo do desempenho deste sistema é mostrado na fig 40 .A curva superior é a tensão na entrada do condutivímetro (portanto concentração da solução)e a inferior é a tensão aplicada ao motor.Até o ponto C,a vazão de água foi bloqueada(a tensão no motor é zero e a concentração é constante)e a partir desse ponto ela é liberada novamente.Pode-se notar que quando cai a concentração há um pico de tensão no motor.

b) MODIFICAÇÕES NO SISTEMA ORIGINAL

TRANSDUTOR :

No nosso caso,o que se deseja medir não é a concentração mas a força aplicada na membrana.Portanto,a célula de condutividade será substituída por uma célula de carga,constituída de u-

TLV: REG LINEAL:COOIGO 1 F
 ORIGEN/DF SS MS
 TOTAL 6 0.0 0.0 515.6
 REG 1 0.0 0.0
 RESID 5 0.0 0.0
 R CUADRADA = 0.999

YHAT = -0.003 + 0.009 X

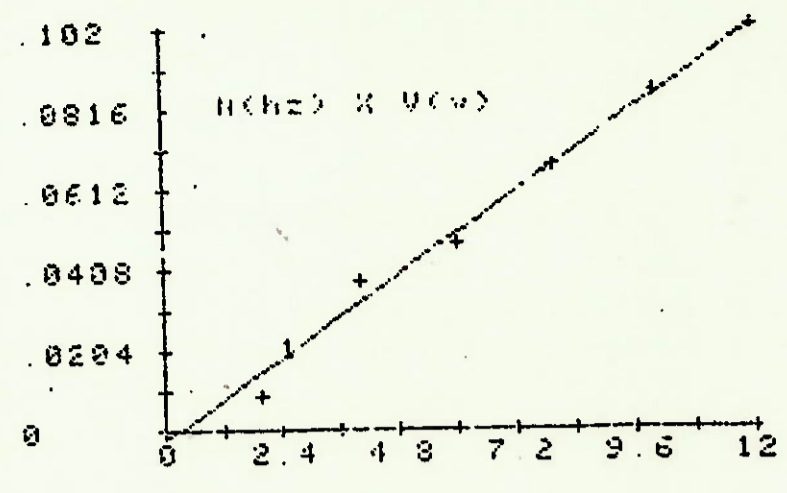


fig38: Curva Rotación x Tensão (motor)⁽¹¹⁾

Ecuación: $N(\text{Hz}) = 0.009 V(\text{volts})$

TLV: REG LINEAL:COOIGO 1 F
 ORIGEN/DF SS MS
 TOTAL 5 61428.4 61407.3 999.9
 REG 4 61407.3 61407.3 999.9
 RESID 1 21.1 5.3
 R CUADRADA = 1.000

YHAT = 77.967 + 11196.264 X

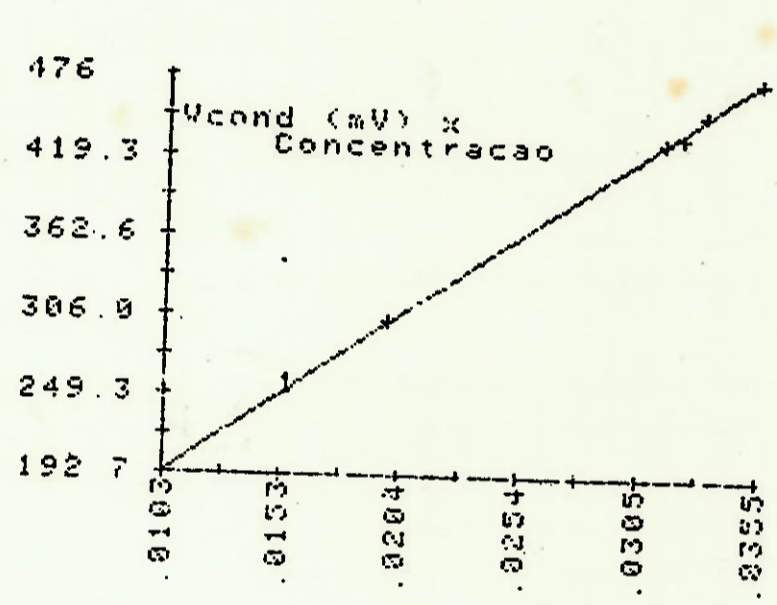


fig39: Curva Tensão de saída do Condutivímetro x Concentração⁽¹¹⁾

Ecuación: $V_{\text{cond}}(\text{mV}) = 77.967 + 11196.264 C$

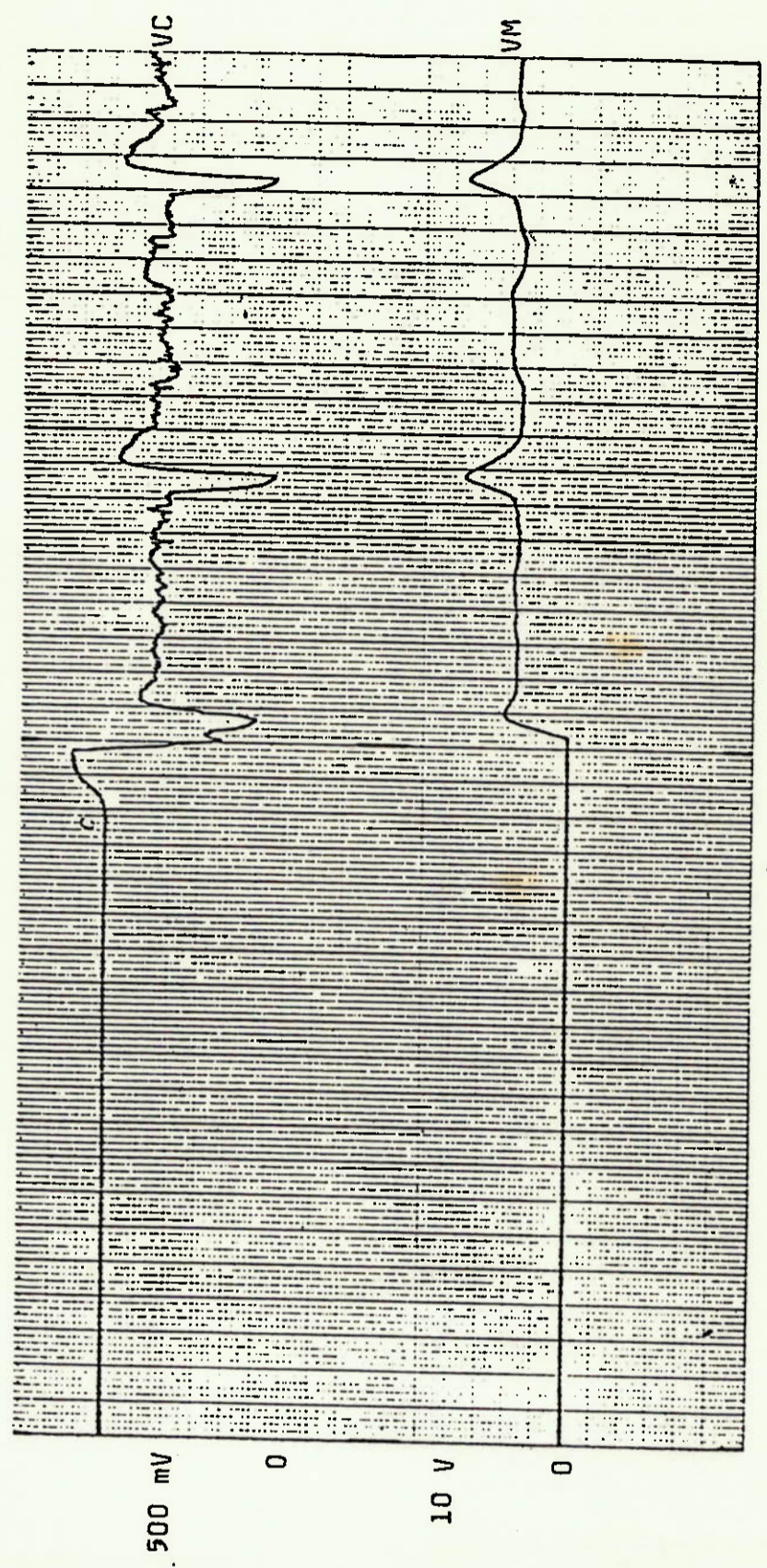


fig. 40: 7º ENSAIO : Abertura da entrada do Condutivímetro (11)

ma chapa engastada na qual estão colados dois "straingages" (fig 41).

Os "straingages" fazem parte de uma ponte de Weatsone, em braços adjacentes como mostra a fig. 42.

A ponte deve ser montada com um amplificador de tal forma que a tensão e_0 esteja dentro da faixa de tensões da saída do condutivímetro para que sejam compatíveis, isto é, de 100 a 500 mV. A tensão de saída e_0 é dada por:

$$e_0 = \frac{R}{10R_0} \cdot \Delta V = \frac{R}{10R_0} \cdot V \cdot \frac{\Delta R_0}{2R_0} = \frac{R \cdot V}{10R_0} \cdot GF \cdot \varepsilon$$

CONDUTIVÍMETRO :

O condutivímetro pode ser eliminado, ligando-se a saída do amplificador da ponte na entrada do somador do módulo de controle.

CONTROLE :

O bloco de controle pode permanecer como está no sistema original.

c) ANÁLISE QUALITATIVA

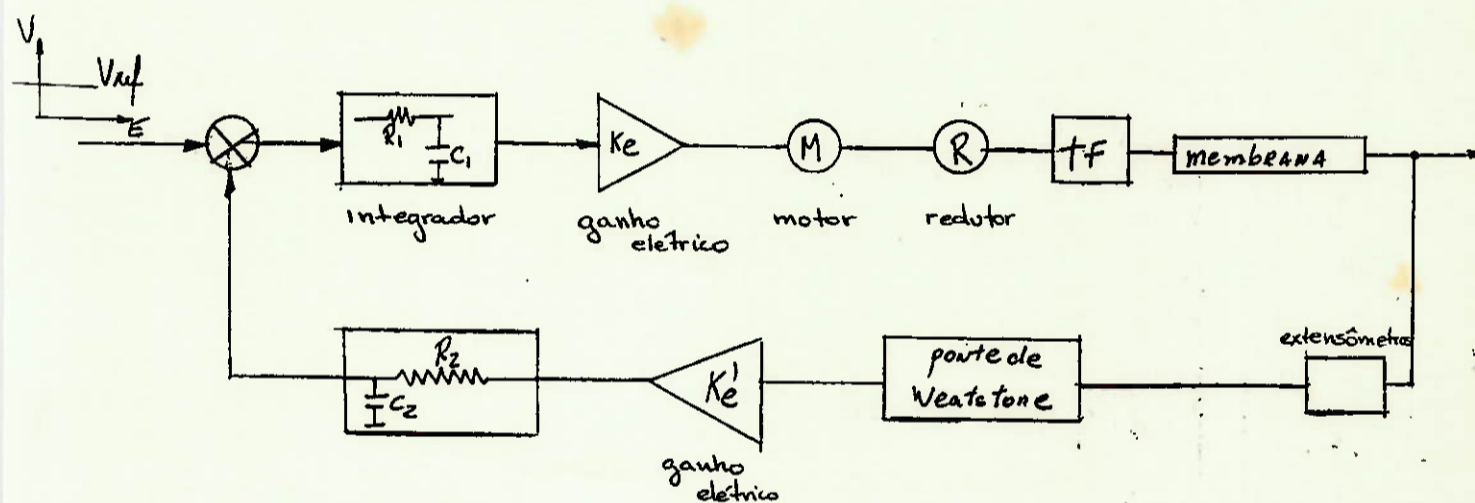
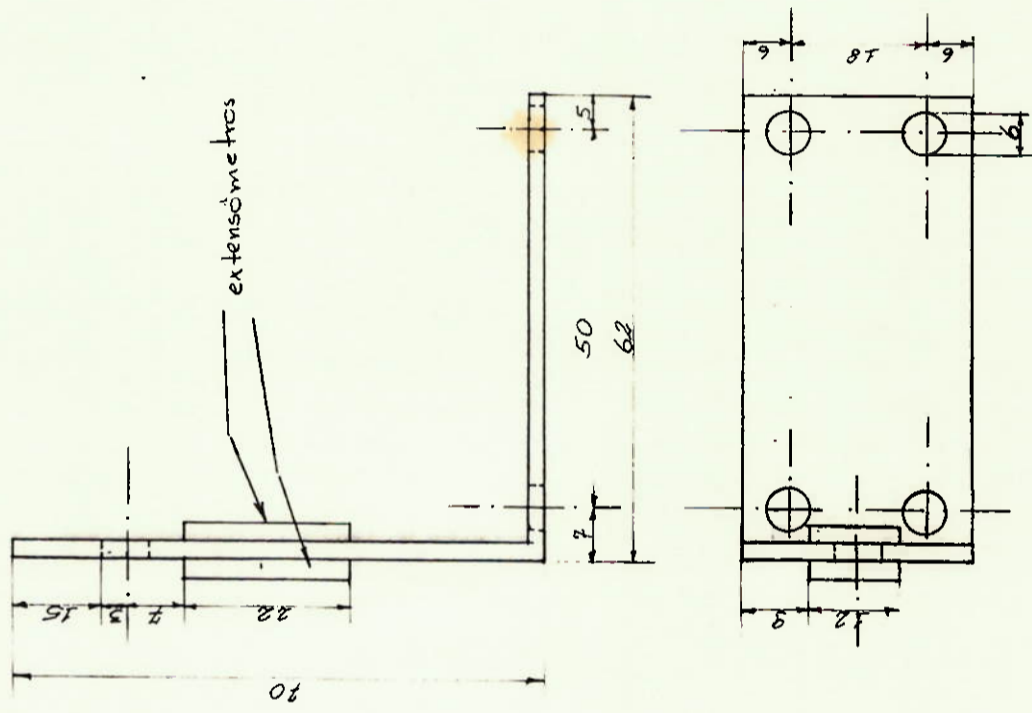
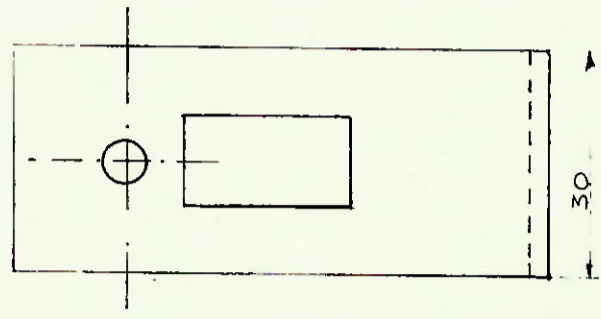


fig 43: diagrama de blocos do sistema com controle.

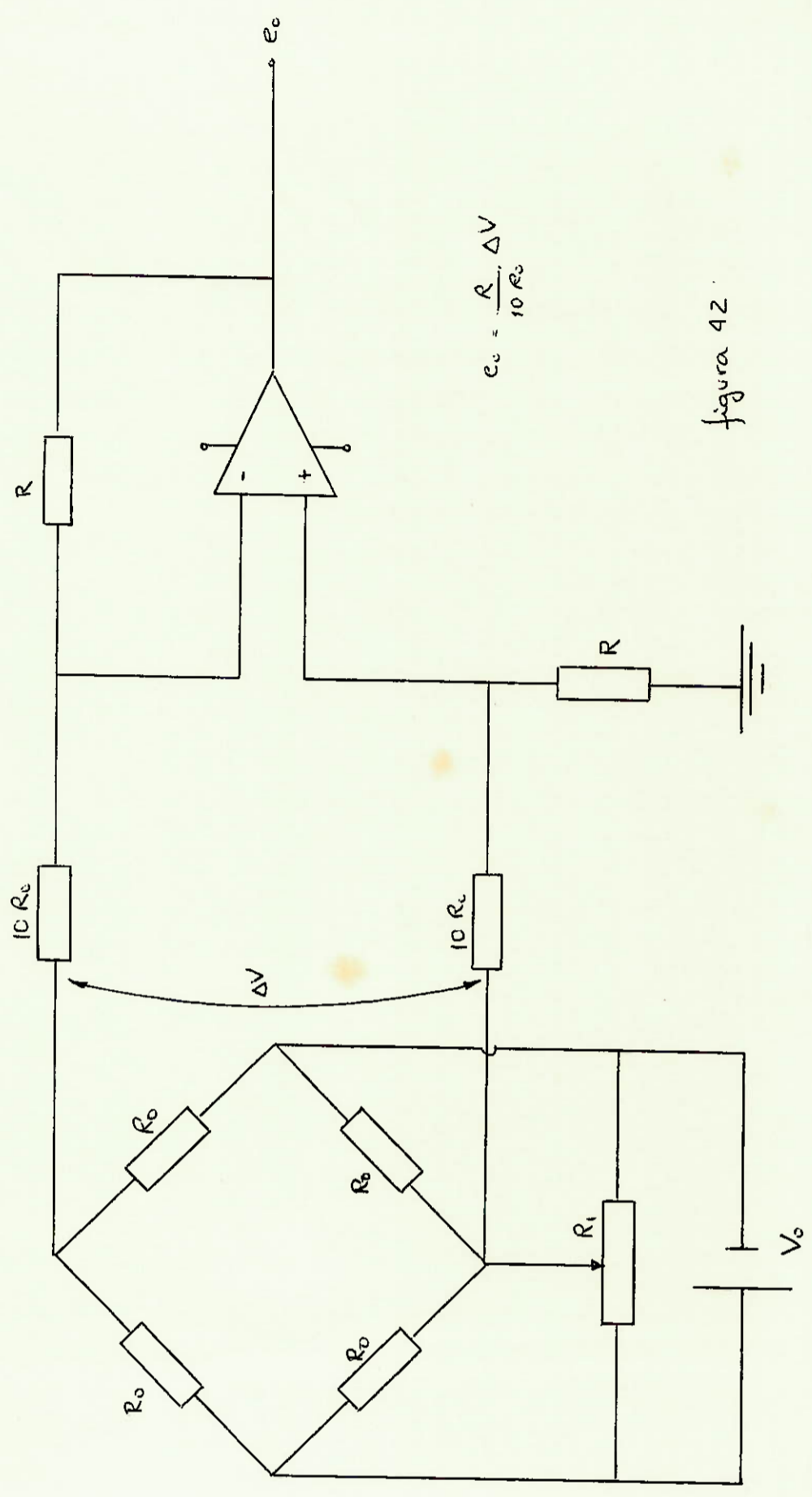
Os ensaios feitos com o motor mostraram que a constante de tempo dele é pequena podendo ser desprezada. Segundo Ref(8), temos para o motor a seguinte função de transferência:

$$\frac{\theta}{E_c}(s) = \frac{K_m}{s(T_m \cdot s + 1)}$$



EJERCICIO DE FABRICACIÓN DE INSTRUMENTOS	
1000	TRANSDUCTOR
11	ALUMNO: FERRER, J. J.

fig 41 Transductor



$$e_o = \frac{R}{10 R_0} \Delta V$$

figura 42

onde E_c : tensão aplicada (entrada)
 θ : posição angular do eixo (saída)
 K_m : constante de ganho
 T_m : constante de tempo

Fazendo $T_m = 0$ temos:

$$\frac{\theta}{E_c}(s) = \frac{K_m}{s}$$

A equação acima é válida quando se está considerando a posição angular do eixo em função da tensão aplicada. No caso do sistema em que está contido o motor, apesar de na realidade controlar uma posição linear, há um controle na sua rotação, isto é, em $\dot{\theta}$, que no plano complexo equivale a multiplicar por $\frac{1}{s}$:

$$\theta(s) = \frac{K_m}{s} \cdot E_c(s)$$

$$\dot{\theta}(s) = \frac{s \cdot K_m}{s} \cdot E_c(s)$$

Dessa forma, o motor se reduz a um ganho K_m . Os outros elementos também podem ser considerados como constantes, o que permite escrever:

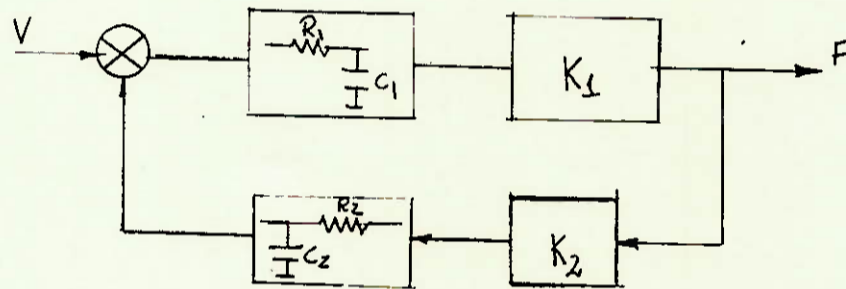
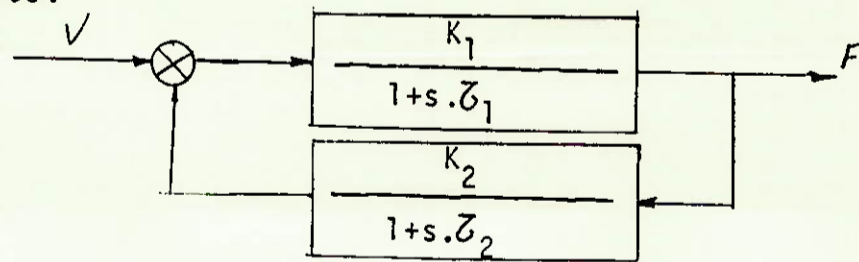


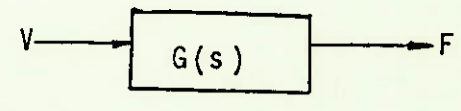
fig 44: diagrama de blocos reduzido.

Os filtros $R_1 C_1$ e $R_2 C_2$ podem ser escritos como:

$$\frac{V_s(s)}{V_e} = \frac{1}{1 + s R_i C_i}$$

Portanto:





$$G(s) = \frac{K_1 / (1 + s\tau_1)}{1 + \frac{K_1 \cdot K_2}{1 + s\tau_1} \cdot \frac{1}{1 + s\tau_2}}$$

$$G(s) = \frac{K_1(1 + \tau_2 s)}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2) + K_1 K_2}$$

onde $K_1 = K_{elet} \times K_{motor} \times K_{redutor} \times K_{tf} \times K_{memb}$
 $K_2 = K_{straingage} \times K_{ponte} \times K_{elétrico}$
 $\tau_1 = R_1 \times C_1 = 2,2 \text{ s}$
 $\tau_2 = R_2 \times C_2 = 0,05 \text{ s}$

A seguir vamos traçar o diagrama de polos e zeros para $G(s)$.

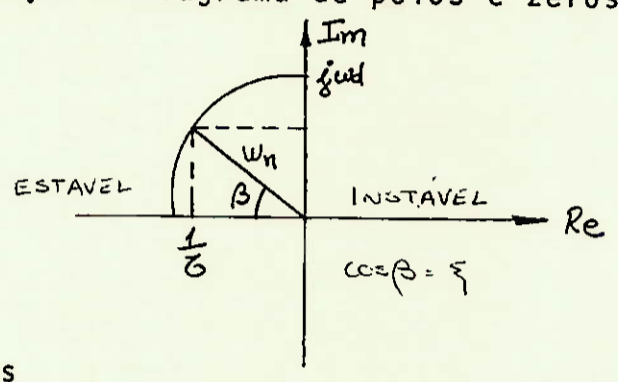
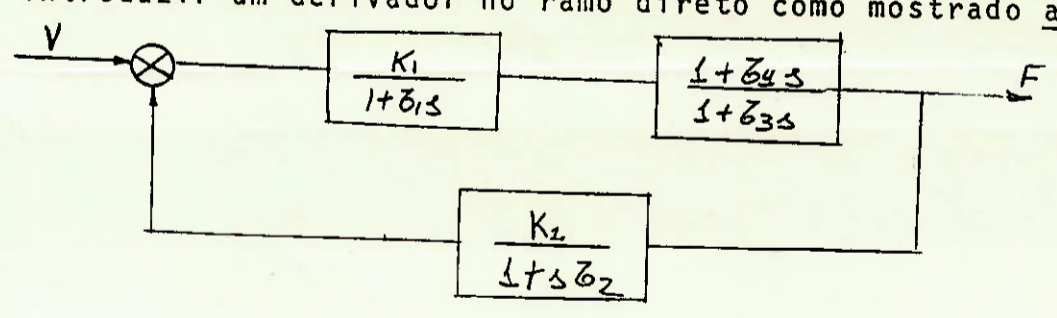


fig45: Diagrama de polos e zeros
 ω_n : frequência natural
 ω_d : frequência amortecida

Para: $(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2) + K_1 K_2 = 0$
 $(\tau_1 \tau_2) s^2 + (\tau_1 + \tau_2) s + K_1 K_2 + 1 = 0$

$$0,11 s^2 + 2,205 s + K_1 K_2 + 1 = 0$$

O diagrama relativo à equação acima está na figura, onde pode-se ver que à medida que aumenta o ganho $k' = K_1 K_2 + 1$ o amortecimento diminui (β aumenta). Isto se traduz num aumento das oscilações da resposta do sistema. Um modo de se melhorar esta condição é introduzir um derivador no ramo direto como mostrado a baixo:



Neste caso:

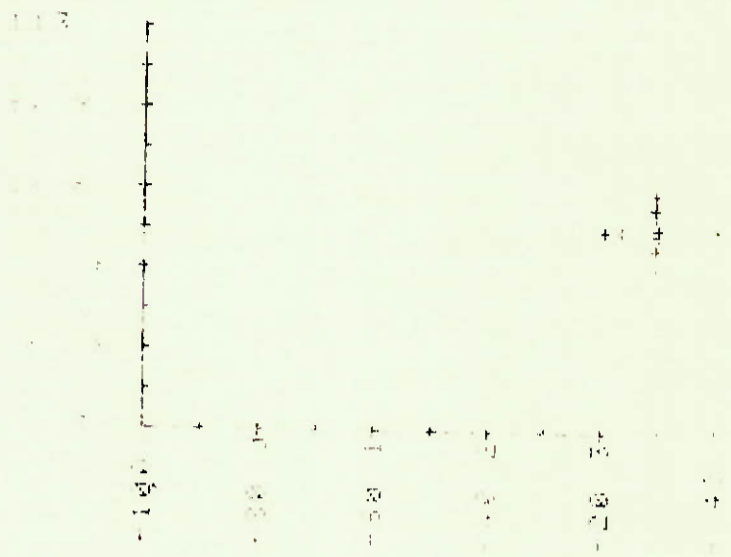
$$G'(s) = \frac{K_1 (1 + \tau_4 s)(1 + \tau_2 s)}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)(1 + \tau_3 s) + K_1 K_2 (1 + \tau_4 s)}$$

Cuja equação dos polos é:

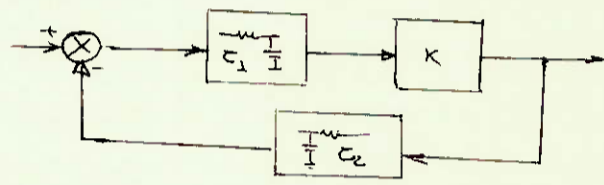
$$(\tau_1 \tau_2 \tau_3) s^3 + (\tau_1 \tau_2 + \tau_1 \tau_3 + \tau_2 \tau_3) s^2 + (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + K_1 K_2 \tau_4) s + K_1 K_2 + 1 = 0$$

Estes diagramas para alguns valores de $K_1 K_2$ estão anexos

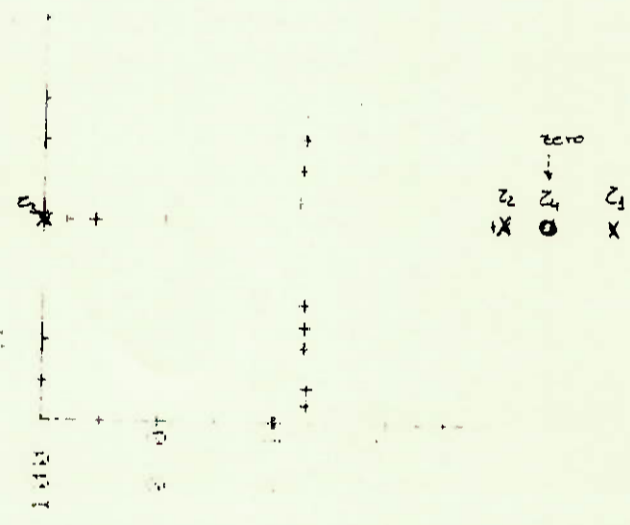
Nota-se que colocando τ_3 e τ_4 à esquerda de τ_2 consegue-se inclinar a curva, o que implica num aumento do amortecimento (diminuição das oscilações na saída). Quanto mais à esquerda, coloca-se τ_3 , mais se inclina a curva, mas também facilita a captação de ruídos espúrios (aumenta a banda de frequências). Alguns valores encontrados razoáveis são $\tau_3 = 0,02$ e $\tau_4 = 0,04$. Esta é uma modificação que poderia ser implementada na malha.



1. Sistema original

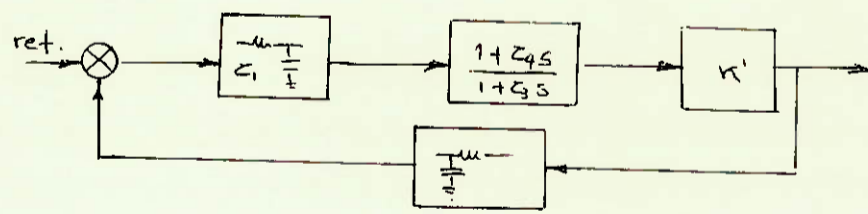


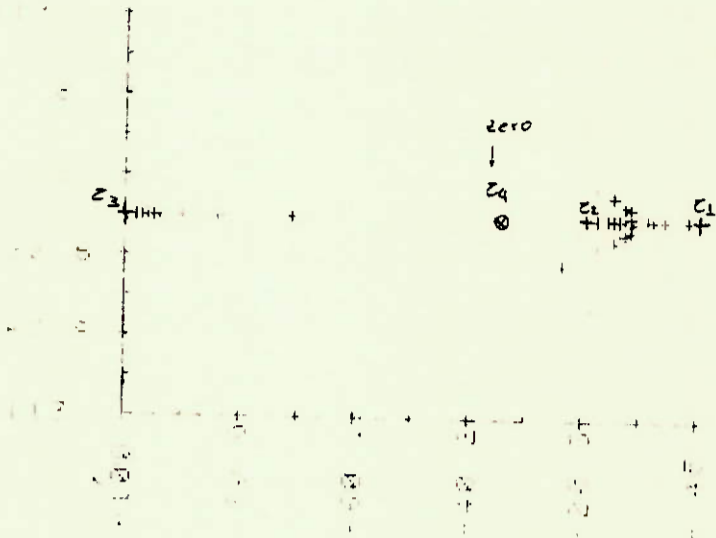
com $\zeta_1 = 2,2$
 $\zeta_2 = 0,05$



2. Introdução de um derivador.

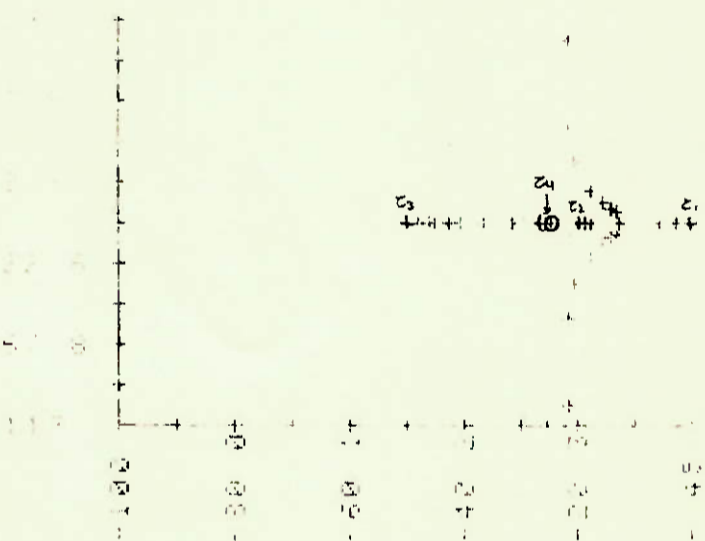
com $\zeta_1 = 2,2$
 $\zeta_2 = 0,05$
 $\zeta_3 = 0,01$
 $\zeta_4 = 0,08$





constantes: $z_1 = 2,2$
 $z_2 = 0,05$
 $z_3 = 0,01$
 $z_4 = 0,03$

- o zero em z_1 foi trazido para a esquerda do polo z_2 para provocar a inclinação da curva



constantes:
 $z_1 = 4,2$
 $z_2 = 0,06$
 $z_3 = 0,02$
 $z_4 = 0,04$
 $0 < k' < 600$

z_3 : trazido para a direita para diminuir a banda (freq. de corte) e assim evitar efeitos de ruídos espúrios

BIBLIOGRAFIA

1. Suzuki, T. - "Medidas de esforços dinamicos na valvula de duramã-
ter em condições fisiológicas". Arq. Bras. de Cardiol. (Supl.2)
31:275, 1978
2. Dieter, G. - "Metalurgia Mecânica": Guanabara Dois, 1981
3. Van Krevelen, D.W. - "Properties of Polymer Correlations" with
chemical structure". Elsevier Publishing Company-New York, 1972
4. Baer, E. - "Engineering Design for plastics". Robert E. Krieger
Publishing Company-Huntington, New York, 1975
5. Carvalho, G. "Estudo comparativo das propriedades mecânicas da
duramater humana e do pericárdio bovino conservados em glicerina"
Anais Congresso de Engenharia
6. Alfrey, T.; Curnee, E.F. - "Polímeros Orgânicos". Ed. Edgard Blücher
Ltda, 1971
7. Garcia, O. - "Motores de Combustão interna- Motores de dois tempos"
Apostila Departamento de Engenharia Mecânica da USP
8. Ogata, -
9. Doebelin - "Measurements systems - application and design"
10. Castrucci, P.E.L.; Batista, L. - "Controle linear-método básico"
Ed. Edgard Blücher Ltda, 1980
11. Nakano, D.R. - "Dosador de Mistura". Depto de Engenharia Mecânica
da USP.
12. Feodosiev, V.I. - "Resistencia de Materiales": Editorial MIR,
Moscu, 1980

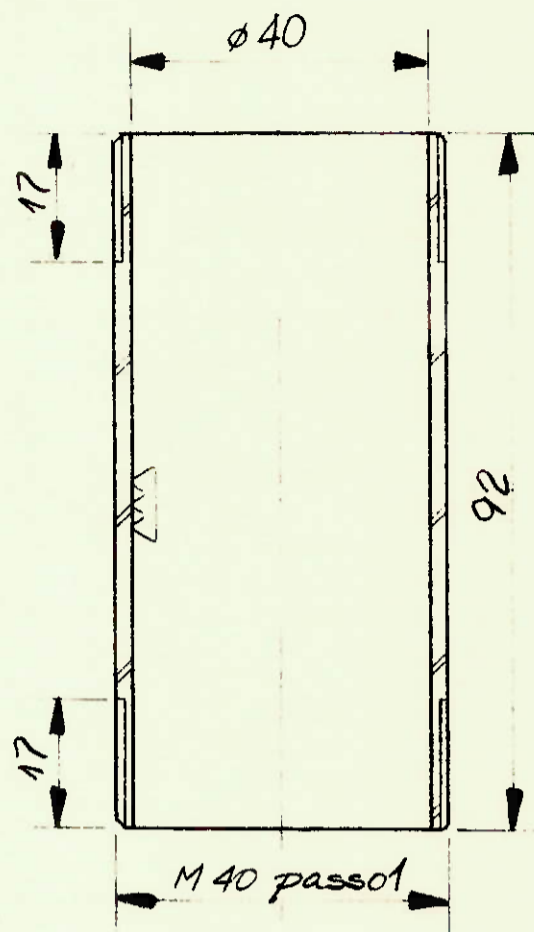
6	PORCAS P/ FIXAÇÃO	22	M 10 DIN 934	-
6	PARAFUSO FIXAÇÃO	21	M 10 X 50 DIN 558	-
1	COTOVELHO	20	Alumínio	
1	PARAFUSO DA VALVULA	19	Inox 304	
1	CORPO DA VALVULA	18	Alumínio	
1	AGULHA DO REGISTRO	17	Inox 304	
1	REGISTRO	16	Alumínio	-
1	CORPO DO REGISTRO	15	Alumínio	
1	PARAFUSO BORBOLETA	14	Latao	-
2	GARRAS DA MEMBRANA	12/13	Acrílico	14
1	SUPORTE DAS GARRAS	11	Nylon	13
2	APOIO DO CILINDRO	10	Inox 304	12
2	GARRA DO CAME	9	Inox 304	11
2	COLUNA PRINCIPAL	8	Inox 304	10
1	CAME	7	Inox 304	9
2	GARRA	6	Inox 304	8
1	TOPO DO CILINDRO	5	Nylon	7
1	BASE DO CILINDRO	4	Nylon	6
1	HASTE DO PISTÃO	3	Inox 304	5
1	PISTÃO	2	Alumínio	4
1	CILINDRO	1	Alumínio	3
Quant	Denominação	Peça	Material	Folha Nº

EQUIP DE ENSAIO DE FADIGA DE MEMBRANAS
LISTA DE PEÇAS

EPUSP

ALEXANDRE FRASCARI 8108470 Nº 2

1



material - Alumínio

EQUIP. DE ENSAIO DE FADIGA

CILINDRO

EPUSP

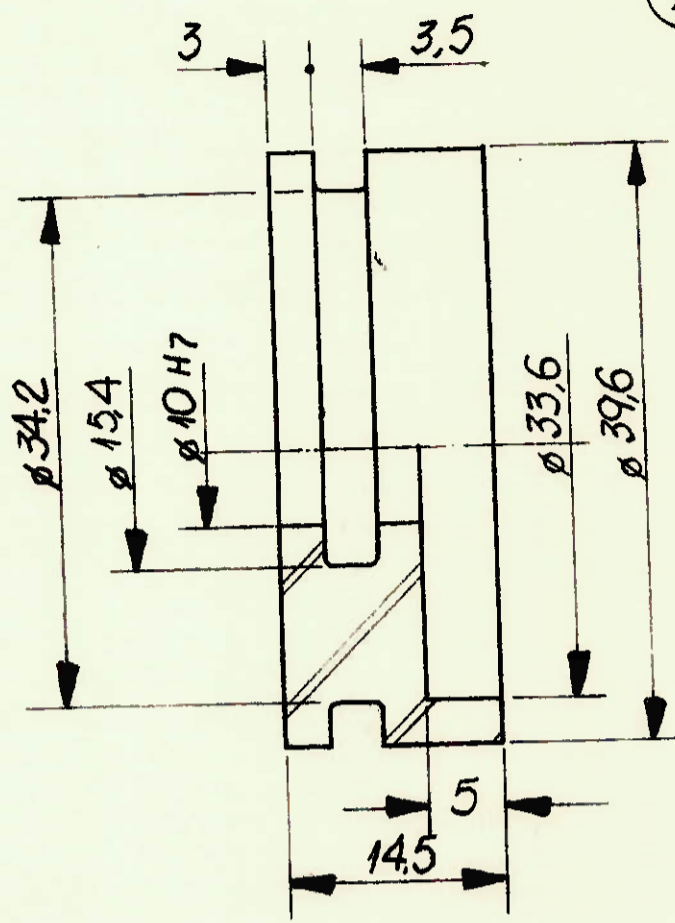
ALEXANDRE

DEZ 83

1:1

FRASCARI B108470 N° 3

2

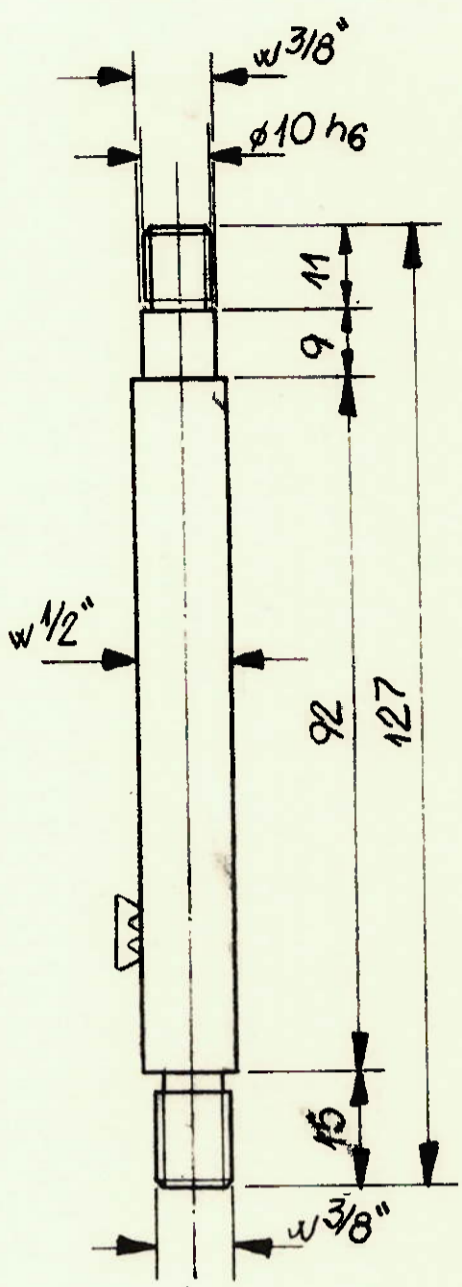


Raios = 0.5 mm

material Alumínio

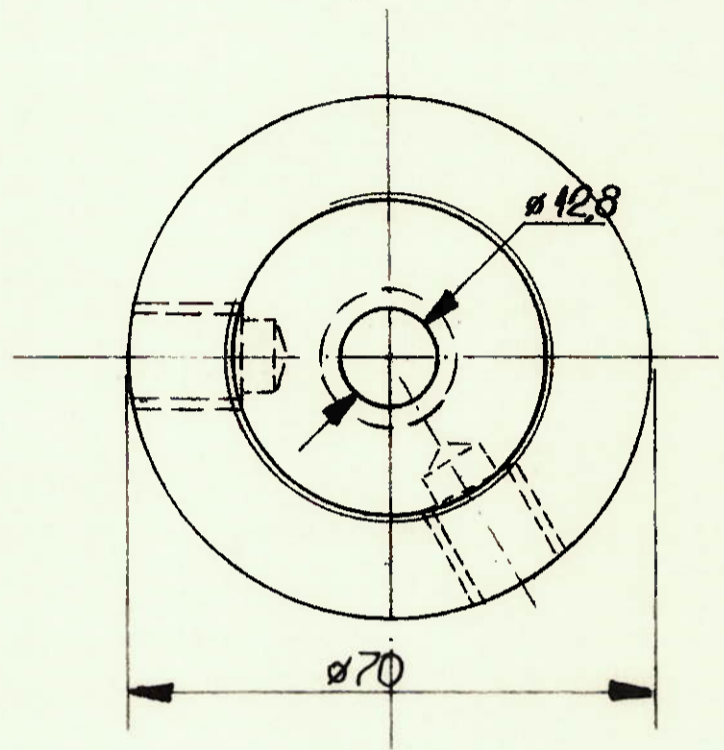
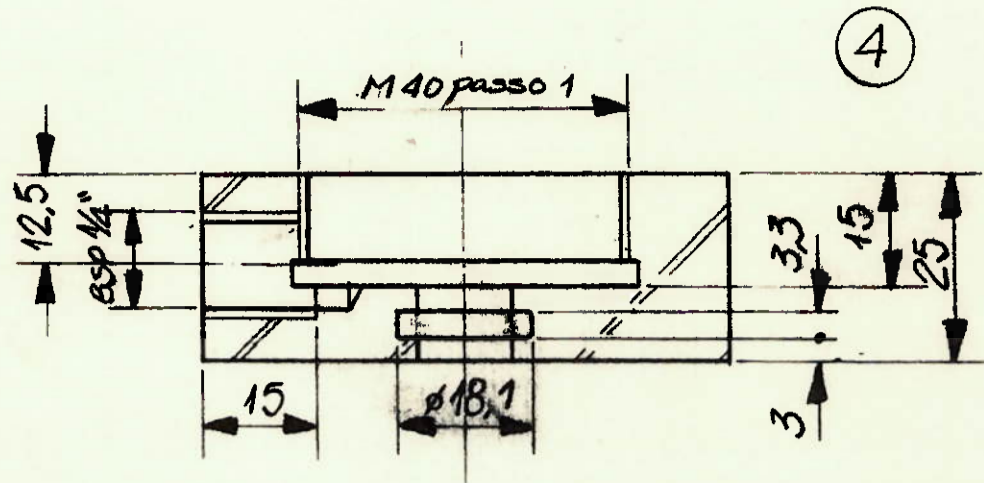
EQUIP. DE ENSAIO DE FADIGA		
PISTÃO		
EPUSP	ALEXANDRE	DEZ 83
1:1	FRASCARI 8108470	Nº 4

3



material Inox 304

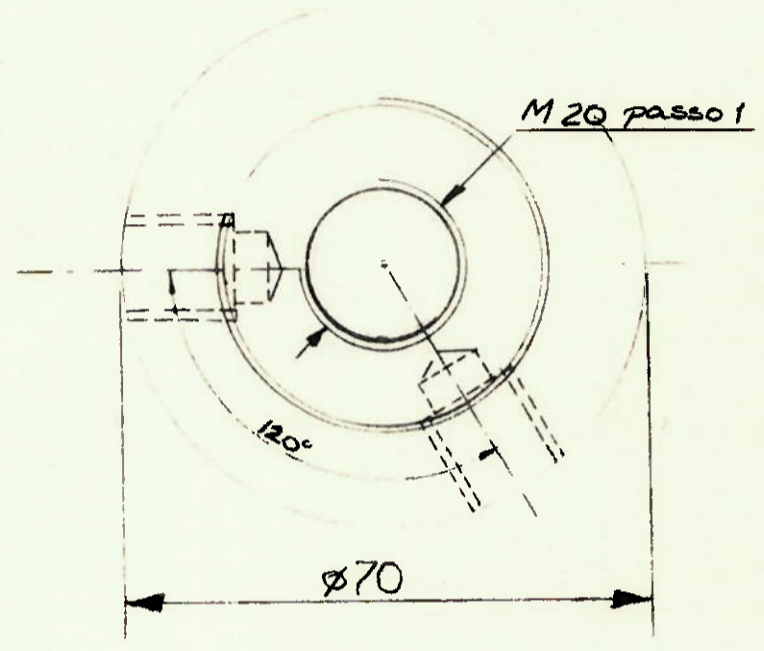
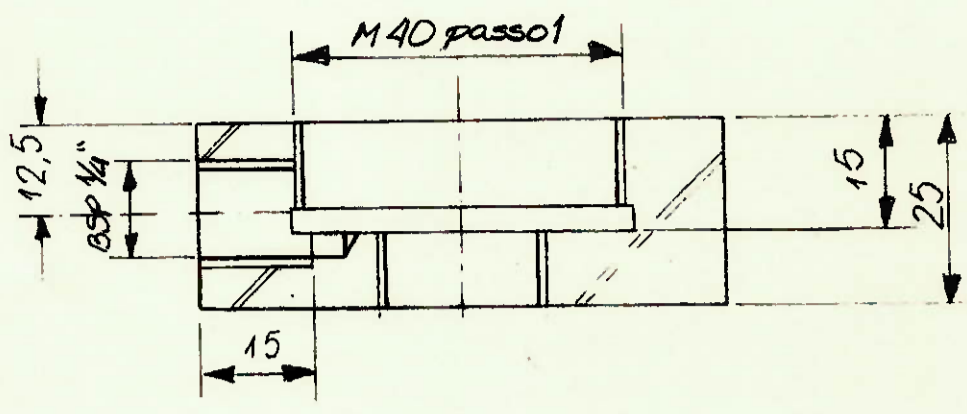
EQUIP. ENSAIO DE FADIGA		
HASTE DO PISTÃO		
EPUSP	ALEXANDRE	DEZ 83
1:1	FRASCARI 8108470	Nº 5



material - Nylon

EQUIP DE ENSAIO DE FADIGA		
BASE DO CILINDRO		
EPUSA	ALEXANDRE	DEZ 83
1:1	FRASCARI 8108970	NP 6

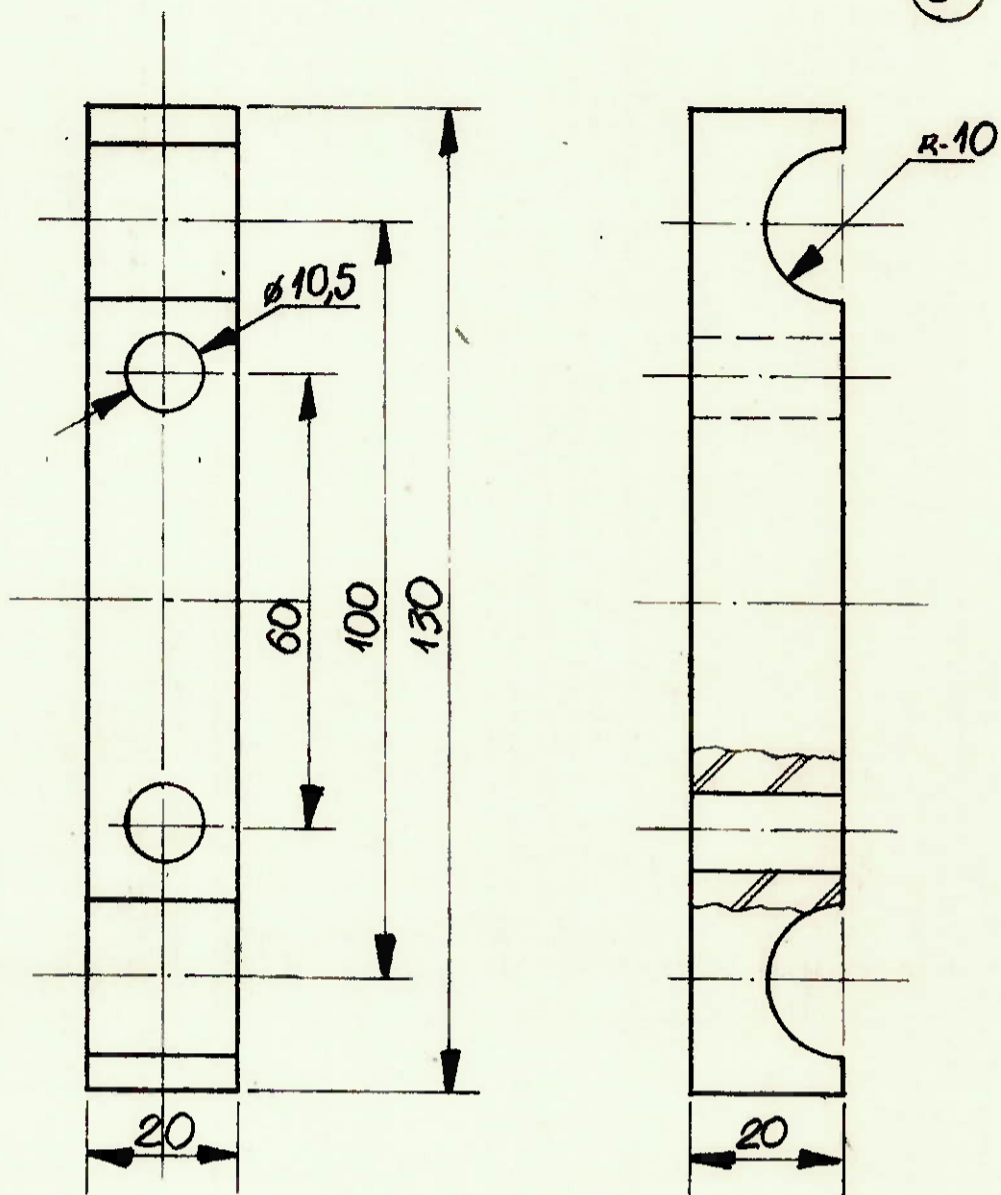
5



material Nylon

EQUIP. DE ENSAIO DE FADIGA		
TOPO DO CILINDRO		
EPUSP	ALEXANDRE	DEZ 83
1:1	FRASCARI 8108470	N.º 7

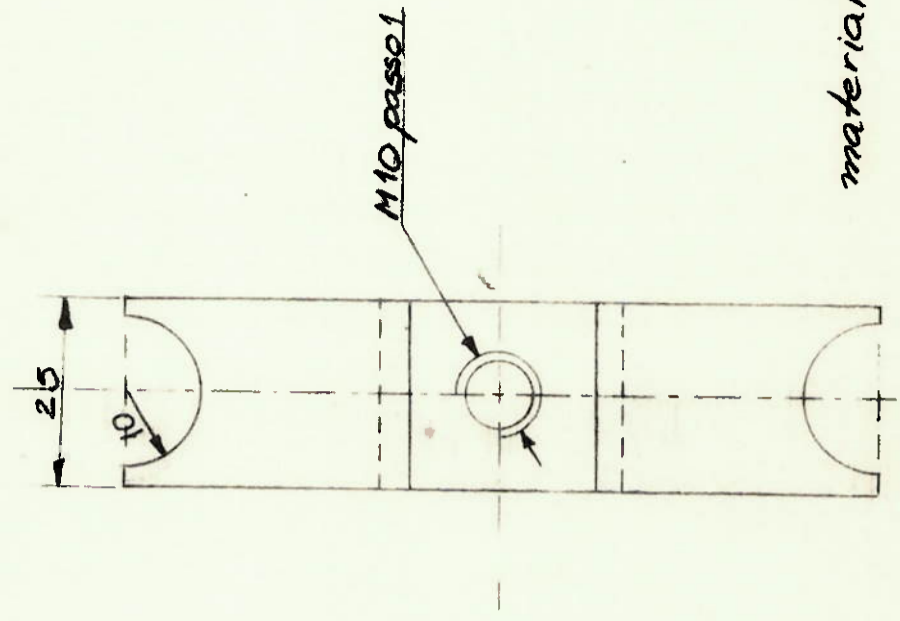
6



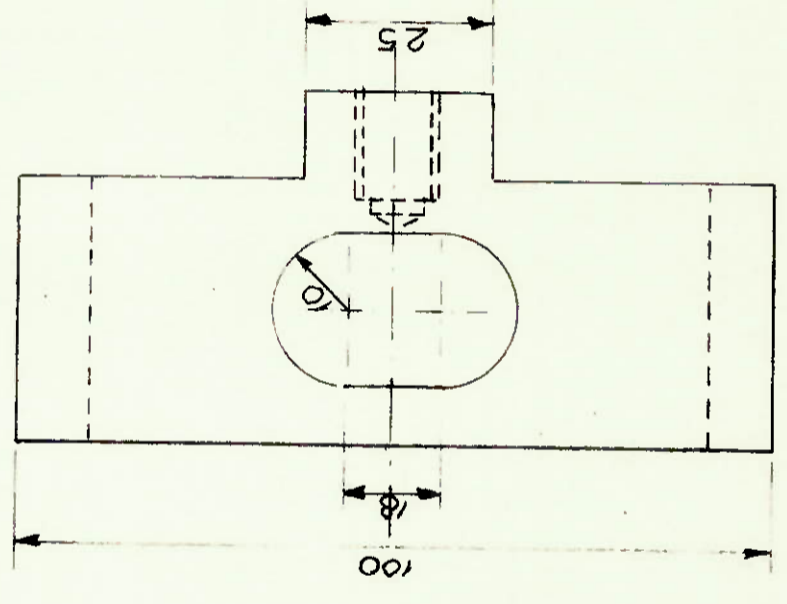
material Inox304
quantidade 2

EQUIP. ENSAIO DE FADIGA		
GARRA		
EPUSP	ALEXANDRE	DEZ 83
1:1	FRASCARI 818470	Nº 8

7

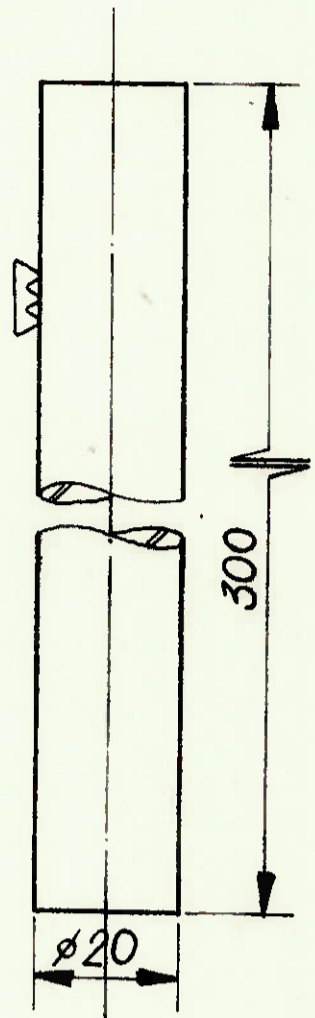


material Inox 304



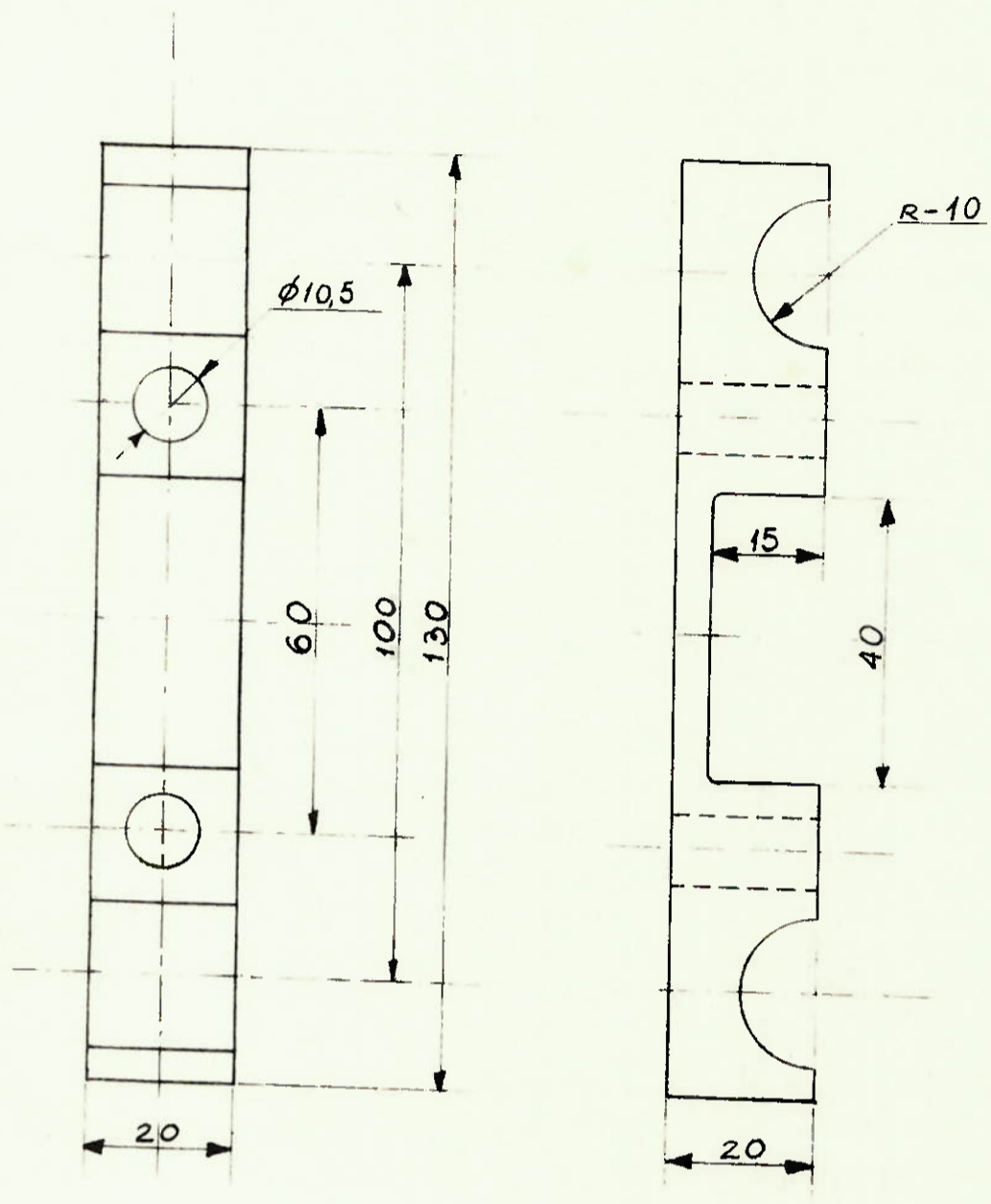
EQUIP ENSAIO DE FADIGA	
CAME	
EPUSP	ALEXANDRE
1:1	FRASCARI 8108470 N: 9
	DEZ 83

8



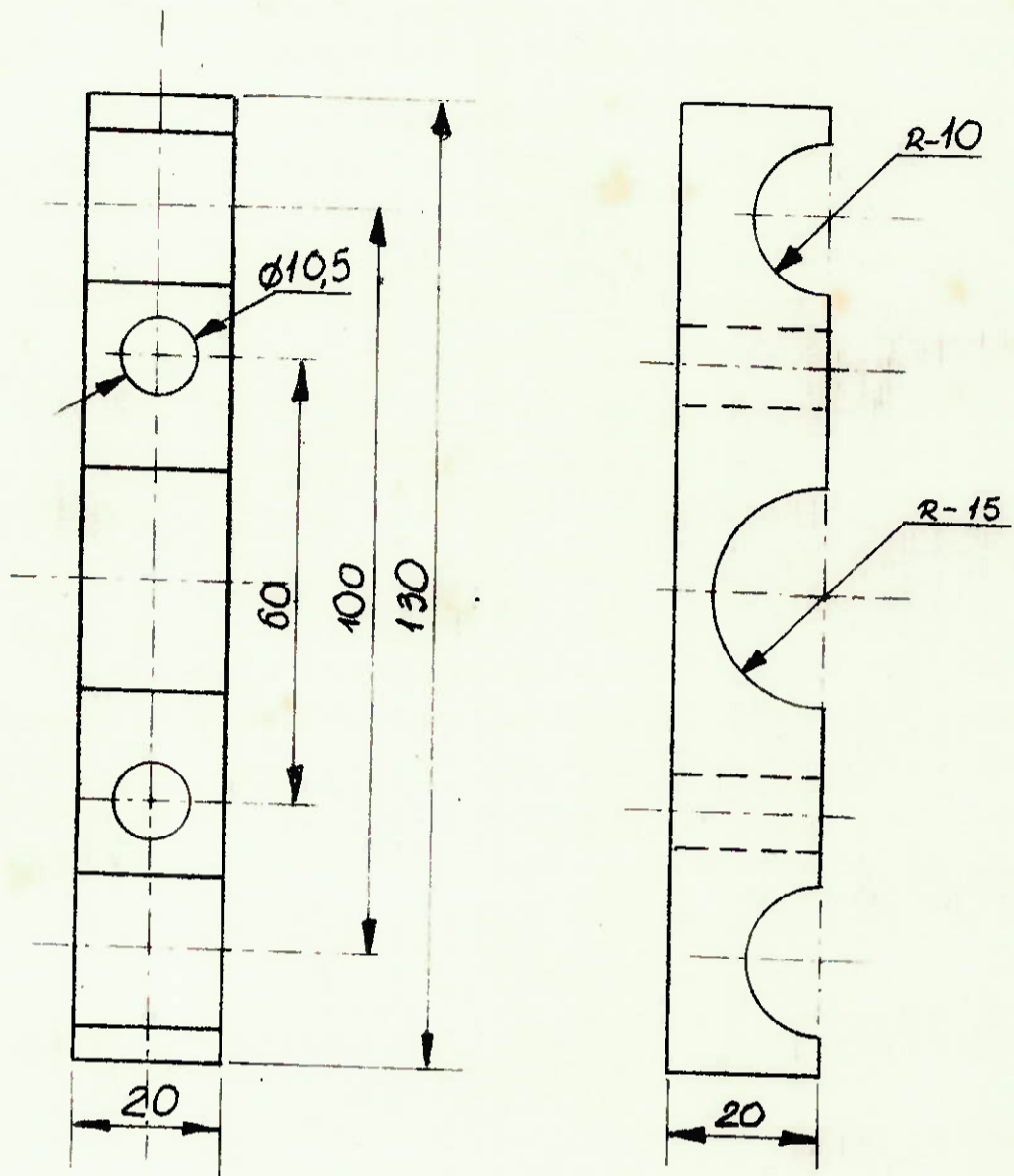
material Inox 304
quantidade 2

EQUIP. ENSAIO DE FADIGA		
COLUNA PRINCIPAL		
EPUSP	ALEXANDRE	DEZ B3
1:1	FRASCARI 8108470	Nº 10



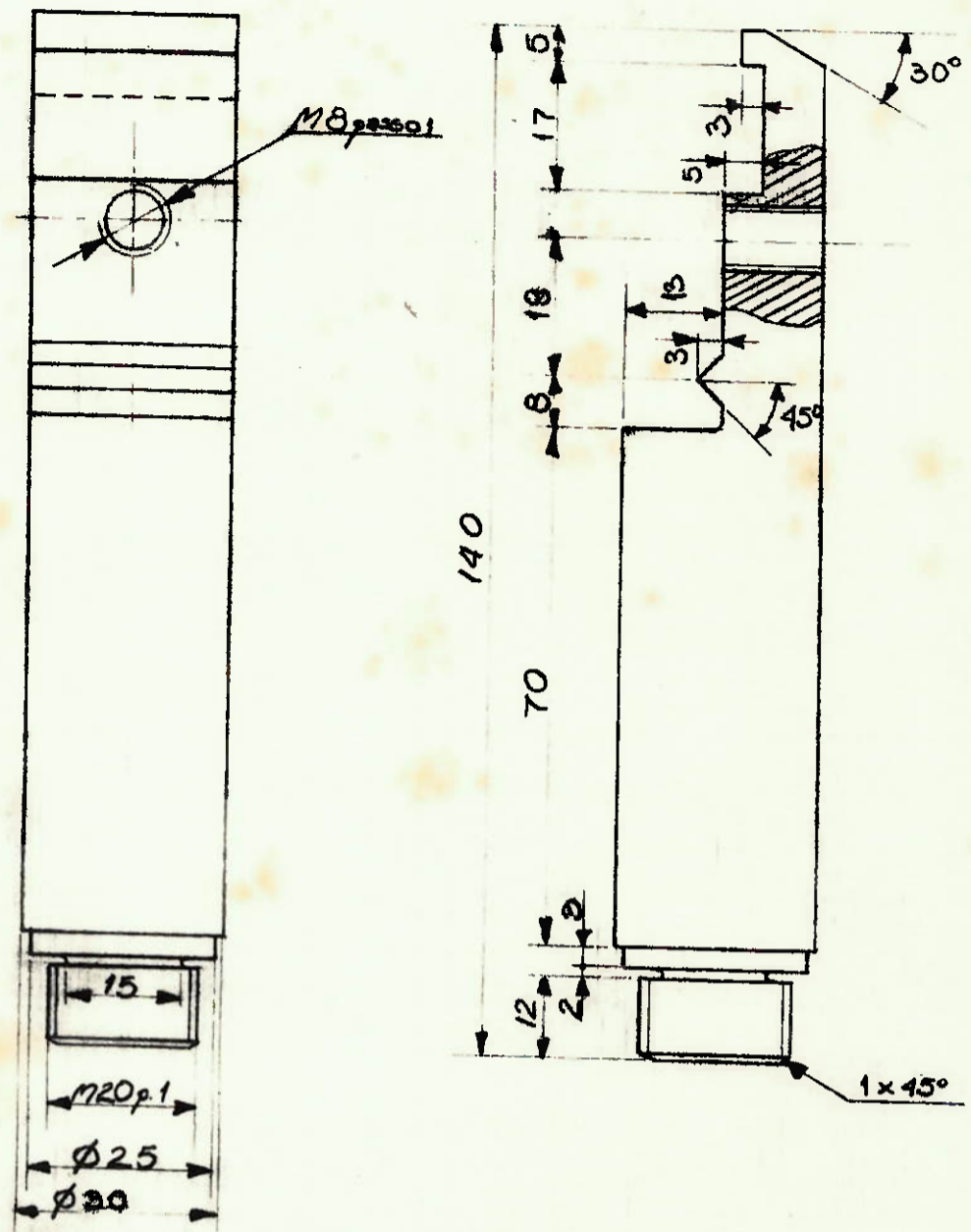
material - Inox 304
quantidade 2

EQUIP. DE ENSAIO DE FADIGA		
GARRA DO CAME		
EPUSP	ALEXANDRE	DEZ 83
1.1	FRANZONI 8108470	NR 11



material Inox 304
quantidade 2

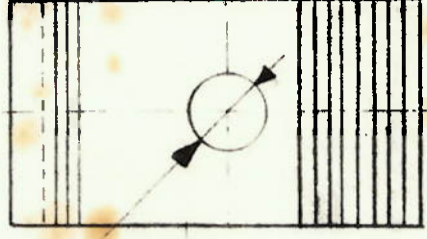
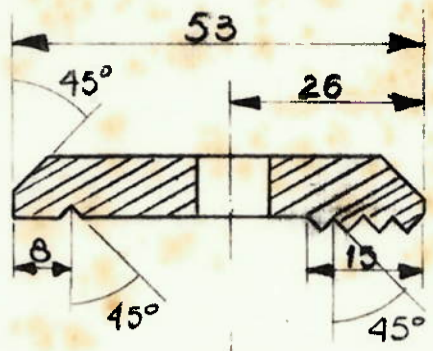
EQUIP. ENSAIO DE FADIGA		
APOIO DO CILINDRO		
EPUSP	ALEXANDRE	DEZ 83
11.1	FRASCARI 8108470	Nº 12



material Nylon

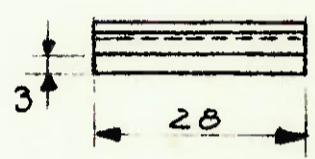
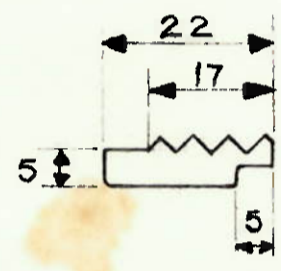
11

EQUIP. ENSAIO DE FADIGA		
SUPORTE DAS GARRAS		
EPUSP	ALEXANDRE	DEZ 83
1:1	FRASCARI 818976	Nº 13

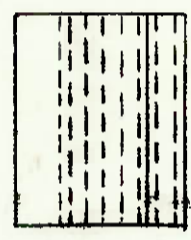


∅ 9

12



13



material: Acrílico
 quantid. 2 de cada

EQUIP. ENSAIO DE FADIGA		
GARAAS DA MEMBRANA		
E. PUSP	ALEXANDRE	DEZ 83
1:1	FRASCAR, 8108470	Nº 14