

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

1971



1110000001



3

MEDIÇÃO DE TENSÕES EM ENSAIOS DE FRATURA DINÂMICA.
CONCEPÇÃO, CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ENSAIOS
DE PROVA DE UM DISPOSITIVO
DE MEDIDA

JESSEN VIDAL

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetã pa-
ra obtenção do Título de Doutor
em Ciências em Engenharia Mecâ-
nica.

T620 172.24(043)
V 648m

Jessen Vidal
5/9/1972

Guaratinguetã - São Paulo
Dezembro de 1971

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetã
BIBLIOTECA

00001

ORIENTADOR DA TESE

Prof. Dr. Octavio Gaspar de Souza Ricardo

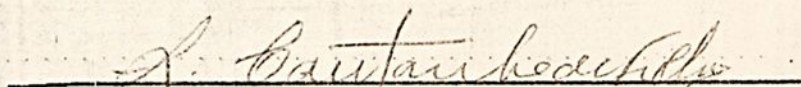


Esta tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Ciências e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Comissão Examinadora

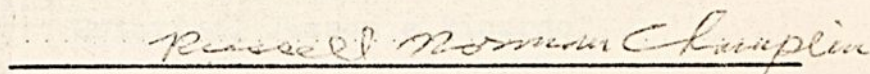
Orientador


Prof.Dr.Octavio Gaspar de Souza Ricardo

Presidente da Comissão Examinadora


Prof.Dr. Luiz Cantanhede Filho

Diretor da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetã


Prof.Dr. Russel Norman Champlin

À minha esposa Priscila e a meus filhos
Cristina, Jessen e Ricardo



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

O autor deseja deixar expressos os seus agradecimentos ao Prof. Octávio Gaspar de Souza Ricardo, cujo incentivo e apôio desinteressados tornou possível a realização do presente trabalho.

Deseja também agradecer aos senhores Hugo Csoknyai, Ettore Gasparetto, Aderson Mauro Siqueira e Eduardo Frank Fuch que, trabalhando incansavelmente ao lado do autor, ajudaram a realizar com presteza e dedicação, a parte experimental da pesquisa.



S U M Á R I O

No presente trabalho o autor desenvolve um processo de medidas de cargas e parâmetros correlatos para ensaios de tração dinâmica que fornecessem informações mais completas e de valores mais confiáveis do comportamento dos materiais sob ação de cargas de impacto.

O dispositivo, basicamente um transdutor de carga, emite um sinal elétrico que, fotografado no vídeo de um osciloscópio, pode ser analisado para obtenção de informes tais como, carga ou tensão de escoamento, resiliência, carga máxima ou tensão de ruptura, tenacidade, tempo decorrido para a fratura, etc.

Í N D I C E

Capítulo I : ENSAIOS DINÂMICOS DE IMPACTO	1
1. Introdução	1
2. Ensaaios de Impacto	3
 Capítulo II: O TRANSDUTOR - MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE CARGA EM TRAÇÃO DINÂMICA	 6
1. Introdução	6
2. Projeto do Dispositivo	9
3. Circuito de Medição	20
4. Calibração do Transdutor	20
5. Funcionamento do Transdutor. Ensaaios de Prova	26
6. Análise do Funcionamento do Transdutor	30
 Capítulo III: CONFIABILIDADE DA MEDIDA	 38
1. Introdução	38
2. O Corpo de Prova. Cálculo dos Parâmetros Auxiliares	 40
3. Análise Comparativa	43
4. Conclusões	63



Capítulo IV: ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM AÇO SOB AÇÃO DE CARREGAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

.....	71
1. Introdução	71
2. Procedimento	71
3. Ensaio Estático. Resultados	72
4. Ensaio Dinâmico. Resultados	72
5. Comentários	75

Capítulo V : CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Recomendações	89
------------------------	----

Apêndice I : EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA - STRAIN GAGE

1. Princípio do Extensômetro Elétrico de Resistência ..	91
2. Características do Extensômetro Elétrico de Resistência	94
3. Circuito Básico da Ponte de Wheatstone	97
4. Métodos de Indicação - Generalidades	101

Apêndice II: ESTUDO ANALÍTICO DE EFEITO DAS CARGAS INERCIAS DA BASE DE TRAÇÃO NO IMPACTO

Apêndice III: CERTIFICADO DE ANÁLISE DO MATERIAL USADO NOS ENSAIOS

BIBLIOGRAFIA



CAPÍTULO I

ENSAIOS DINÂMICOS DE IMPACTO1. Introdução

As estruturas em geral e em particular as máquinas, têm muitas vezes os seus elementos submetidos a carregamentos dinâmicos. Assim sendo, torna-se necessário que no projeto destas estruturas ou mecanismos, tenha o projetista um conhecimento efetivo do desempenho dos elementos que constituirão a estrutura ou mecanismo, quando sujeitos a êstes tipos de carregamentos.

O conhecimento do comportamento dos materiais em ensaios estáticos é de grande importância e, de uma certa maneira, já fornece em primeira aproximação através de expressões algébricas, quase sempre empíricas, uma indicação de seu comportamento sob ação de carga dinâmica.

Entretanto, êstes resultados nem sempre são confiáveis ou suficientes para atender certas exigências de projeto. Principalmente quando se sabe que as características de certos materiais sob carregamento dinâmico diferem grandemente daqueles apresentados quando a carga é aplicada lentamente, isto é, sob carregamento estático.

Um tipo importante de carregamento dinâmico é aquele onde a carga é aplicada instantaneamente, como no impacto de massa em movimento. Outro tipo é aquele onde o carregamento é aplicado ciclicamente, normalmente conhecido como fadiga. No presente trabalho estudaremos apenas o primeiro tipo, que passaremos a denominá-lo agora como "cargas de impacto".



Diferentemente dos ensaios estáticos onde nas medições a ênfase maior é dada na determinação das cargas e tensões, (a rigor envolve também absorção e dissipação de energia), os ensaios de impacto normalmente utilizados envolvem apenas considerações de absorção, dissipação e transferência de energia.

As tensões produzidas por uma carga de impacto dependem em última análise da quantidade de energia dispendida na deformação. É evidente, no entanto, que nos problemas de impacto, a maneira de como a carga é resistida pelo elemento estrutural é fator predominante para o tipo de informação que se necessita.

No projeto de elementos estruturais sujeitos a cargas de impacto, o desejável é que a dissipação de energia seja feita através da ação elástica do elemento estrutural, que no caso funcionaria como uma espécie de amortecedor. Em tais casos a resiliência (capacidade energética elástica) do material é um dado importante, e aqueles obtidos a partir de ensaios estáticos poderão ser suficientes. Em outros casos no entanto, o comportamento do elemento estrutural pode depender da tenacidade (capacidade energética até a ruptura) do elemento estrutural sujeito ao choque. Nêles, uma melhor aproximação do problema tornaria necessário ensaios envolvendo cargas de impacto, e cuja solução não é tão simples.

Indubitavelmente os resultados de ensaios de impacto têm contribuído para a obtenção de informações necessárias ao projeto de certos elementos estruturais, porém os ensaios normalmente utilizados fornecem dados que têm mostrado um significado limitado para as informações básicas de projeto.

Nestes ensaios mede-se normalmente, como característica do material, a energia absorvida, sob carga de impacto, para provocar a fratura do corpo de prova. É evidente que existe uma distinção a ser feita entre problemas que envolvem apenas a ab-



sorção de energia durante a deformação na região elástica e aqueles que envolvem absorção de energia durante a deformação plástica. Esta diferença é responsável pela limitação básica da aplicação dos resultados obtidos em ensaios normais de impacto.

2. Ensaios de Impacto

Na pesquisa do comportamento dos materiais sob carregamento dinâmico, existem muitos dispositivos e tipos de ensaios. No presente item faremos referência apenas àqueles mais comumente utilizados e também mais ou menos padronizados.

Idealmente o desejável seria o ensaio onde toda a energia para a fratura fôsse transmitida apenas para o corpo de prova. No entanto isto não ocorre. Parte da energia é sempre absorvida pela máquina de ensaio, por atrito de suas partes, por deformação de suas partes e massas de impacto, por vibração, etc. Ao lado disso existe ainda o fato de que o resultado a se obter depende muito da forma de corpo de prova usado. Por esta razão há padronização de ensaios, em especial do corpo de prova para permitir análises, que na realidade são comparativas. Isto significa também que cada tipo de teste de impacto fornece informações para um campo específico.

De uma maneira geral os ensaios de impacto podem ser realizados pela aplicação de cargas em flexão, tração, compressão ou torção. O mais comum deles é o de carga de flexão. O de tração é menos comum e os de torção e compressão só são usados em aplicações especiais.

Os dispositivos para aplicação da carga de impacto são de três tipos principais:



- a) Por queda livre da carga
- b) Martelo-pêndulo
- c) Volante rotativo

Dêles o mais comum é o do martelo-pêndulo, sendo que o ensaio realizado é normalmente o denominado de Charpy e Izod. Utilizam corpos de prova com entalhes que são fraturados em flexão. No de Charpy o corpo de prova é uma viga simplesmente apoiada; no de Izod, uma viga engastada. Em tais tipos de ensaio, grande parte da energia absorvida ocorre na região adjacente ao entalhe, onde é induzida uma fratura do tipo frágil, pois a presença do entalhe provoca nêle o aparecimento de níveis de tensões elevadas e de estado triaxial de tensões. Nestes corpos de prova existe, portanto, o efeito conhecido como "sensibilidade ao entalhe" que introduz modificações grandes no comportamento físico do elemento.

Pode-se concluir, portanto, que tanto os ensaios de Charpy como os de Izod não simulam na realidade as cargas de impacto em serviço. Fornecem apenas informações sôbre um tipo particular de corpo de prova com entalhe e sob um tipo particular de carregamento.

Já os ensaios de impacto em tração, utilizando corpos de prova sem entalhe, na opinião do autor, fornecem resultados muito mais confiáveis. Nêles são eliminadas principalmente as complicações introduzidas pelo entalhe, cuja função é dar origem à fratura, que se inicia num ponto geralmente no seu centro. Porém, para as máquinas de ensaio comumente utilizadas, em particular o martelo-pêndulo, o resultado fornecido pelo ensaio é apenas o da energia total consumida para fratura. Nenhuma outra indicação que nos levasse, por exemplo, à determinação da carga máxima, ou daquela indicativa do início da deformação plástica.



Baseado nestas considerações foi que, o autor se propôs desenvolver um sistema de medidas em tração dinâmica, que fornecesse informações mais completas e de valores mais confiáveis.



CAPÍTULO II

O TRANSDUTOR

MEDICÃO DE PARÂMETROS DE CARGA EM TRACÇÃO DINÂMICA

1. Introdução

Como apresentado no capítulo anterior, os resultados obtidos em ensaios de impacto são relativamente pobres em informações. Dando apenas o valor da energia consumida no processamento da fratura, não fornece nenhuma outra indicação que nos leve, por exemplo, à determinação do limite de escoamento ou carga máxima de fratura.

O autor se propôs, portanto, ao desenvolvimento de um dispositivo que, funcionando como acessório de uma máquina do tipo martelo-pêndulo, fornecesse informações mais completas dos ensaios de impacto.

O dispositivo necessário consiste basicamente de um transdutor de carga, de configuração e idealização simples, podendo em princípio ser adaptado a qualquer máquina de ensaios de impacto do tipo martelo-pêndulo.

Para o trabalho em pauta o autor utilizou uma máquina de ensaio marca Ansler, modelo 30Ph 130, existente no Laboratório de Ensaio da Divisão de Engenharia Mecânica do ITA. Modelo muito antigo, porém a única disponível no "campus" do Centro Técnico Aeroespacial, não possui todas as características que seriam desejáveis para o tipo de medidas feitas pelo transdutor, principalmente rigidez, porém os resultados obtidos foram suficientemente satisfatórios, como veremos em capítulo sub-



seguente, para que o autor pudesse recomendar a utilização desse processo em máquinas similares.

A máquina utilizada se presta basicamente para ensaios de resistência ao impacto segundo os métodos de Charpy ou Izod. No entanto, possui dispositivos adicionais necessários para ensaios de tração dinâmica. Neste ensaio, idênticamente aos ensaios Charpy ou Izod, a máquina fornece como resultado do ensaio a energia consumida na fratura diretamente em Kgf.m ou lbf.ft.

O dispositivo projetado e construído pelo autor teve por finalidade medir o processamento da fratura em têrmos de carga, permitindo o cálculo das tensões e cargas que ocorrem durante o fenômeno, como também o comportamento dessas cargas e o tempo consumido na fratura.

Tal objetivo foi alcançado plenamente como mostram os resultados apresentados. Na realidade tais resultados são obtidos através de fotografias, cujo desenho esquemático é mostrado na figura 2.1, onde os parâmetros de carga são medidos no eixo vertical, e os de tempo, no eixo horizontal. É evidente que as informações a serem obtidas dela não são imediatas, exigindo uma análise cuidadosa, dada a complexidade do desenvolvimento da fratura, bem como ação dos possíveis efeitos secundários da máquina, em particular da utilizada na presente pesquisa que, apresentando pequena rigidez, introduzia efeitos de vibração, no sinal do transdutor, como veremos em capítulo subsequente.



*FIGURA ESQUEMÁTICA DO SINAL OBTIDO NO
PROCESSAMENTO DA FRATURA*

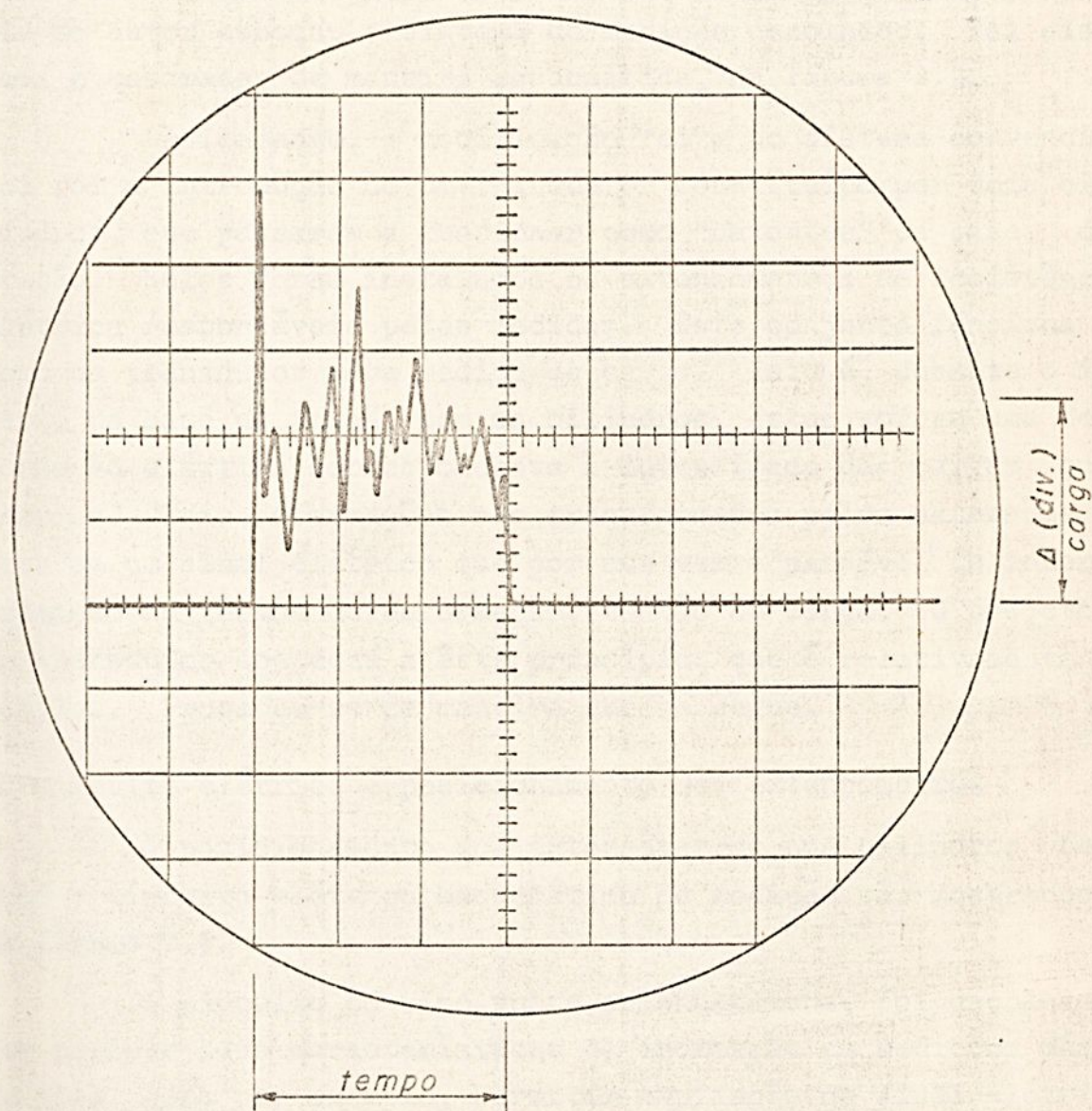


FIG. 2.1

2. Projeto do dispositivo

Uma análise da máquina de ensaio bem como do processamento da fratura do corpo de prova por tração dinâmica, permitiu ao autor esboçar o sistema de medição escolhido. Tal sis-tema é mostrado, de maneira esquemática, na figura 2.2.

Básicamente, a modificação feita no sistema convencio-nal foi a introdução de um transdutor constituído por dois ci-lindros, que passaram a funcionar como "batentes" da base de tração. Nêles foram instalados os extensômetros de resistência elétrica responsáveis pelas medidas. Este conjunto funciona como um transdutor para medida de carga. Isto é, durante o im-pacto da base de tração com os cilindros, êstes sofrem uma de-formação elástica correspondente à intensidade das cargas que ocorrem. Tais deformações são transformadas pelos extensôme-tros em um sinal elétrico que por sua vez é passível de inter-pretação em termos de deformação, tensão ou carga. O projeto do transdutor obedeceu a êste princípio, que é relativamente simples. Procedeu-se da maneira que se segue.

a) Circuito elétrico e posicionamento dos extensômetros

O posicionamento dos extensômetros nos cilindros bem como o circuito elétrico esquemático de medição são mostrados na figura 2.3.

O circuito do tipo ponte de Wheatstone, foi escolhido por possuir boas características de indicação em medições dê-ste tipo, como por exemplo, permitir ampliação de sinal elêtri-co pela colocação conveniente dos extensômetros no circuito e no corpo de prova. O sinal de saída ΔE , sinal medido é dado pela expressão:

$$\Delta E = \frac{V}{4R} (\Delta R_A + \Delta R_C - \Delta R_B - \Delta R_D)$$



DESENHO ESQUEMÁTICO DO SISTEMA

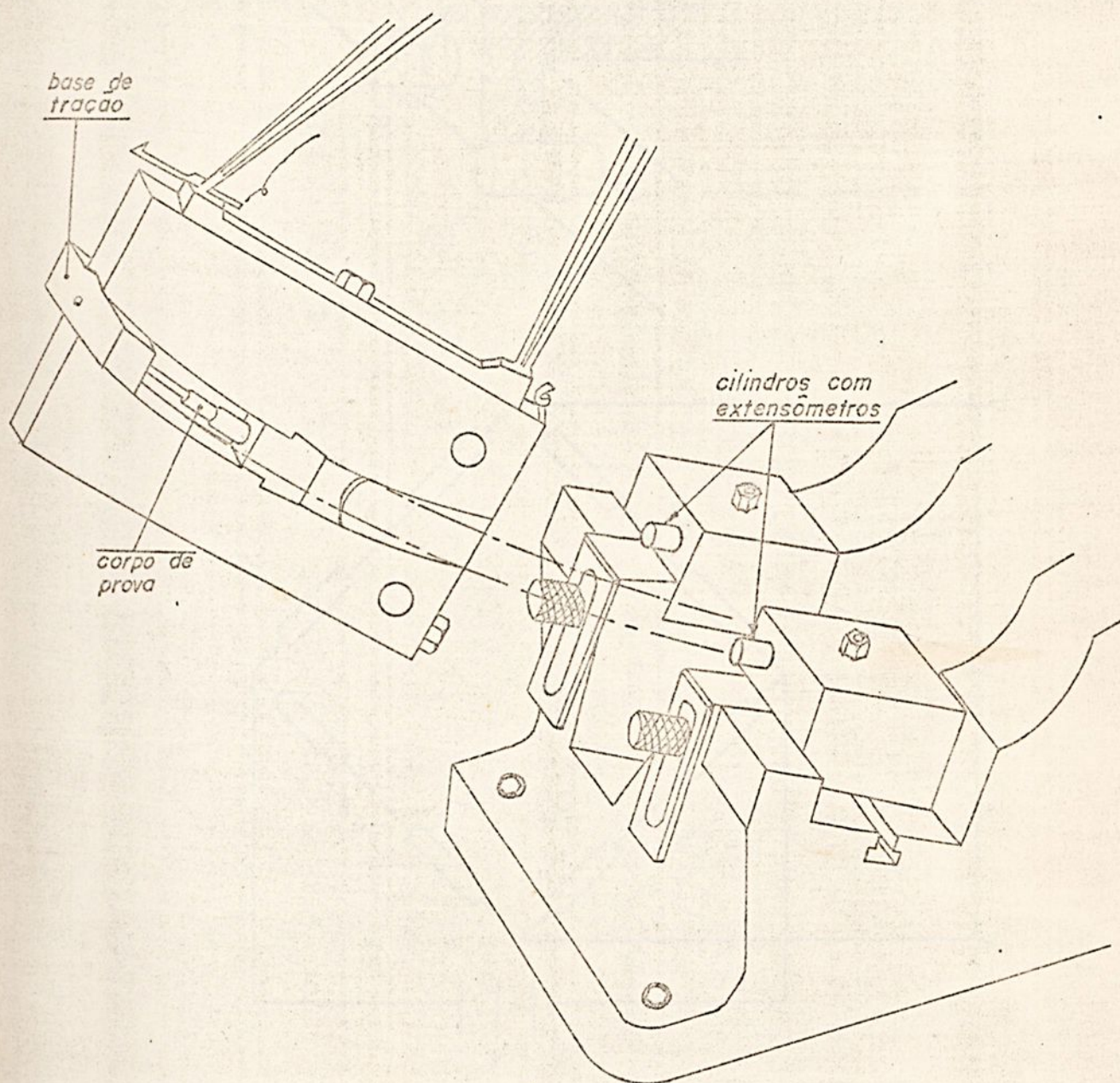


FIG. 22

DISPOSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

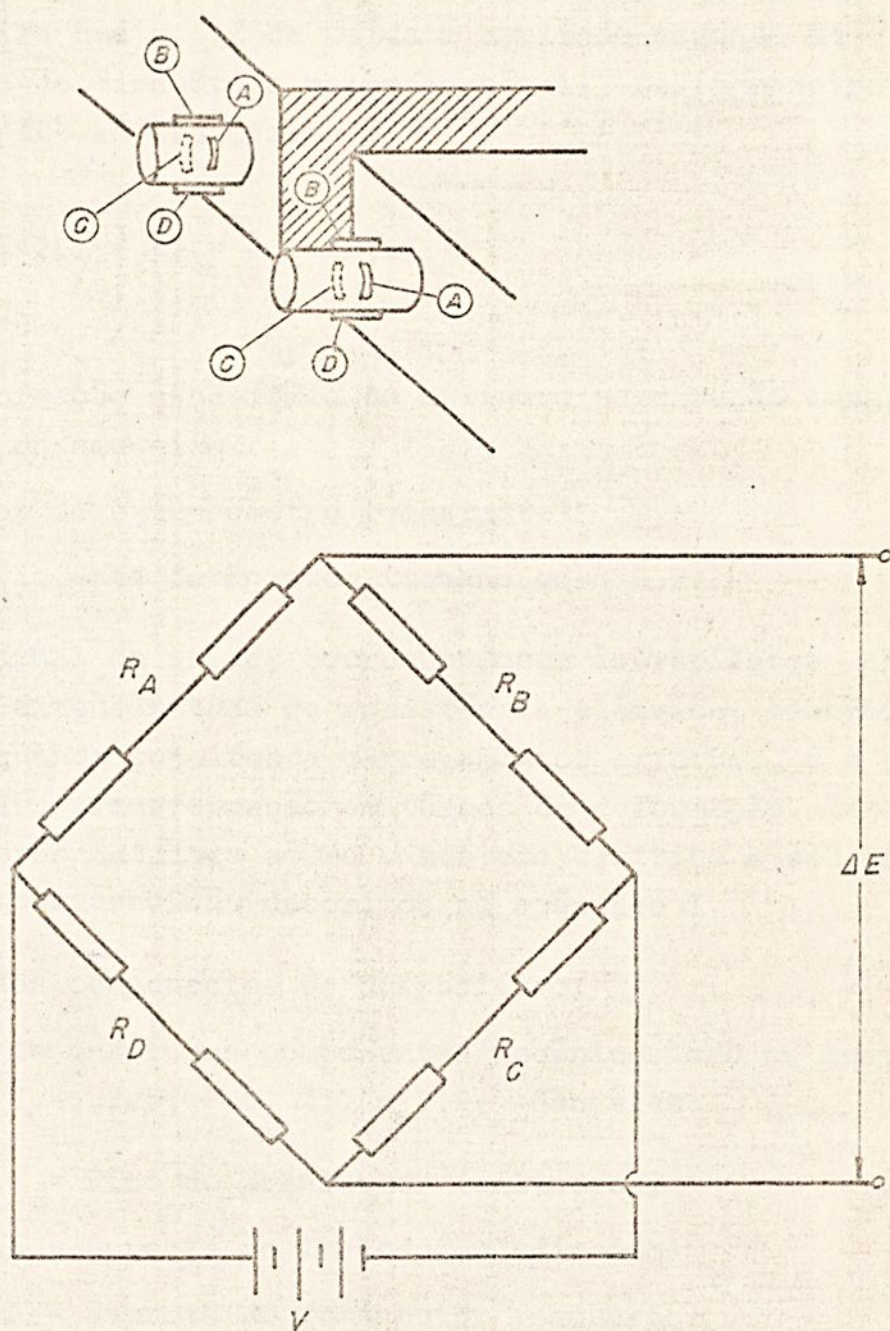


FIG. 2.3

onde $R_A = R_B = R_C = R_D = R$ resistência dos extensômetros.

O posicionamento físico destes extensômetros foi feito de tal maneira que o ΔE de saída é ampliado segundo um fator de ampliação do circuito o maior possível. Desta maneira a equação de ΔE se transforma em

$$E = \frac{V}{4} R \epsilon (1 + \mu) = \frac{V}{4} R \epsilon (2,6)$$

onde:

- ϵ - deformação específica do cilindro na direção longitudinal do seu eixo
- R - fator de extensômetro (constante)
- μ - coeficiente de Poisson (tomado como 0,3)

O sinal de saída, correspondente às variações ΔR que ocorrem nos extensômetros de resistência elétrica, colados nos cilindros, quando sujeitos a carregamentos externos, é a grandeza medida para transformação em termos de deformação, tensão ou carga. Maiores detalhes sobre o sistema elétrico e seu princípio de funcionamento são descritos no apêndice I.

b) Projeto dos componentes do dispositivo:

Os desenhos dos componentes mecânicos são os mostrados nas figuras 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8. São eles:

- Fig.2.4 = Pino do Transdutor (cilindros)
- Fig.2.5 = Suporte do Transdutor (direito)
- Fig.2.6 = Suporte do Transdutor (esquerdo)
- Figs.2.7 e 2.8 = Caixa do Circuito Auxiliar

Destes componentes o que exigiu maior atenção foi o pino do transdutor. Sendo o elemento de ação direta do impacto, tinha que apresentar certas características físicas tais como:

- Deformação elástica grande - sensibilidade
- Tensão de escoamento fora do intervalo daquelas obtidas pelas cargas de ensaio
- Dureza elevada (para evitar deformação plástica da cabeça do pino, local do impacto).

Desta maneira seu dimensionamento obedeceu a uma relação de compromisso entre as características de resistência e de sensibilidade às cargas de impacto. A experiência demonstrou que tais objetivos foram alcançados plenamente.

A figura 2.9 mostra o esquema do circuito auxiliar montado na Caixa das figuras 2.7 e 2.8. Como o nome indica, é um circuito auxiliar no qual é montado a ponte. Possui três (3) finalidades básicas:

- A) Contrôles de sensibilidade através da fonte (potenciômetro de 5000 Ω).
- B) Balanceamento da ponte (potenciômetro de 20000 Ω).
- C) Calibração do circuito (introdução de uma resistência de calibração, R_{cal} num dos braços da ponte).

O controle de sensibilidade tem a finalidade de, juntamente com os estágios de amplificação do circuito completo, permitir um aproveitamento ótimo da tela do aparelho de medição (osciloscópio). A introdução de R_{cal} permitiu a criação de um sistema simples para tradução do sinal medido em termos de carga, como veremos mais adiante.



PINO DO TRANSDUTOR

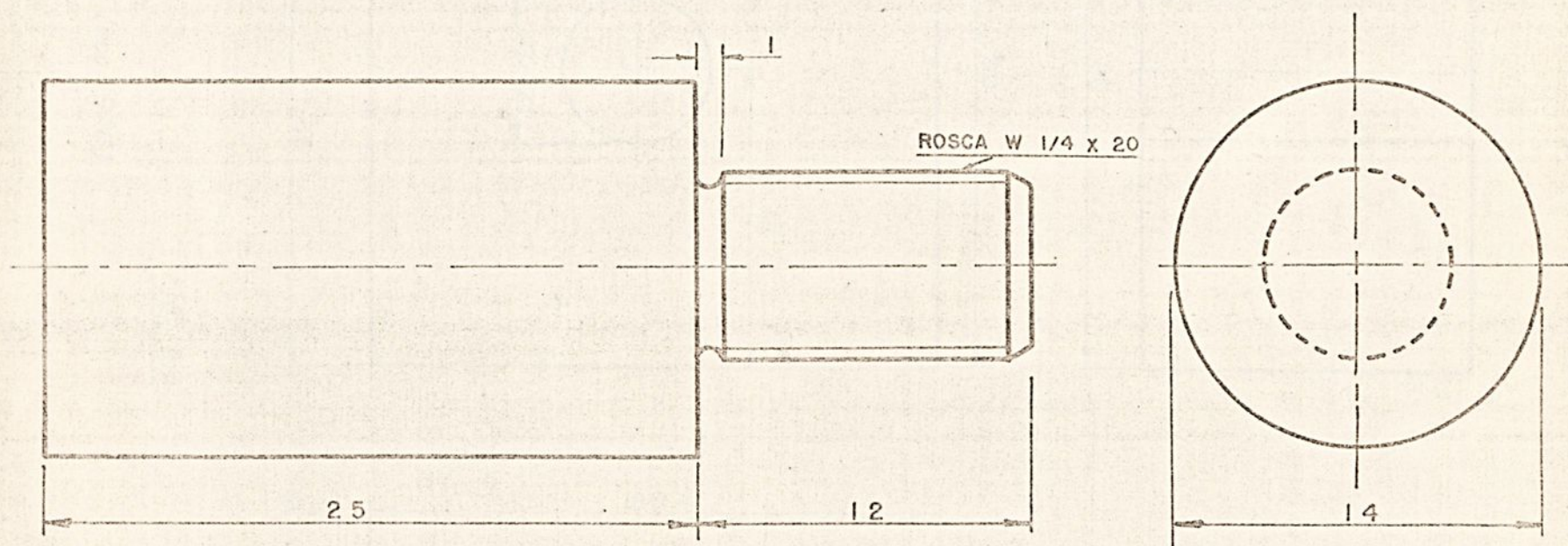


FIG. 2.4

MATERIAL: aço cromo-molibdênio
temperado e revenido
RC-50.

14

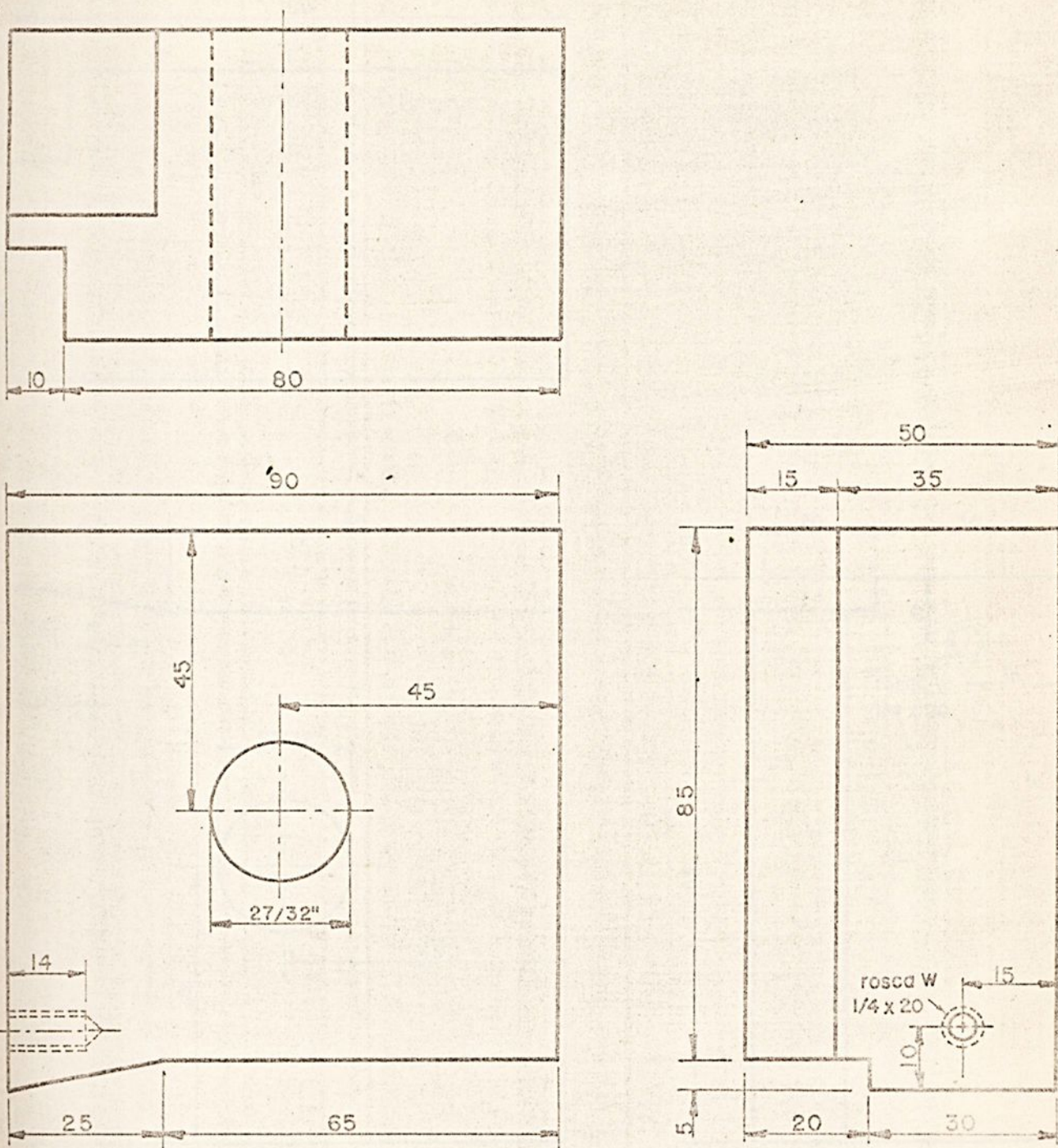


FIG. 2.5

MATERIAL: 4130 (aço SAE)

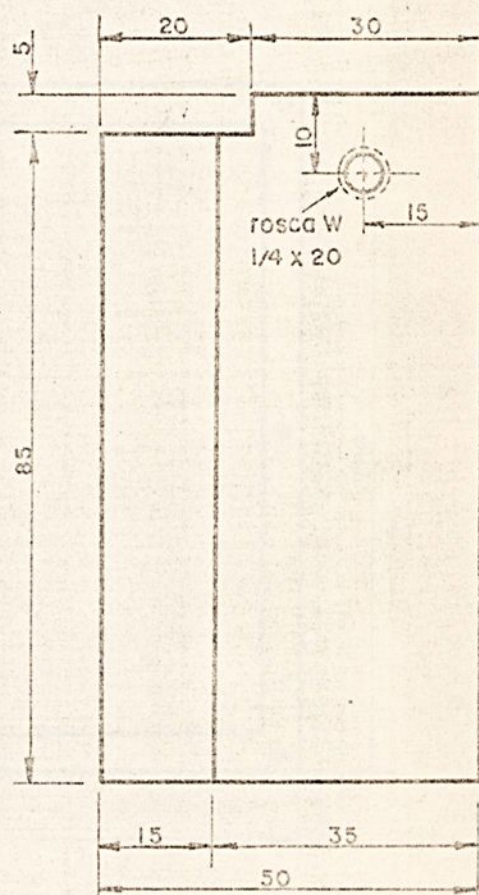
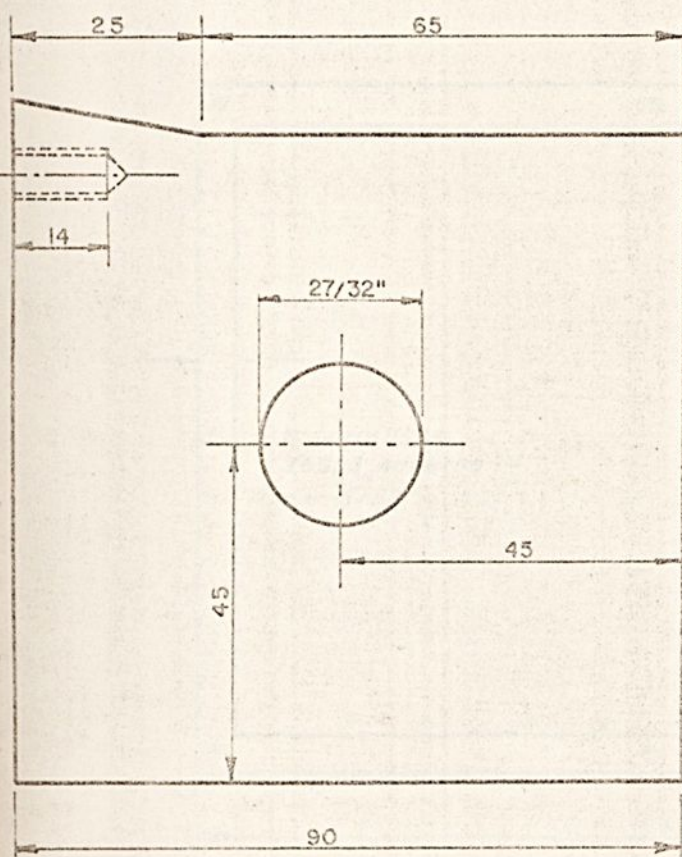
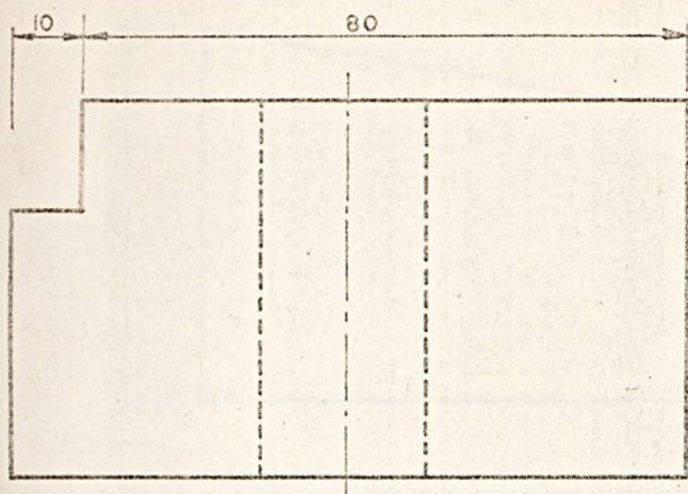


FIG. 2.6

MATERIAL: 4130 (aço SAE).

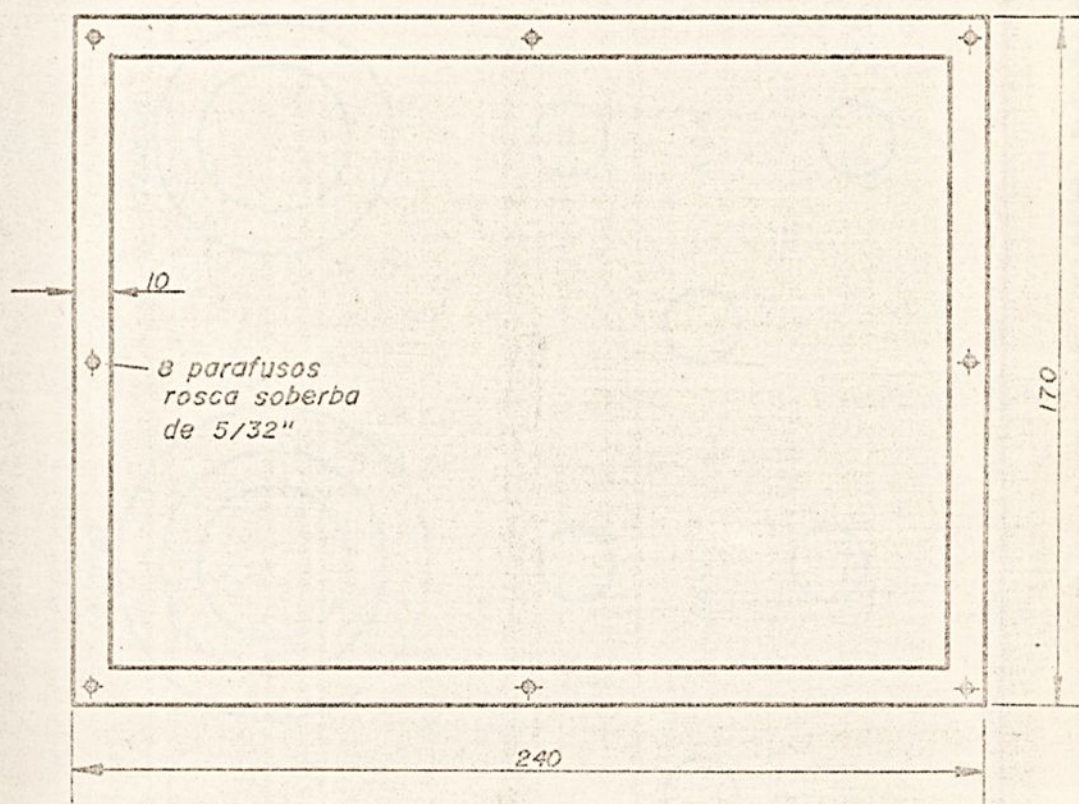
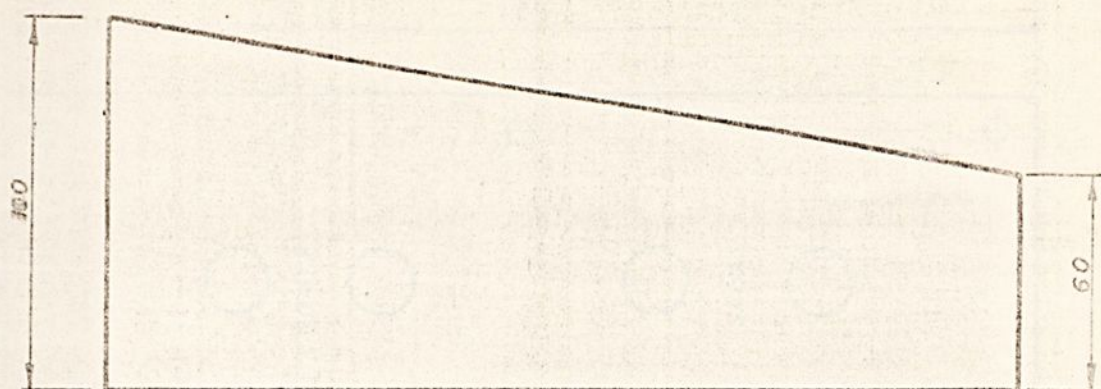
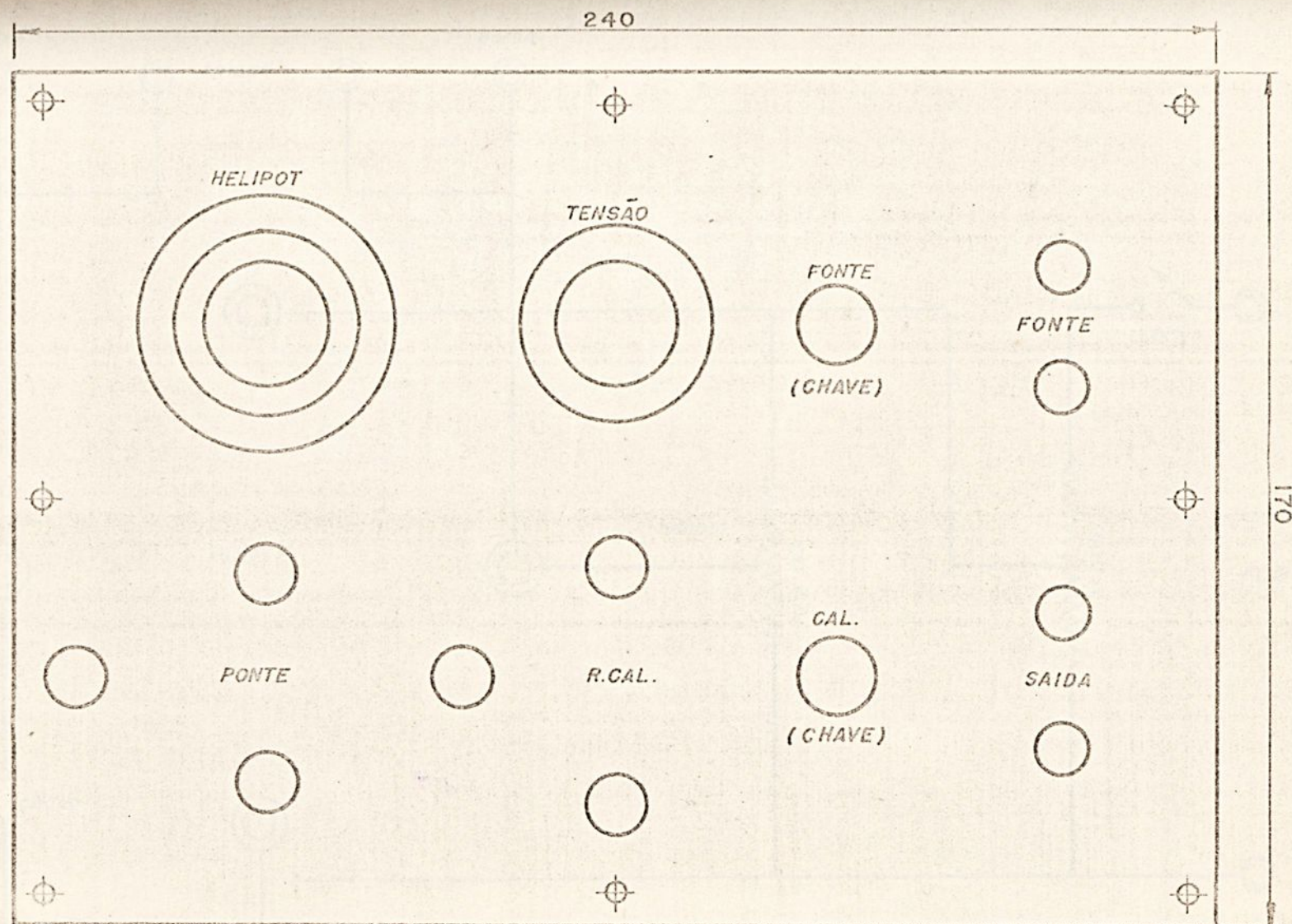


FIG. 2.7

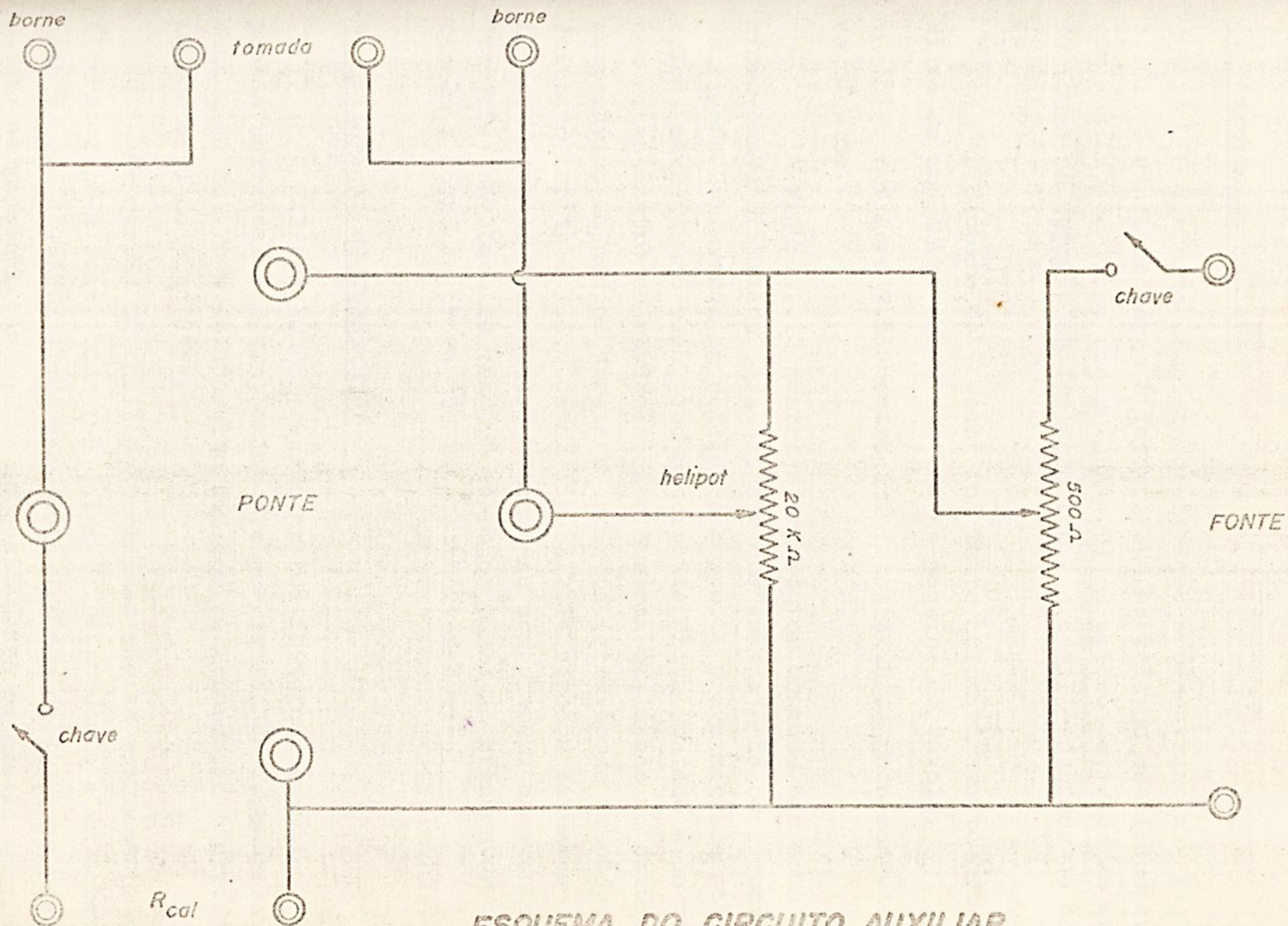
MATERIAL: chapa de aço SAE 1010
de 1mm de espessura



TAMPA DA CAIXA

FIG. 2.8

MATERIAL: chapa de alumínio
de 3mm de espessura



ESQUEMA DO CIRCUITO AUXILIAR

FIG. 2.9

3. Circuito de medição

O circuito completo de medição é o mostrado na figura 2.10. O sinal de carga é fotografado na tela do osciloscópio com auxílio de filme comum (ASA 400) ou polaróide, dado ao curto tempo de duração do fenômeno (de 2 a 6 mili-segundos no nosso caso).

O disparo do "sweep" foi feito automaticamente com auxílio de uma micro-chave montada na máquina de ensaio.

A figura 2.11 mostra uma fotografia de todo conjunto na máquina.

A figura 2.12 mostra o transdutor montado bem como a micro-chave utilizada para disparo dos "sweeps" do osciloscópio. Na figura 2.13 vemos em detalhe o corpo de prova montado no "martelo"; note-se, no caso, que o corpo de prova montado é do tipo com extensômetro de resistência elétrica, utilizado no estudo comparativo de medida direta e indireta (através do transdutor), feito no capítulo III. Já na figura 2.14 vemos a situação de impacto martelo-transdutor, notando-se com clareza o batente do "martelo" ou "base de tração" sobre os pinos do transdutor e também o corpo de prova, do tipo com extensômetro.

4. Calibração do transdutor

A calibração do transdutor foi feita com auxílio da prensa universal Baldwin, existente na Divisão de Engenharia Aeronáutica do ITA e um aparelho medidor de deformação ("strain indicator") do tipo SR-4.

As curvas de calibração obtidas são as mostradas nas figuras 2.15 e 2.16, cada uma delas correspondendo a um determinado R_{cal} . A utilização desses dois valores de R_{cal} se prende ao fato de possibilitar melhor aproveitamento da escala em função do nível de cargas esperado.



CIRCUITO DE MEDIÇÃO

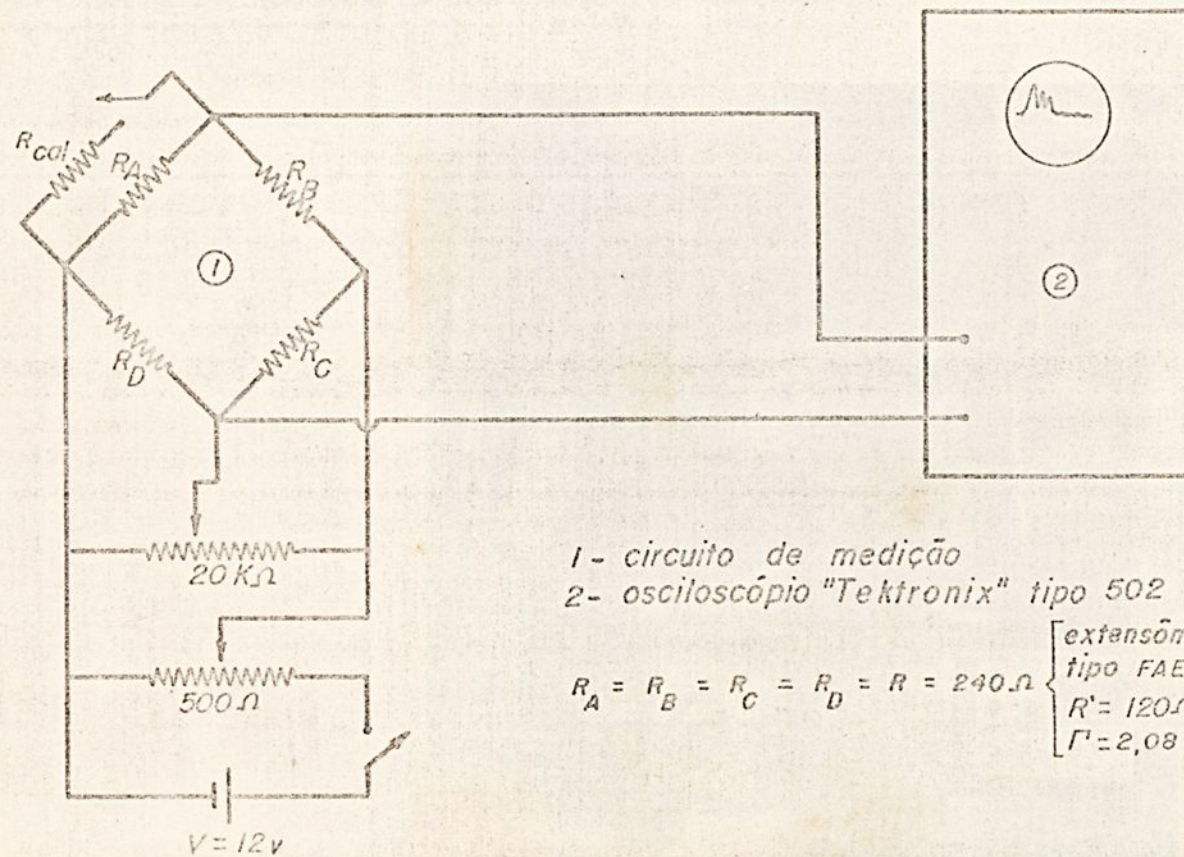


FIG. 2.10

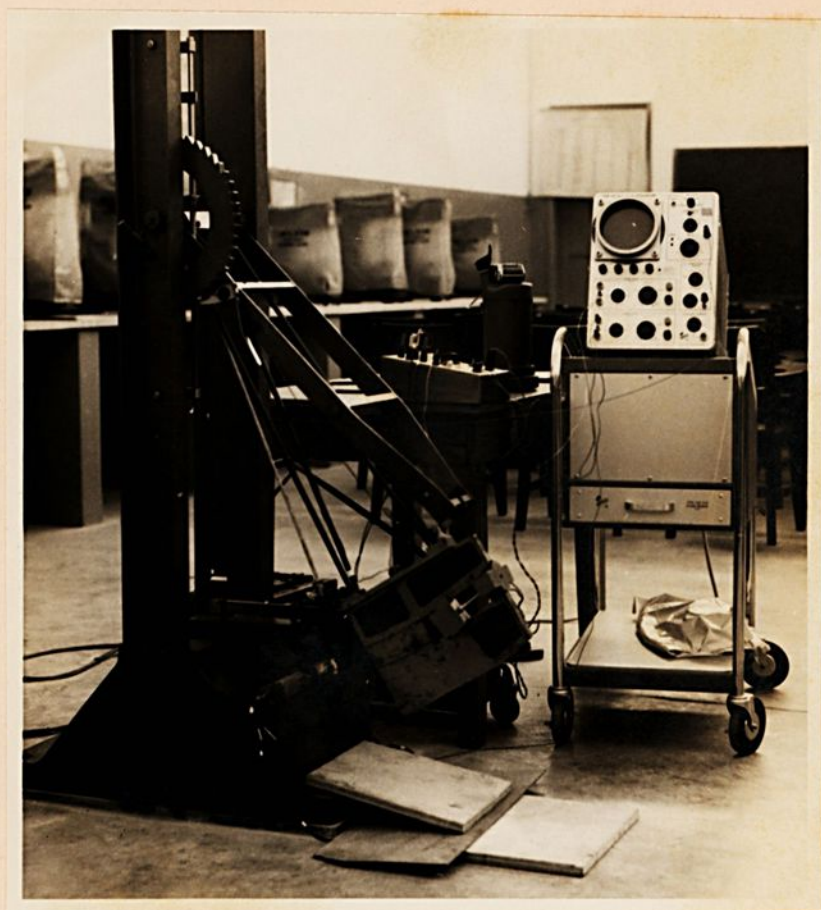


Fig. 2.11

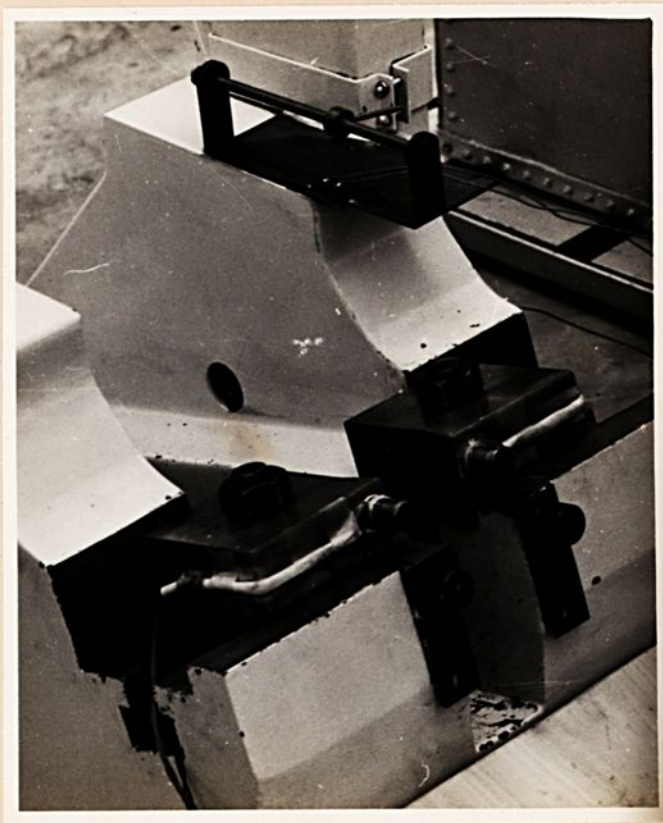


Fig. 2.12



Fig. 2.13

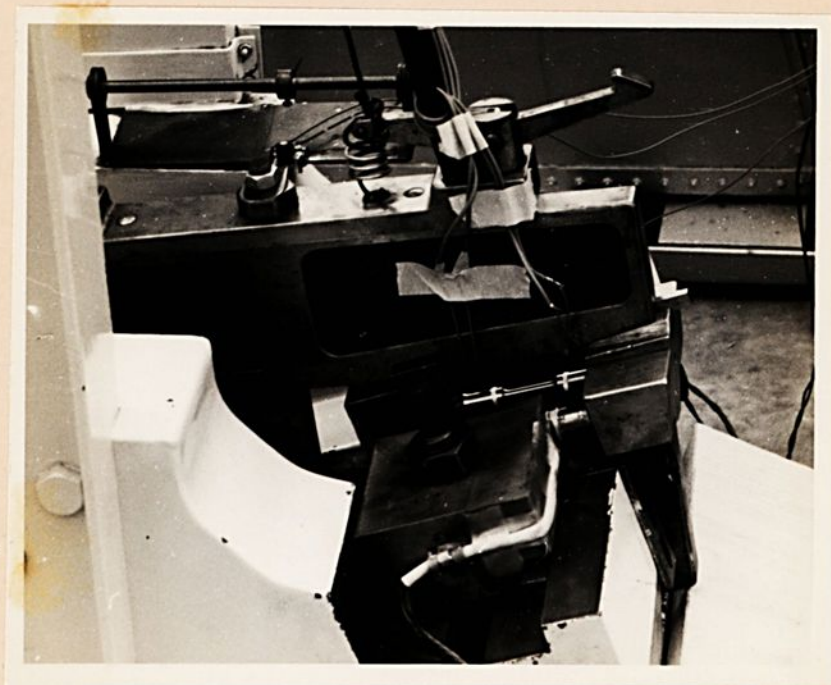


Fig. 2.14

Nos diagramas, em ordenada encontra-se a carga e em abscissa Δ/Δ_{cal} . Isto é, a relação entre:

Δ = deslocamento do "sweep" devido à carga de ensaio (ver figura 1).

Δ_{cal} = deslocamento do "sweep" devido a introdução de R_{cal} .

Consequentemente a determinação das cargas de impacto é bastante simples, consistindo basicamente da medição com escala graduada das deflexões do "sweep" durante o processamento da fratura, para determinação da relação Δ/Δ_{cal} com o qual se entra nas curvas de calibração.

5. Funcionamento do transdutor: Ensaios de prova

No presente tópico o autor se restringe a fornecer apenas os resultados obtidos sem entrar na análise do fenômeno processado durante a fratura do corpo de prova.

a) Corpo de prova

O corpo de prova utilizado, padronizado para tal tipo de ensaio, é mostrado na figura 2.17. O autor variou propositalmente a dimensão a para mostrar o comportamento diverso do desenvolvimento da fratura com aquele parâmetro. O material era aço liga AISI 4130H, de fabricação nacional, utilizado normalmente em construção aeronáutica e cedido gentilmente pela EMBRAER.

Convém notar que a altura de queda do pêndulo escolhida arbitrariamente pelo autor, foi mantida a mesma em todos os ensaios, dando uma velocidade tangencial na hora do impacto da ordem de 4,6 m/s.



CURVA DE CALIBRAÇÃO

$$R_{cal} = 156 \text{ K}\Omega$$

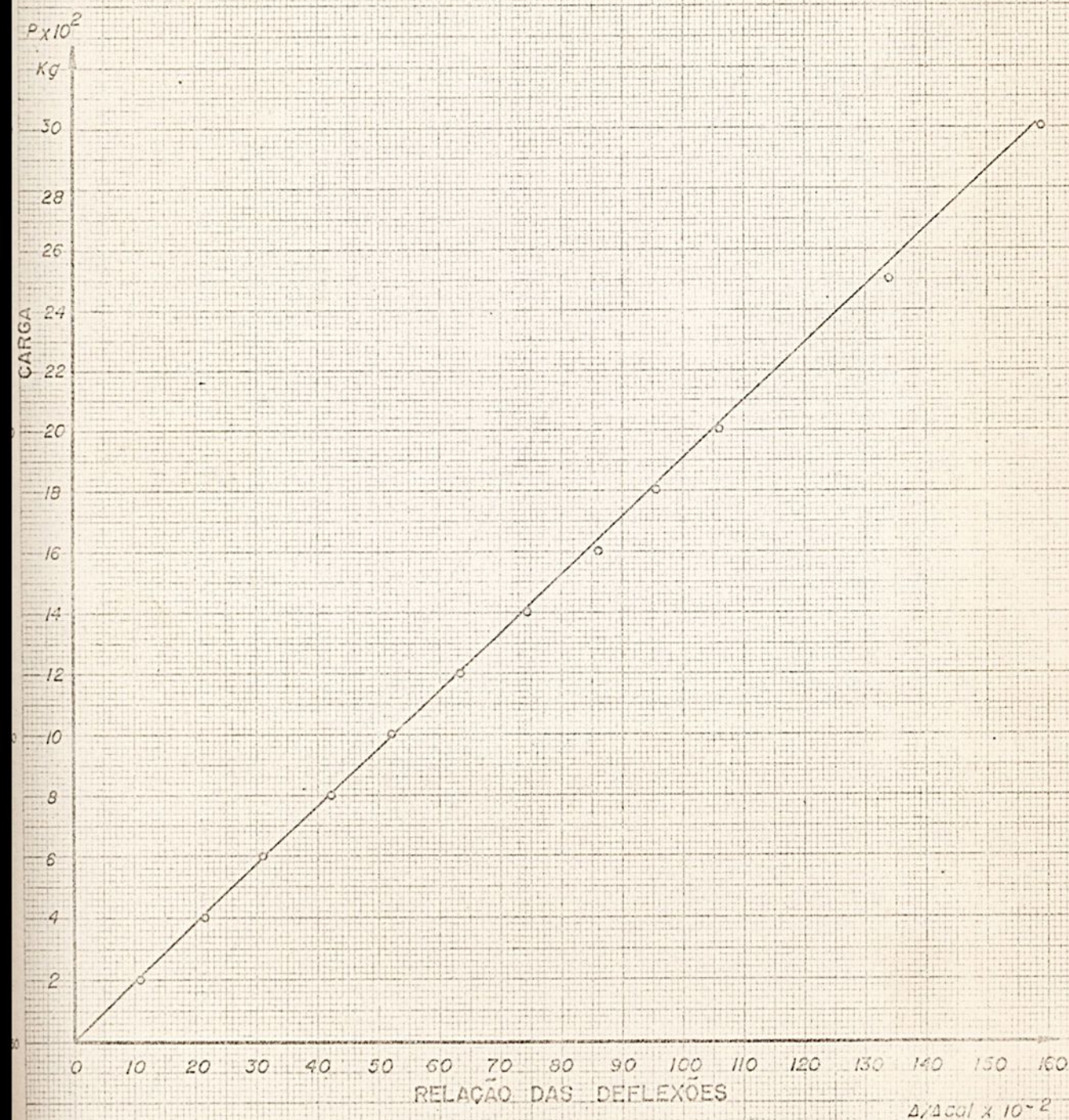
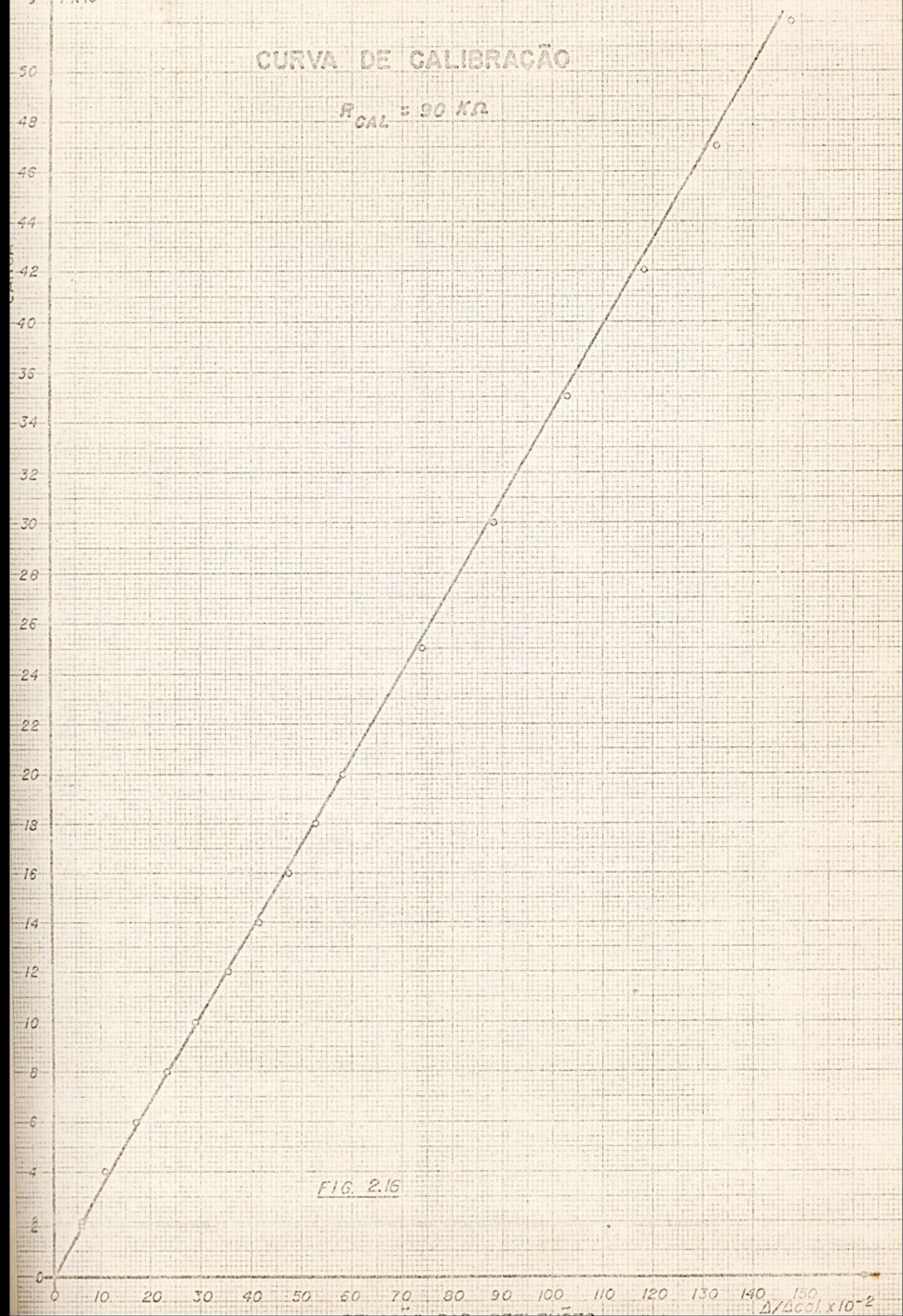


FIG. 2.15

kg $\times 10^{-4}$

CURVA DE CALIBRAÇÃO

$R_{CAL} = 90 \text{ K}\Omega$



CORPO DE PROVA PARA TRAÇÃO DINÂMICA

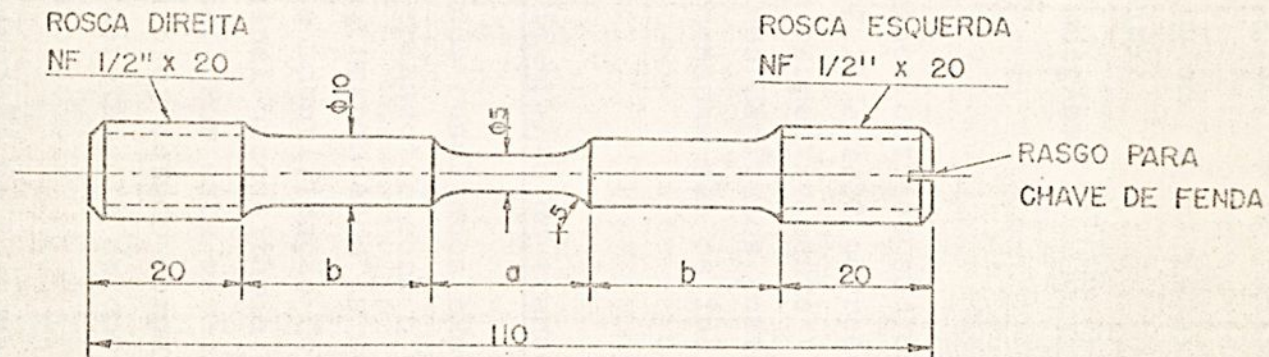


FIG. 2.17



b) Parâmetros estabelecidos no osciloscópio

- Ampliação: 1 mv/cm e 2mv/cm (função das condições de ensaio)
- Tempo : 1 mseg/cm

c) Resultados

Os resultados obtidos são os mostrados nas figuras 2.18, 2.19, 2.20, 2.21 e 2.22 correspondendo a um "a" de 20, 25, 30, 35 e 40 mm respectivamente ("a" comprimento calibrado, foi chamado de L_1 nos capítulos posteriores). Os valores nas abscissas e nas ordenadas são os indicados na figura 2.1.

6. Análise do funcionamento do transdutor

Com base nos resultados experimentais obtidos verificamos que tanto o transdutor como o equipamento auxiliar funcionam normalmente, respondendo às solicitações a eles impostas. No entanto, a identificação do fenômeno fratura com o comportamento do sinal necessitaria de uma observação experimental mais extensa. Por esta razão o autor desenvolve no capítulo III, e seguinte, estudo comparativo entre a medida direta, isto é, feita diretamente no corpo de prova e a indireta, isto é, no transdutor.

Uma demonstração mais acurada de todos os resultados obtidos indicaram que o primeiro "pico", de difícil detecção, parecia ultrapassar a tela do osciloscópio, assumindo valores não compatíveis com aqueles esperados durante a fratura do corpo de prova. Neste sentido o autor realizou uma verificação



experimental, constatando que tal "pico" resultava das cargas de inércia da base de tração, indicadas nos primeiros instantes de impacto.

Para isto realizou ensaios do martelo em queda, sem o corpo de prova, registrando portanto apenas o efeito do impacto da base de tração. Um dos resultados é apresentado na figura 2.23. O autor fez um estudo teórico deste efeito cujo desenvolvimento matemático é mostrado no apêndice II.



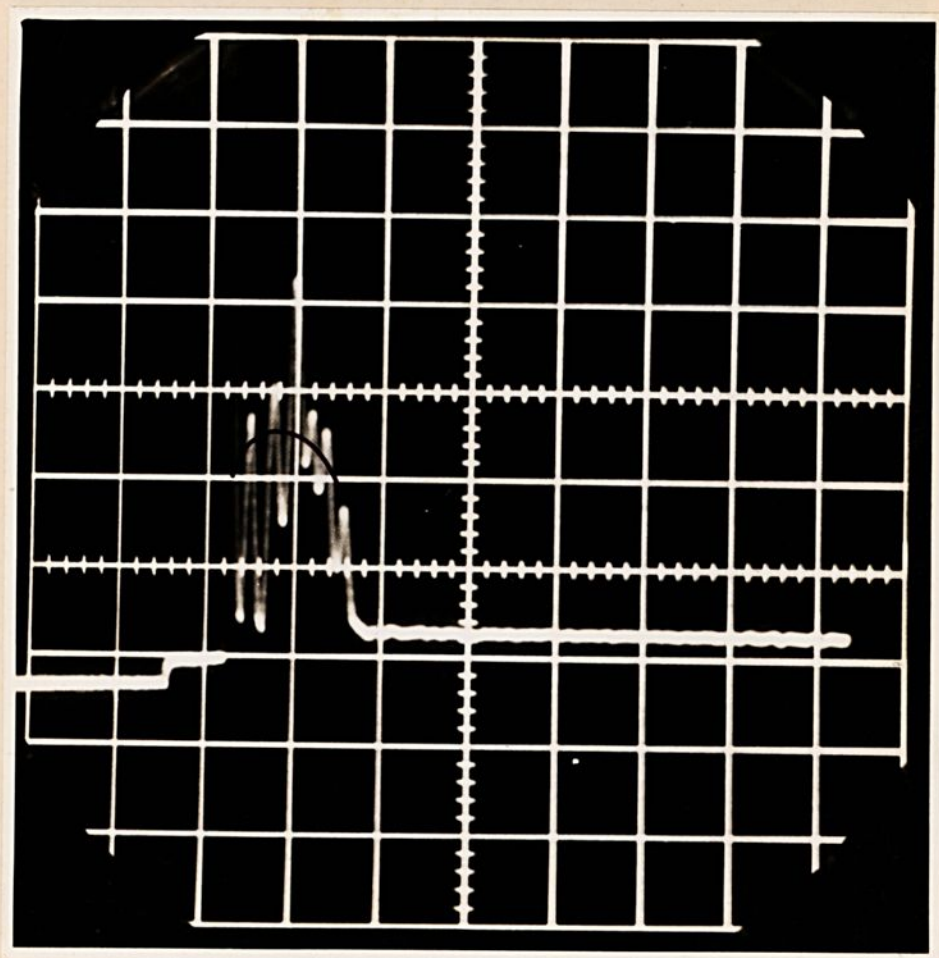


Fig. 2.18

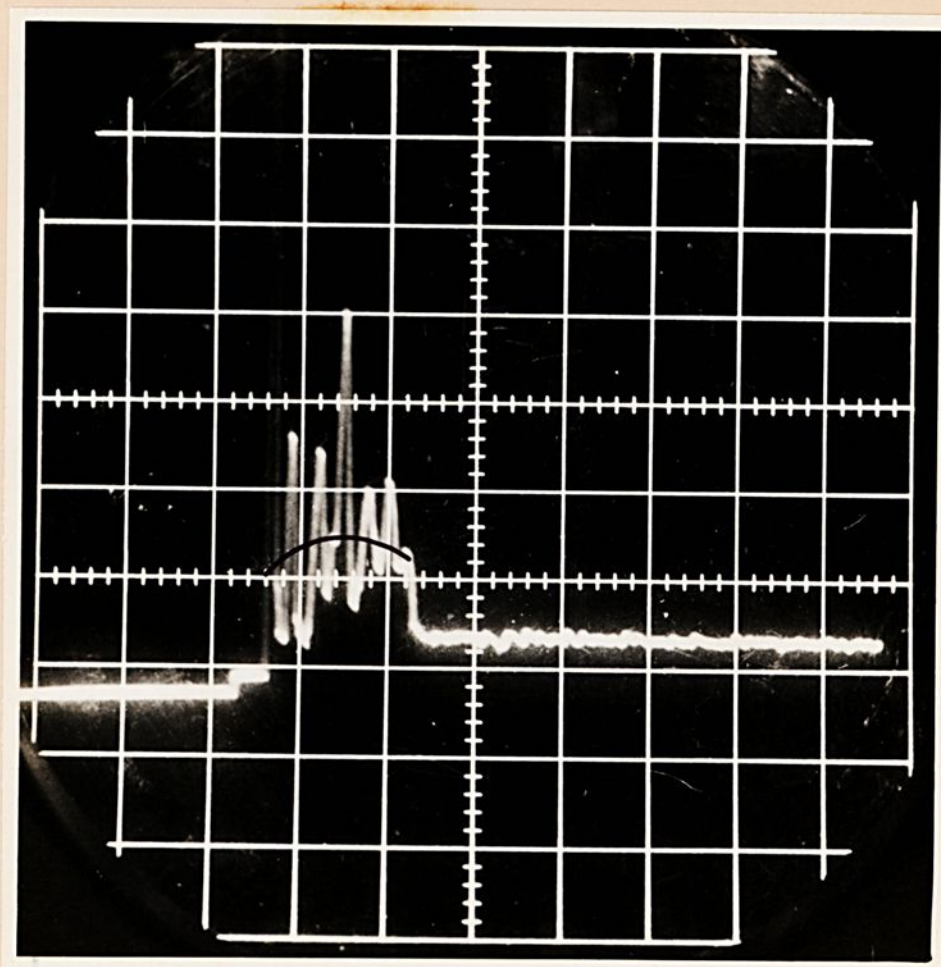


Fig. 2.19

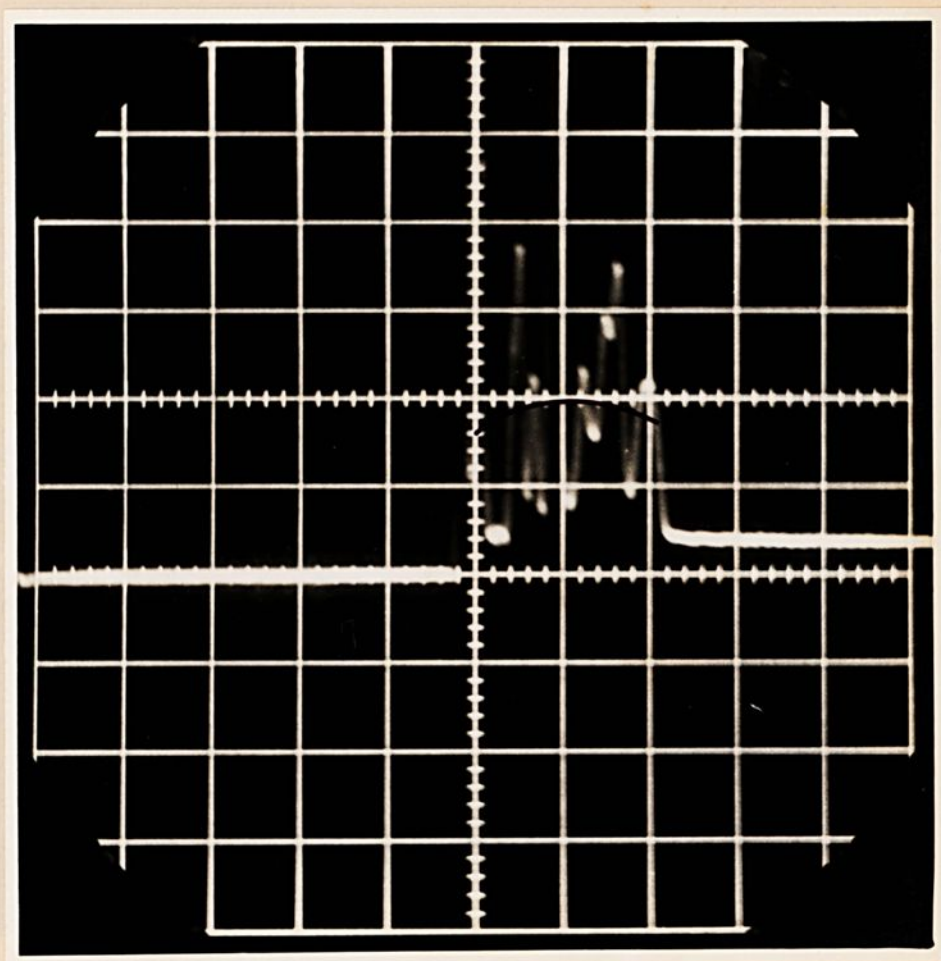


Fig. 2.20

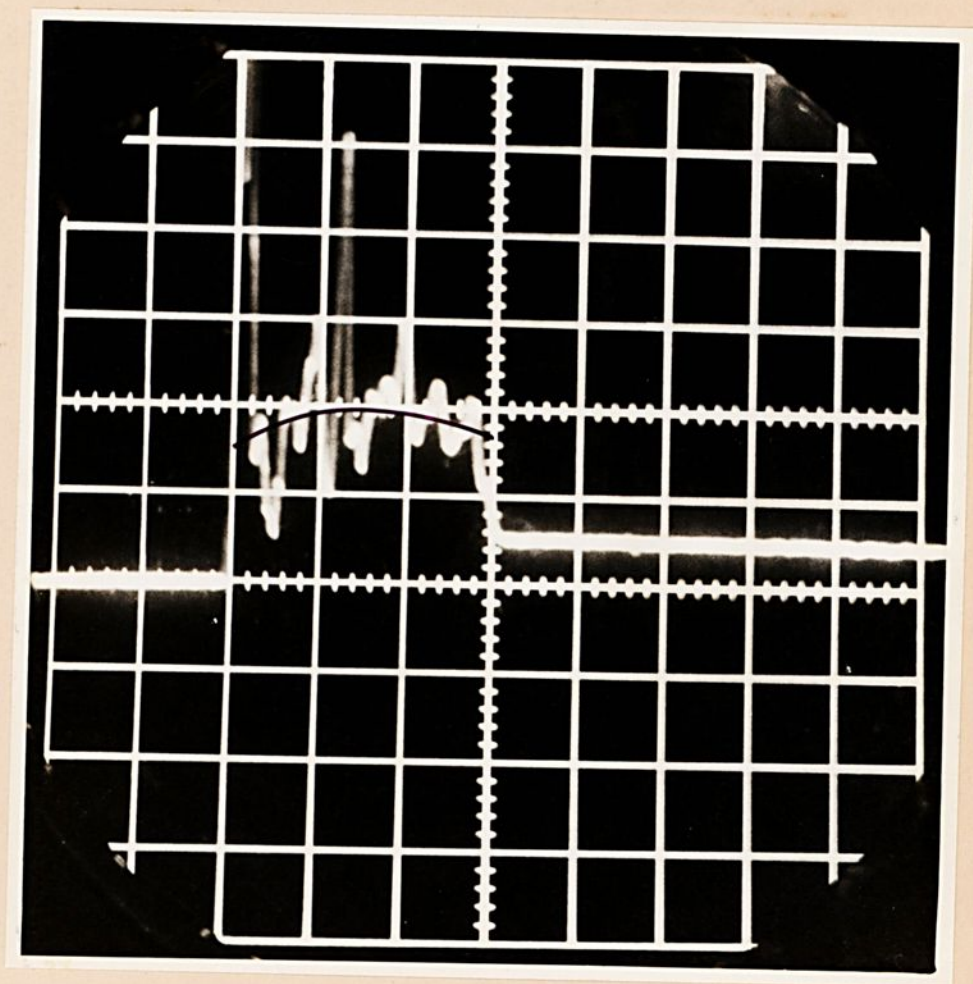


Fig. 2.21

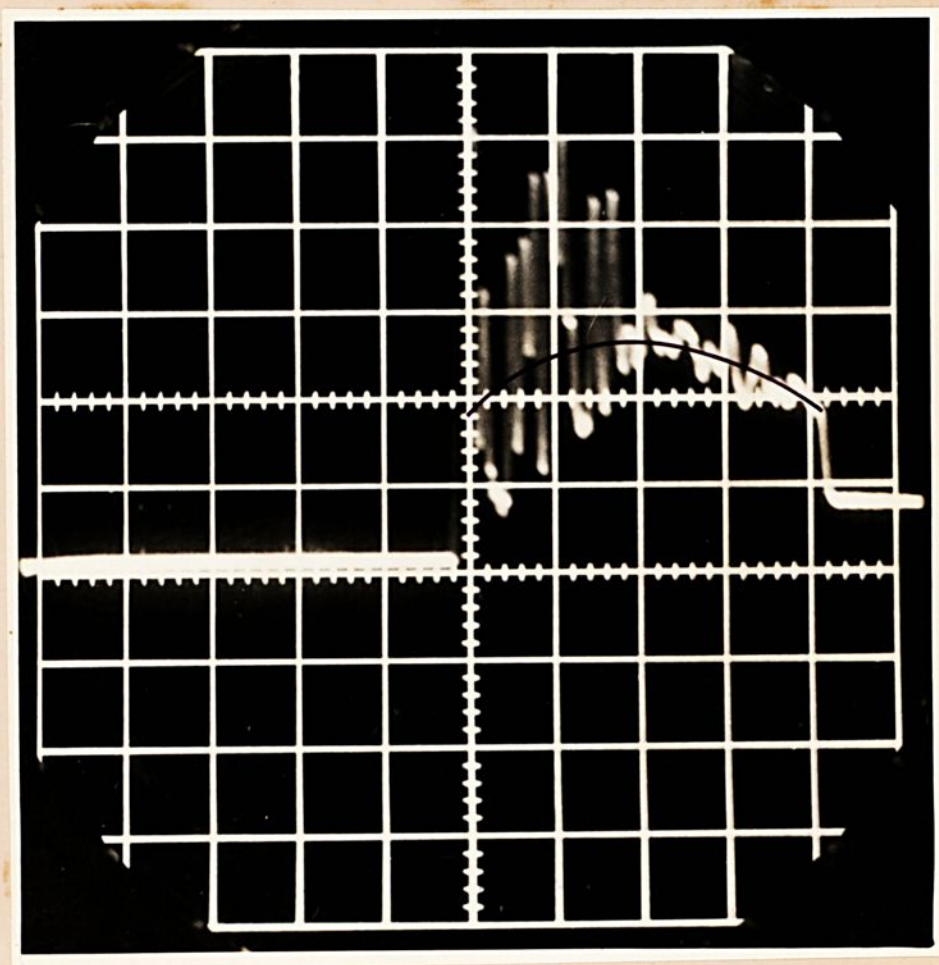


Fig. 2.22

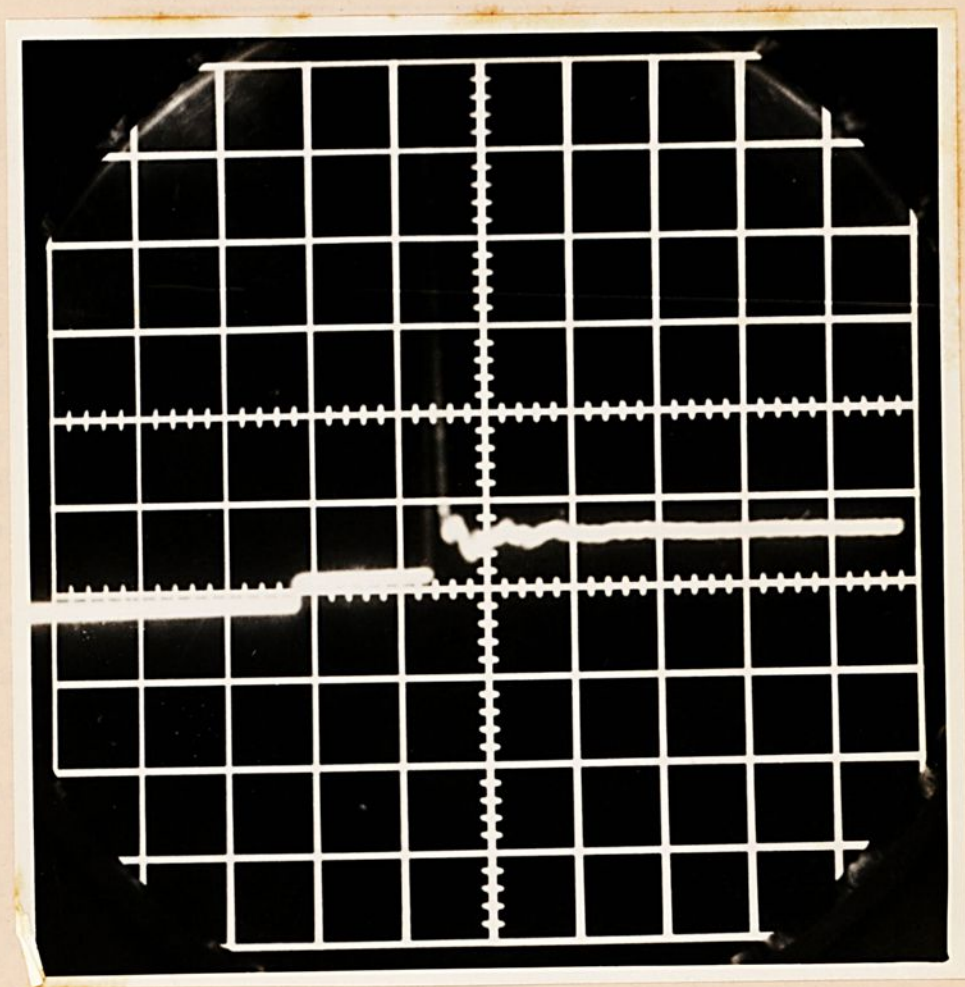


Fig. 2.23

CAPÍTULO III

CONFIABILIDADE DA MEDIDA1. Introdução

Com base nos resultados obtidos dos quais alguns dêles são mostrados nas figuras 2.18 a 2.22 a afirmativa de que o transdutor forneceu um quadro real do processamento da fratura, necessitaria de uma comprovação mais efetiva. Principalmente quando se leva em conta que o transdutor construído não é nada mais do que um equipamento auxiliar de uma máquina de ensaio já existente. Há que se considerar os efeitos da vibração e outros mais que a máquina e, em particular suas partes móveis, poderiam introduzir no sinal mascarando aquele correspondente ao comportamento da fratura.

Visando alcançar êste objetivo o autor realizou uma série de ensaios, medindo simultaneamente o sinal no transdutor e no corpo de prova, em medida direta pela utilização de extensômetros de resistência elétrica colados em seu corpo, na região de maior diâmetro como mostra a figura 3.1.

Todos os corpos de prova foram tirados de uma única barra, visando com isto certeza de todos êles terem as mesmas características físicas.



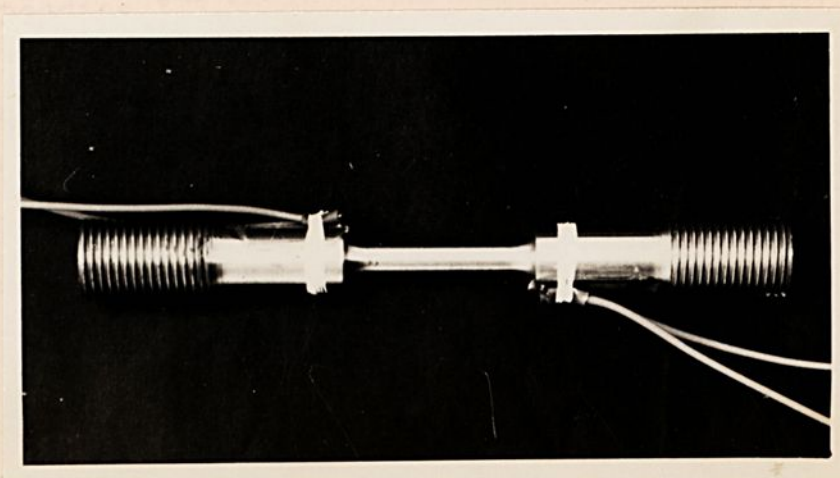
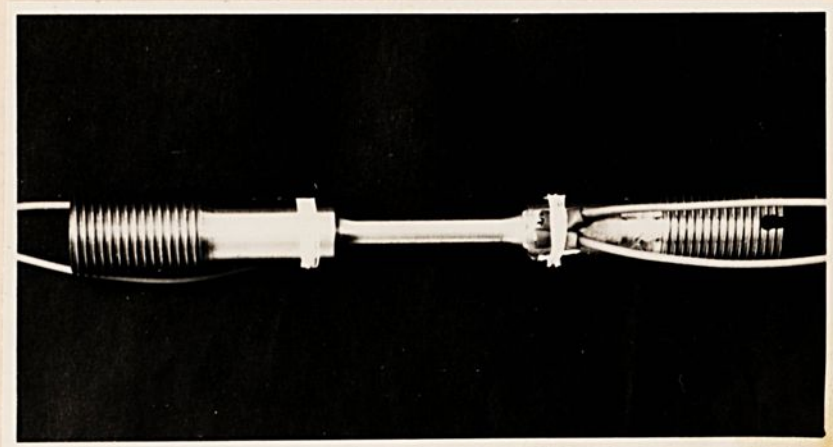


Fig. 3.1

2. O Corpo de Prova. Cálculo dos Parâmetros Auxiliares

O corpo de prova tem o formato mostrado no desenho esquemático da figura 3.2. Foram colados em sua região de maior diâmetro, isto é, fora da região calibrada, dois extensômetros com as seguintes características

$$R_G = 119\Omega$$

$$r = 1,92$$

O circuito utilizado foi o esquematizado na figura 3.3.

Para o aço utilizado no ensaio, AISI 4130 H, temos

$$\sigma_{rup} = 64 \text{ Kg/mm}^2$$

Nota: Ver apêndice III.

Com auxílio destes valores faremos o cálculo de alguns parâmetros auxiliares.

No corpo de prova temos:

$$\phi 5 \text{ mm} \quad A_1 = 19,6 \text{ mm}^2 \quad (\text{região calibrada})$$

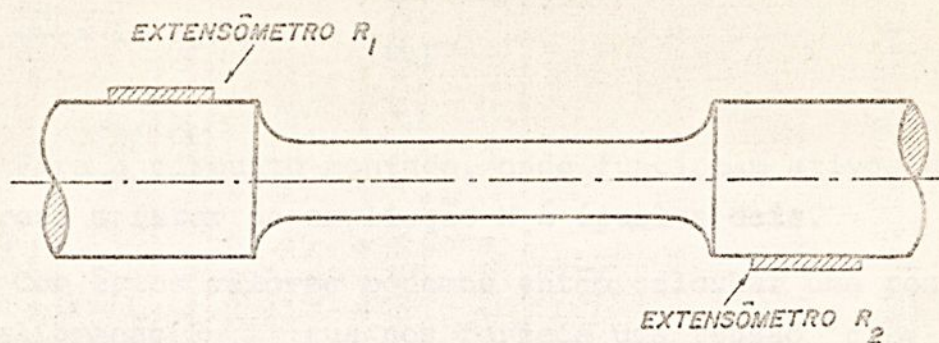
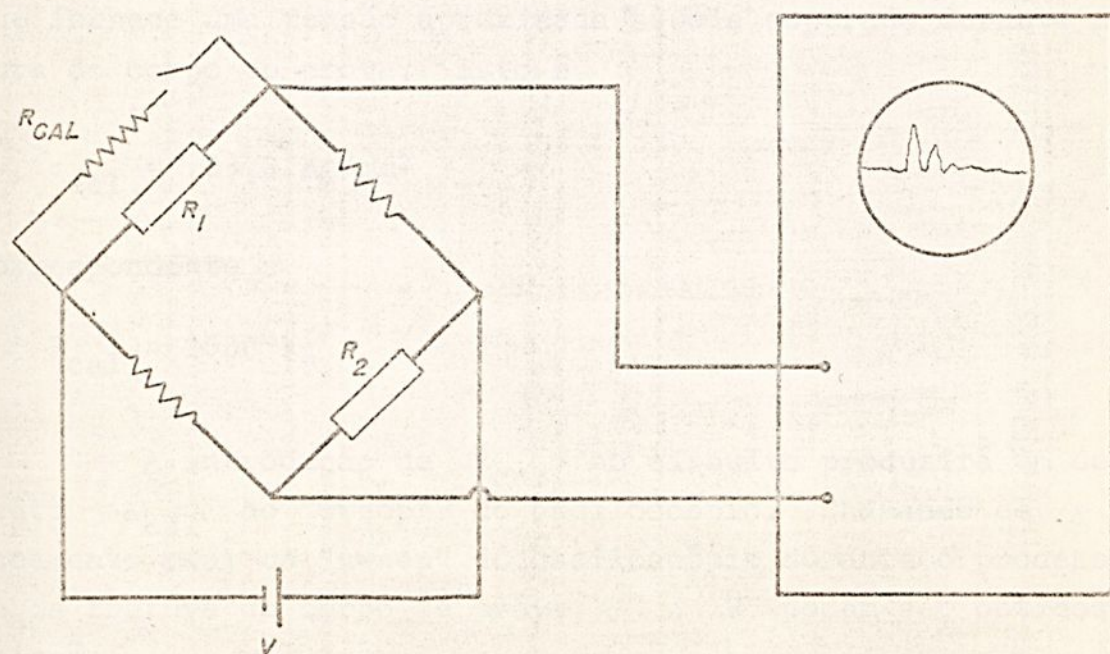
$$\phi 10 \text{ mm} \quad A_2 = 78,5 \text{ mm}^2 \quad (\text{região onde foram colados os extensômetros})$$

Donde se tira que

$$P_1 = \sigma A_1 = 1260 \text{ Kg}$$

em carregamento estático. Para esta carga, na região de maior diâmetro teremos uma tensão correspondente a



FIG. 3.2FIG. 3.3

$$\sigma_2 = \frac{P_1}{A_2} = 16 \text{ Kg/mm}^2 \ll \sigma_{rup}$$

Para o circuito montado, onde funcionam ativos dois extensômetros, o fator de ampliação N é igual a dois.

Com estes valores podemos então calcular uma resistência de calibração R_{cal} que nos forneça uma tensão σ_{cal} simulada, mas que permite o cálculo da tensão real a partir do sinal obtido durante a fratura do corpo de prova, mediante uma simples operação matemática.

A resistência de calibração utilizada foi de

$$R_{cal} = 36,7 \text{ K}\Omega$$

que fornece uma tensão aproximada àquela esperada durante a fratura do corpo de prova. Isto é

$$\sigma_{cal} = 33,8 \text{ Kg/mm}^2$$

correspondente a

$$P_{cal} = 2560 \text{ Kg}$$

A introdução de R_{cal} no circuito produzirá um deslocamento Δ_{cal} do "sweep" do osciloscópio. Chamando de Δ o deslocamento real do "sweep" do osciloscópio durante o processamento da fratura do corpo de prova, σ e P podem ser obtidos pela relação

$$\sigma = \frac{\Delta}{\Delta_{cal}} \sigma_{cal} \quad (3.1)$$

e



$$P = \frac{\Delta}{\Delta_{cal}} P_{cal} \quad (3.2)$$

Tais expressões foram utilizadas mais adiante para comparar os sinais medidos no transdutor e no corpo de prova.

3. Análise Comparativa

O osciloscópio utilizado, Tetronix modelo 502, possui duplo feixe, o que permitiu fotografar simultaneamente os sinais do transdutor e do corpo de prova.

O autor apresenta o resultado de sete ensaios cujas fotografias de sinais são mostradas nas figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10. O "sweep" de baixo é do corpo de prova enquanto que o de cima é do transdutor.

O sinal do transdutor e do corpo de prova também (se bem que em menor escala), como era de se esperar, apresentam oscilações cíclicas que, ao que tudo indica, são provenientes de vibrações da máquina, em particular, de suas partes móveis. Permite, no entanto, o traçado de uma curva média que deverá ser aquela correspondente à fratura.

Uma observação das curvas experimentais obtidas mostram que o processamento da fratura pode ser dividida em três fases distintas: uma fase de crescimento muito rápido da carga e outra onde a carga varia (curvatura acentuada) porém, mantenendo sua ordem de grandeza e, finalmente a de ruptura.

Como o tempo da segunda fase é muito maior que o da primeira, parece ser uma conclusão cabível, que o alongamento do corpo de prova ocorrido na segunda fase seja muito maior que o ocorrido na primeira. Uma vez que a segunda fase se proces-



sa com a carga mantendo a mesma ordem de grandeza, o que é característico das deformações plásticas, podemos dizer, portanto, que nesta fase o alongamento se processa na região plástica.

Em contraposição, na primeira fase, onde a carga varia muito rapidamente com a deformação é de se supor que o fenômeno se adapta bem a uma deformação do tipo elástico. Isto é, há fundamento em atribuírmos uma natureza elástica à pri-meira fase e uma natureza plástica à segunda fase. O ponto de transição entre a primeira e a segunda fase parece corresponder ao limite de escoamento do material. Na continuação do trabalho designaremos tal ponto como "ponto de transição" e a carga e a tensão correspondentes como "carga e tensão de transição".

Para efeito de comparação foi tomado em ambos os "sweeps" uma curva média e delas calculados os valores máxi-mos que a carga atingiu e aquele correspondente à intersecção da curva média com o sinal que se supõe ocorrer durante o processamento da deformação elástica e que o autor denominou de "carga de transição (P_t). Acredita o autor ser a curva média aquela que corresponde ao comportamento que mais se aproxima do real, baseando-se para isso na forma da curva obtida pela medida direta executada nos corpos de prova, e na análise dos efeitos que dão origem às oscilações do sinal.

Para maior segurança da análise comparativa feita, fo-ram utilizados nos ensaios corpos de prova com comprimentos calibrados diferentes, e também variou-se a atenuação (ganho) no ampliador do osciloscópio em um deles.

Façamos o estudo comparativo dos ensaios apresentados.



NOMENCLATURA UTILIZADA

- Osciloscópio

S - atenuação (ganho) em mv/cm

T - velocidade do "sweep" em ms/cm

- Corpo de prova

L_I - comprimento calibrado inicial em mm

L_f - comprimento calibrado final em mm

- Do circuito

Δ_{cal} = deflexão de calibração no transdutor em divisões

$\bar{\Delta}_{cal}$ = deflexão de calibração no corpo de prova em div.

- Da máquina

E - energia consumida na fratura Kgf.m (único dado fornecido pela máquina)

ENSATO 1: Fotografia da figura 3.4

No transdutor:

S = 1 mv/cm

T = 1 ms/cm

Δ_{cal} = 4,0 div.

R_{cal} = 90 K Ω



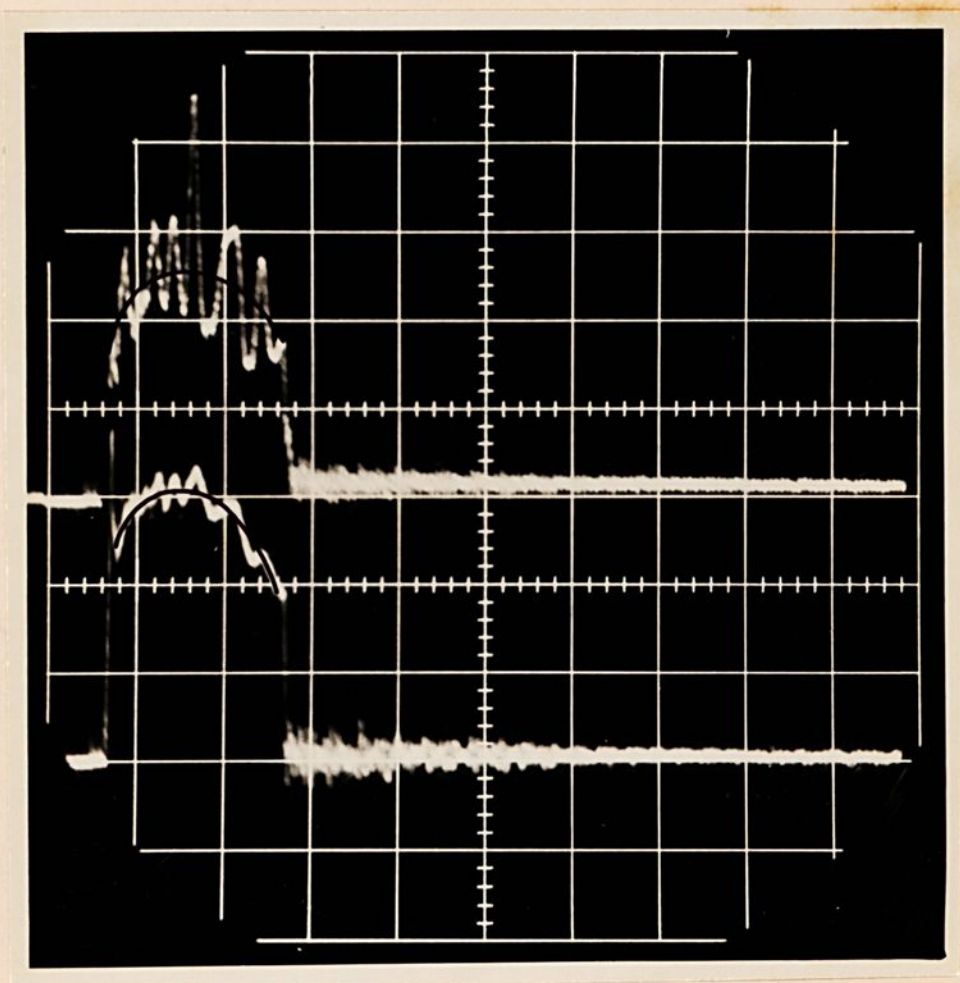


Fig. 3.4

No corpo de prova:

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\bar{\Delta}_{\text{cal}} = 1,8 \text{ div.}$$

$$R_{\text{cal}} = 36,7 \text{ K}\Omega$$

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

$$L_f = 36,5 \text{ mm}$$

$$E = 18,7 \text{ Kgf.m}$$

Valôres calculados

a) No transdutor

Carga máxima P_{max} : $\Delta_{\text{max}} = 2,7 \text{ div.}$ (da fotografia)

$$\frac{\Delta_{\text{max}}}{\Delta_{\text{cal}}} = 0,71 \rightarrow \text{gráfico de calibração} \rightarrow P_{\text{max}} = 2420 \text{ Kg}$$

Carga no limite elástico $\Delta_t = 1,8 \text{ div.}$

$$\frac{\Delta_t}{\Delta_{\text{cal}}} = 0,474 \rightarrow \text{gráfico} \rightarrow P_t = 1620 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura

$$T = 2,0 \text{ ms}$$

b) No corpo de prova

Carga máxima $\bar{P}_{\text{max}}$: $\bar{\Delta}_{\text{max}} = 3,1 \text{ div.}$

$$\Delta_{\text{cal}} = 2560 \text{ Kg}$$

$$\therefore \bar{P}_{\text{max}} = 2490 \text{ Kg}$$

$$\bar{\Delta}_{\text{max}} = \bar{P}_{\text{max}}$$



Carga no limite elástico: $\bar{\Delta}_t = 2,1 \text{ div.}$

$$\bar{P}_t = 1680 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura

$$\bar{T} = 2,0 \text{ ms}$$

Alongamento: 22,6%

ENSAIO 2: Fotografia da fig.3.5

No transdutor:

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\Delta_{cal} = 3,8 \text{ div.}$$

$$R_{cal} = 90 \text{ K}\Omega$$

No corpo de prova

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\bar{\Delta}_{cal} = 3,2 \text{ div.}$$

$$R_{cal} = 36,7 \text{ K}\Omega$$

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

$$L_F = 37 \text{ mm}$$

$$E = 17,5 \text{ Kg.m}$$



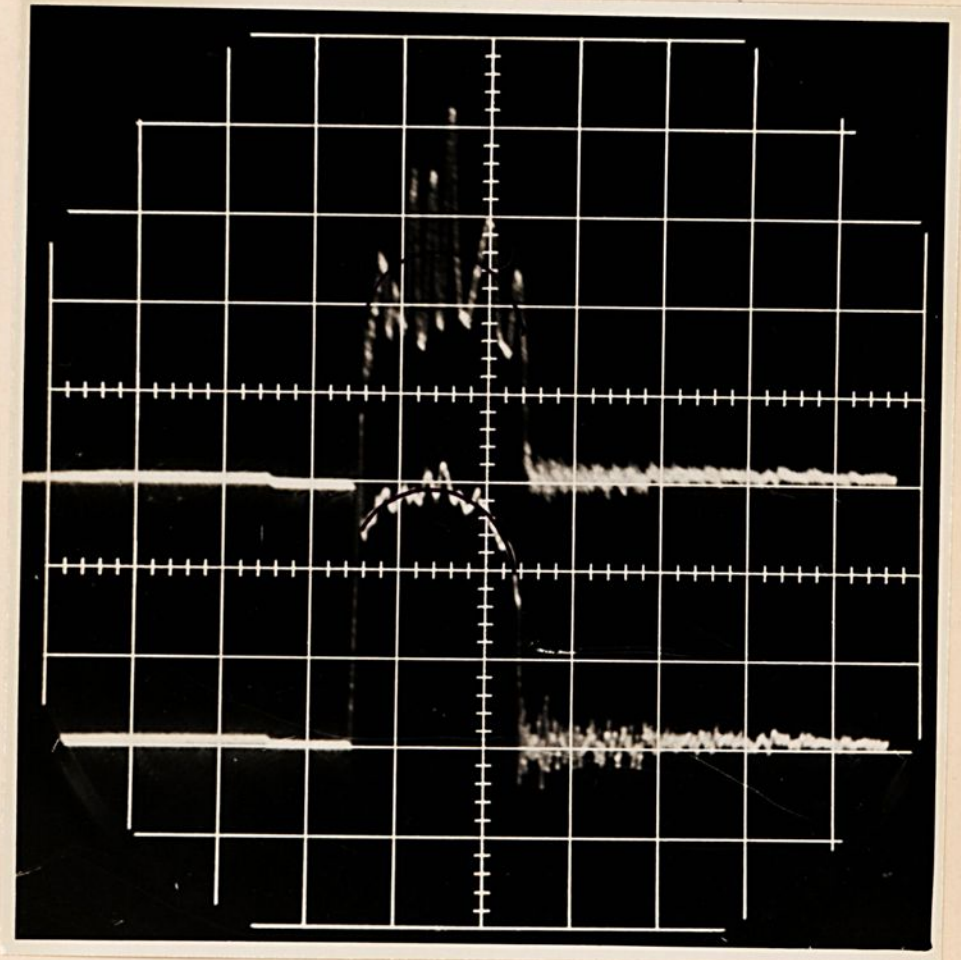


Fig. 3.5

Valores calculados

a) No transdutor

Carga máxima: $\Delta_{\max} = 2,5 \text{ div.}$

$$\frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\text{cal}}} = 0,71 \rightarrow \text{gráfico} \rightarrow P_{\max} = 2410 \text{ Kg}$$

Carga no limite elástico: $\Delta_t = 1,8 \text{ div.}$

$$\frac{\Delta_t}{\Delta_{\text{cal}}} = 0,474 \rightarrow \text{gráfico} \rightarrow P_t = 1680 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura

$$T = 1,9 \text{ ms}$$

b) No corpo de prova

Carga máxima: $\bar{\Delta}_{\max} = 3,0 \text{ div.}$

$$\Delta_{\text{cal}} = 2560$$

$$\therefore \bar{P}_{\max} = 2400 \text{ Kg}$$

$$\bar{\Delta}_{\max} = \bar{P}_{\max}$$

Carga no limite elástico: $\bar{\Delta}_t = 2,1 \text{ div.}$

$$\bar{P}_t = 1680 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura

$$\bar{T} = 1,9 \text{ ms}$$

Alongamento: 23,3 %



ENSAIO 3: Fotografia da fig.3.6

No transdutor:

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\Delta_{\text{cal}} = 3,8 \text{ div.}$$

$$R_{\text{cal}} = 90 \text{ K}\Omega$$

No corpo de prova:

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\bar{\Delta}_{\text{cal}} = 3,2 \text{ div.}$$

$$R_{\text{cal}} = 36,7 \text{ K}\Omega$$

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

$$L_f = 37,3$$

$$E = 17,3 \text{ Kg/cm}^2$$

Valôres calculados

a) No transdutor

$$\text{Carga máxima: } \Delta_{\text{max}} = 2,6 \text{ div.}$$

$$\therefore P_{\text{max}} = 2320 \text{ Kg}$$

$$\text{Carga no limite elástico: } \Delta_t = 1,8 \text{ div.}$$

$$\therefore P_t = 1620 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura:

$$T = 1,8 \text{ ms}$$



b) No corpo de prova

Carga máxima: $\bar{\Delta}_{\max} = 2,9 \text{ div.}$

$$\therefore \bar{P}_{\max} = 2320 \text{ Kg}$$

Carga no limite elástico : $\bar{\Delta}_t = 2,1 \text{ div.}$

$$\therefore \bar{P}_t = 1680 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura:

$$\bar{T} = 1,8 \text{ ms}$$

Alongamento: 24,3%

ENSAIO 4: Fotografia da fig.3.7.

No transdutor:

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\Delta_{\text{cal}} = 3,8 \text{ div.}$$

$$R_{\text{cal}} = 90 \text{ K}\Omega$$

No corpo de prova:

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\bar{\Delta}_{\text{cal}} = 3,2 \text{ div.}$$

$$R_{\text{cal}} = 36,7 \text{ K}\Omega$$

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

$$L_f = 38 \text{ mm}$$

$$E = 16,5 \text{ Kgf.m}$$



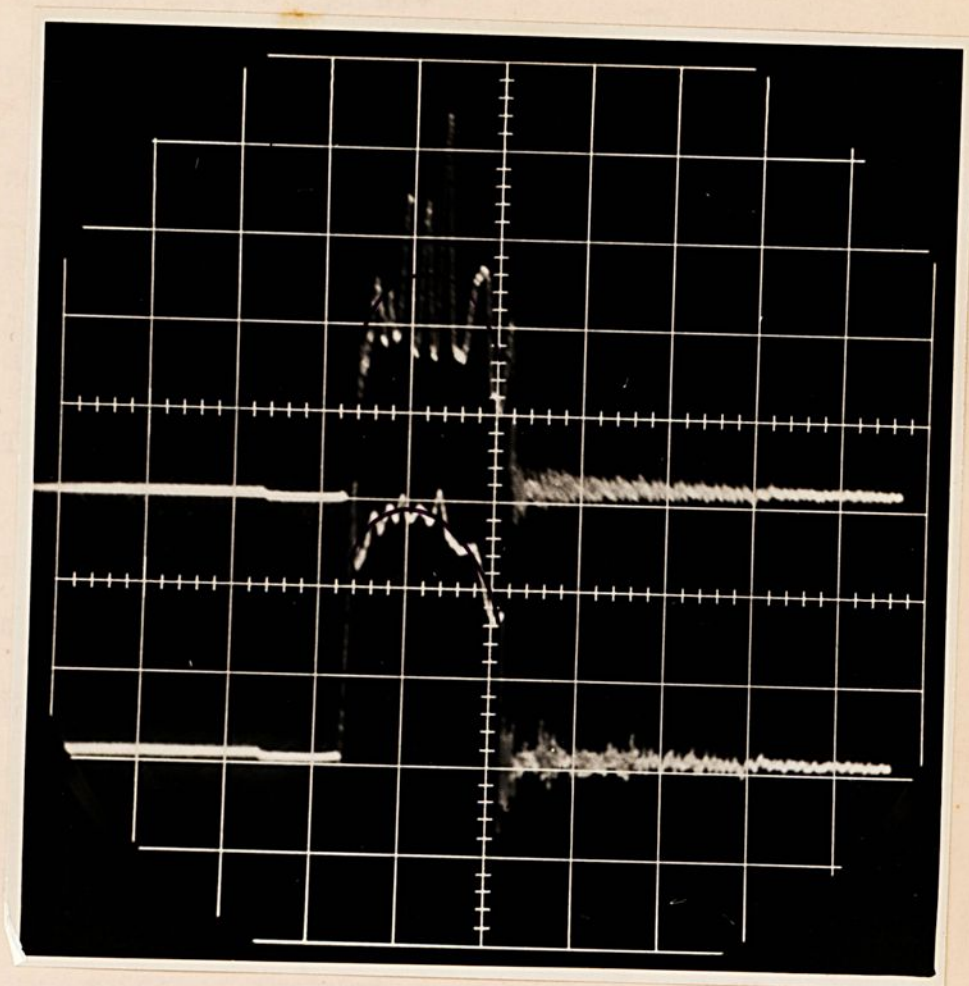


Fig. 3.6

Valôres calculados

a) No transdutor

Carga máxima: $\Delta_{\max} = 2,5 \text{ div.}$

$$\therefore P_{\max} = 2240 \text{ Kg}$$

Carga no limite elástico: $\Delta_t = 1,8$

$$\therefore P_t = 1620 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura:

$$T = 1,8 \text{ ms}$$

b) No corpo de prova

Carga máxima: $\bar{\Delta}_{\max} = 2,8 \text{ div.}$

$$\therefore \bar{P}_{\max} = 2240 \text{ Kg}$$

Carga no limite elástico: $\bar{\Delta}_t = 2,0 \text{ div.}$

$$\bar{P}_t = 1600 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura

$$\bar{T} = 1,8 \text{ ms}$$

Alongamento: 26,6%



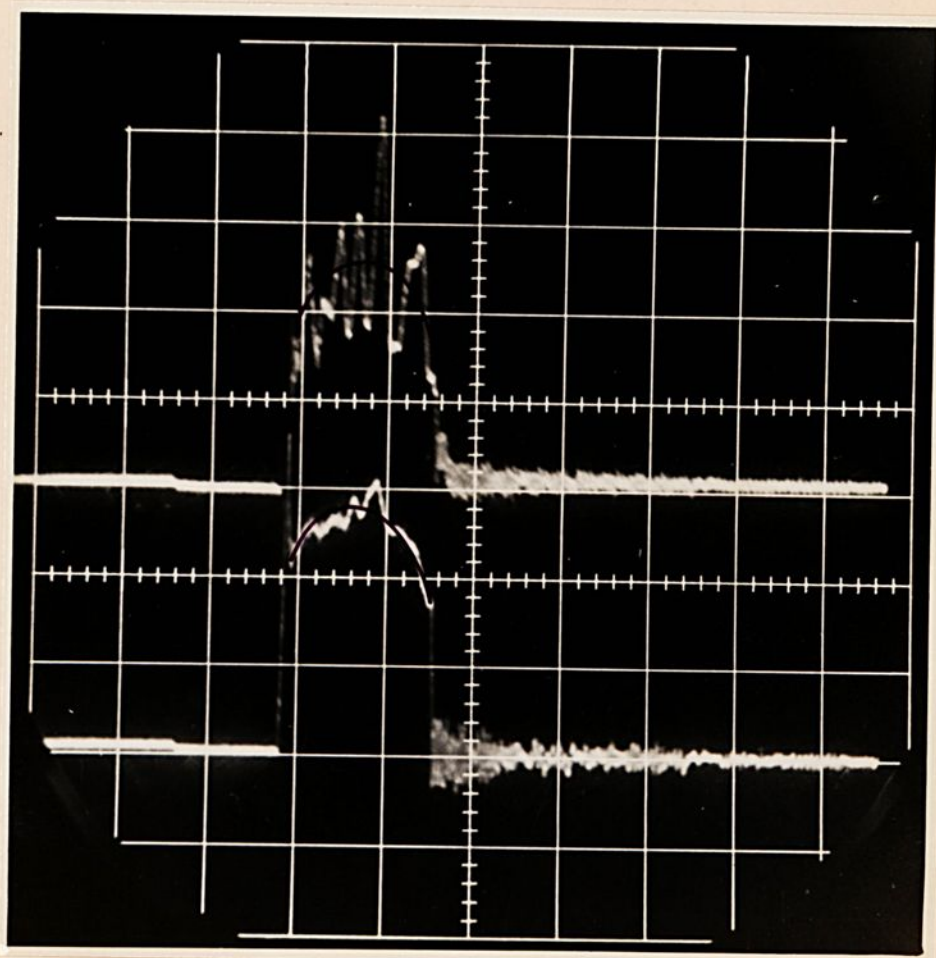


Fig. 3.7

ENSATO 5: Fotografia da fig.3.8.

No transdutor

$$S = 2 \text{ mv/cm (modificada)}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\Delta_{cal} = 2,2 \text{ div.}$$

$$R_{cal} = 90 \text{ K}\Omega$$

No corpo de prova

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\bar{\Delta}_{cal} = 3,7 \text{ div.}$$

$$R_{cal} = 36,7 \text{ K}\Omega$$

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

$$L_f = 42,5 \text{ mm}$$

$$E = 21,5 \text{ Kgf.m}$$

Valores calculados

a) No transdutor

$$\text{Carga máxima: } \Delta_{max} = 2,2 \text{ div.}$$

$$P_{max} = 2580 \text{ Kg}$$

$$\text{Carga no limite elástico: } \Delta_t = 1,0 \text{ div.}$$

$$P_t = 1530 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura:

$$T = 2,6 \text{ ms}$$



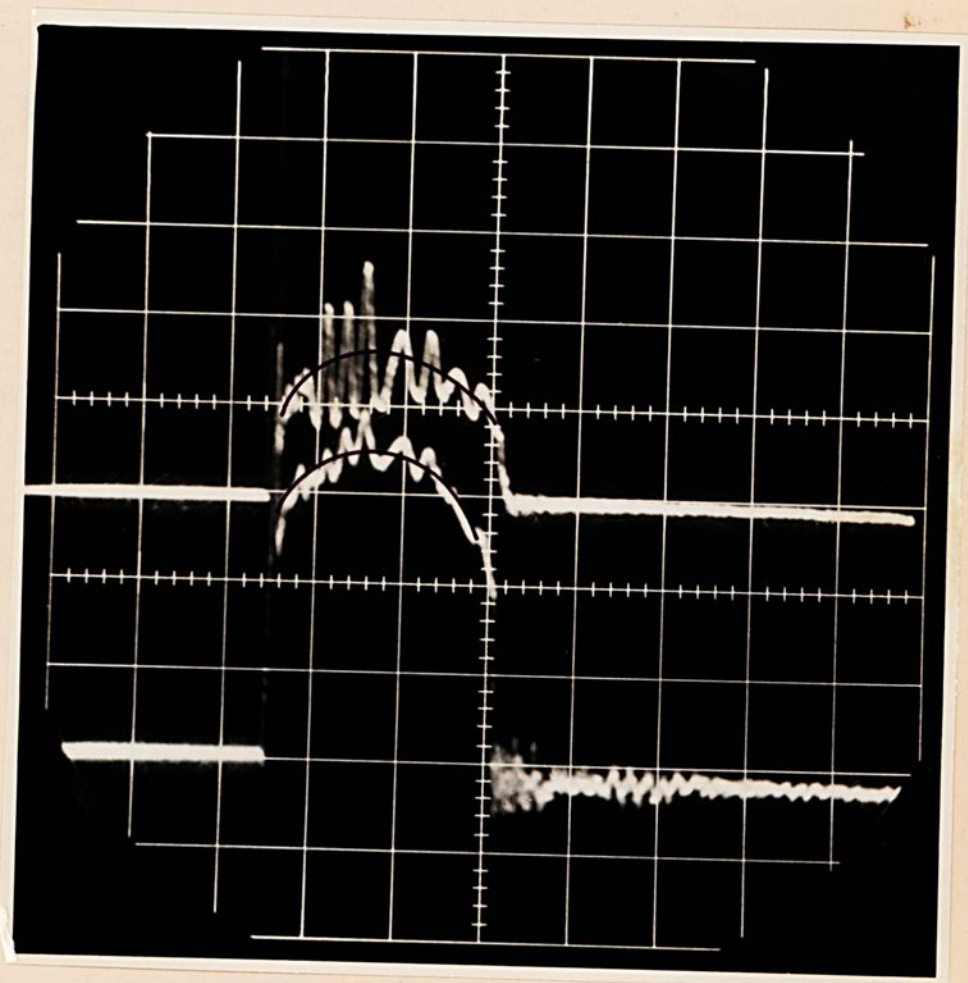


Fig. 3.8

b) No corpo de prova

Carga máxima: $\bar{\Delta}_{\max} = 3,6 \text{ div.}$

$\bar{P}_{\max} = 2510 \text{ Kg}$

Carga no limite elástico: $\bar{\Delta}_t = 2,4 \text{ div.}$

$\bar{P}_t = 1620 \text{ Kg}$

Tempo decorrido na fratura:

$\bar{T} = 2,6 \text{ ms}$

Alongamento: 21,4%

ENSAIO 6: Fotografia da Fig.3.9.

No transdutor:

$S = 1 \text{ mv/cm}$

$T = 1 \text{ ms/cm}$

$\Delta_{\text{cal}} = 3,8 \text{ div.}$

$R_{\text{cal}} = 90 \text{ K}\Omega$

No corpo de prova:

$S = 1 \text{ mv/cm}$

$T = 1 \text{ ms/cm}$

$\bar{\Delta}_{\text{cal}} = 3,2 \text{ div.}$

$R_{\text{cal}} = 36,7 \text{ K}\Omega$

$L_I = 35 \text{ mm}$

$L_f = 43 \text{ mm}$

$E = 20,7 \text{ Kgf.m}$



Valôres calculados:

a) No transdutor

Carga máxima: $\Delta_{\max} = 2,9 \text{ div.}$

$$P_{\max} = 2600 \text{ Kg}$$

Carga no limite elástico: $\Delta_{el} = 2,0 \text{ div.}$

$$P_{el} = 1790 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura:

$$T = 2,0 \text{ ms}$$

b) No corpo de prova

Carga máxima: $\bar{\Delta}_{\max} = 3,3 \text{ div.}$

$$\bar{P}_{\max} = 2640 \text{ Kg}$$

Carga no limite elástico: $\bar{\Delta}_t = 2,2 \text{ div.}$

$$\bar{P}_t = 1760 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura

$$\bar{T} = 2,0 \text{ ms}$$

Alongamento: 22,8%



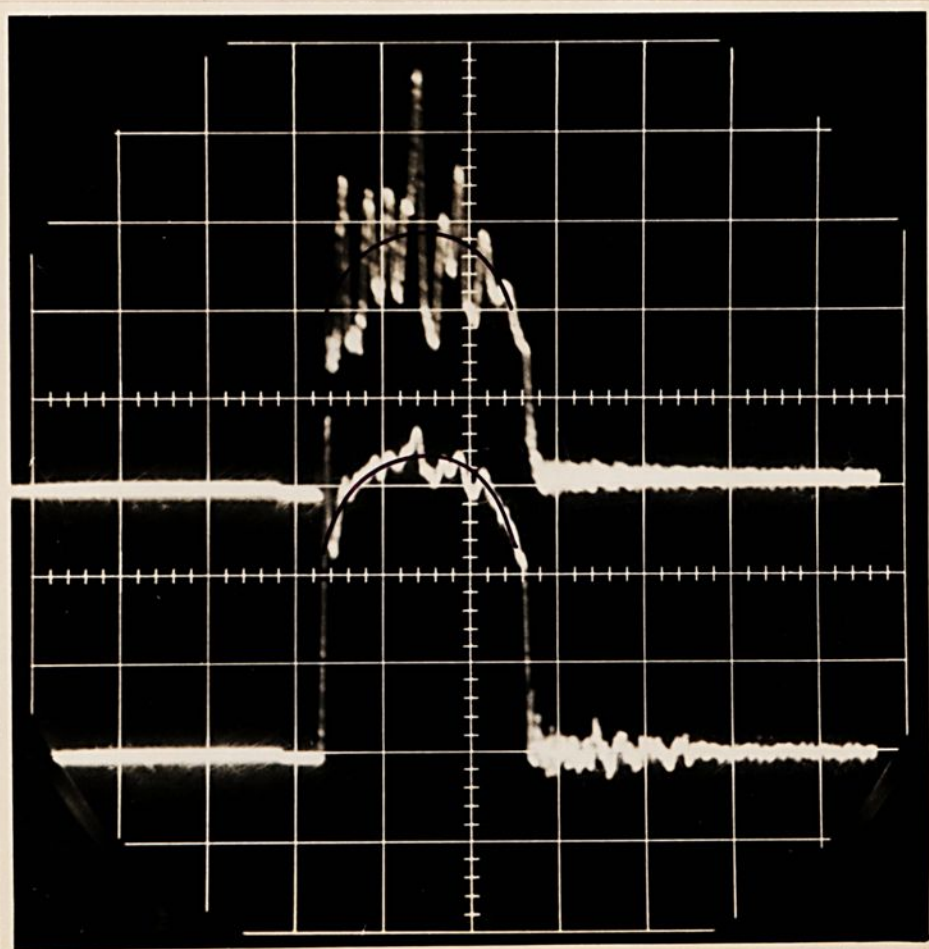


Fig. 3.9

ENSAIO 7: Fotografia da figura 3.10.

No transdutor:

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\Delta_{\text{cal}} = 3,8 \text{ div.}$$

$$R_{\text{cal}} = 90 \text{ K}\Omega$$

No corpo de prova:

$$S = 1 \text{ mv/cm}$$

$$T = 1 \text{ ms/cm}$$

$$\Delta_{\text{cal}} = 3,2 \text{ div.}$$

$$R_{\text{cal}} = 36,7 \text{ K}\Omega$$

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

$$L_F = 42 \text{ mm}$$

$$E = 18,5 \text{ Kgf.m}$$

Valôres calculados:

a) No transdutor

$$\text{Carga máxima: } \Delta_{\text{max}} = 2,9 \text{ div.}$$

$$P_{\text{max}} = 2240 \text{ Kg}$$

$$\text{Carga no limite elástico: } \Delta_t = 1,8 \text{ div.}$$

$$P_t = 1680 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura

$$T = 2,0 \text{ ms}$$



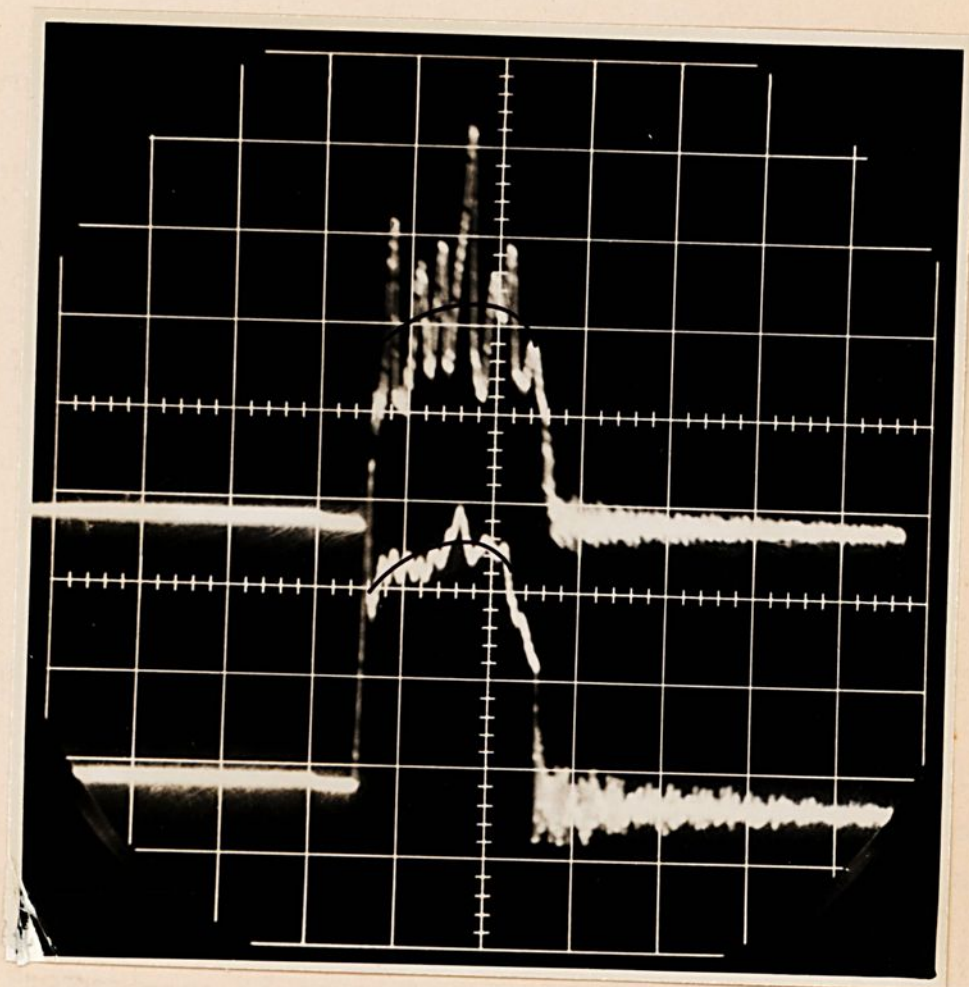


Fig. 3.10

b) No corpo de prova

Carga máxima: $\bar{A}_{\max} = 2,7 \text{ div.}$

$$\bar{P}_{\max} = 2240 \text{ Kg}$$

Carga no limite elástico: $\bar{A}_t = 2,1 \text{ div.}$

$$\bar{P}_t = 1680 \text{ Kg}$$

Tempo decorrido na fratura:

$$T = 2,0 \text{ ms}$$

Alongamento: 20%

4. Conclusões

Como se verifica das informações apresentadas na tabela 3.1, a precisão dos resultados obtidos no transdutor, comparadamente com aqueles medidos diretamente no corpo de prova, é muito boa.

Porém, como já se tinha observado no capítulo anterior, oscilações de caráter cíclico mascaram o sinal do fenômeno não só o medido pelo transdutor como também o medido no corpo de prova. Em ambos os sinais foi necessário traçar uma curva média, sendo que no transdutor estes efeitos cíclicos foram mais intensos.

Apesar da afirmativa feita anteriormente de que tais



efeitos resultavam da vibração da máquina, em particular de suas partes móveis, sob ação do impacto, tal acertiva merece uma maior comprovação.

Estes efeitos, numa hipótese inicial, podem resultar de micro (ondas de propagação de tensões no sistema), ou macro (vibração do sistema) ondas originadas do impacto; ou ainda da combinação dêles.

Façamos uma análise dos efeitos que cada um dêstes dois fenômenos poderia acarretar.

a) Ondas de propagação de tensões:

Nas aplicações instantâneas de carga a elementos estruturais, particularmente aquelas de impacto onde as cargas aplicadas são elevadas, a propagação das tensões, sob forma de ondas ocorre nos elementos estruturais solicitados, uma vez que estas cargas não são transmitidas instantaneamente a tôdas as partes dêstes elementos.

Há uma grande variedade de ondas de tensão dependendo do método de aplicação da carga externa, das dimensões, formas, material dos elementos estruturais e da razão tensão-deformação. Nos metais os tipos de ondas de tensão mais conhecidos são as "ondas longitudinais planas" e as "transversais" também chamadas de "ondas de cisalhamento". Existem evidentemente outros tipos mais complexos, porém as mais comumente encontradas são as duas citadas.

As ondas de propagação do tipo plano, desenvolvendo-se num meio elástico, é característica do material e sua velocidade de propagação é igual à do som no material. No caso de eixos a expressão que permite seu cálculo aproximado é dado por



$$C_e = (E/\rho)^{1/2}$$

onde:

C_e - velocidade de propagação

E - módulo de Young

ρ - densidade do material

Com esta ligeira introdução ao estudo das ondas de propagação de tensões, o autor passa então à análise do dispositivo projetado.

O sistema idealizado para tal análise é o mostrado na figura 3.11. Todos os componentes do sistema são de aço menos o corpo de prova que poderia ser de um outro metal; faremos no entanto a análise, admitindo-o de aço por haveremos constatado que para a totalidade dos materiais comumente utilizados em construção mecânica, as velocidades de propagação de onda (C_e) são da mesma ordem de grandeza. Isto é:

$$(C_e)_{\text{longitudinal}} = 6\,000 \text{ m/s}$$

$$(C_e)_{\text{transversal}} = 3\,250 \text{ m/s}$$

Os efeitos de propagação longitudinal se fazem sentir nos elementos 1 e 3 da figura 3.11; e longitudinal na 2.

Com os dados existentes é possível calcular os tempos característicos (t_e) para propagação das ondas no sistema. Temos:

$$t_e = \frac{(25+70) \cdot 10^{-3}}{(C_e)_l} + \frac{35 \cdot 10^{-3}}{(C_e)_t} = 26,6 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$



isto é,

$$t_e = 26,6 \mu s$$

que corresponde ao valor aproximado do tempo característico para propagação de ondas de tensões no sistema de medição.

Atentemos agora para os valores experimentais obtidos e indicados nas figuras de 3.4 a 3.10. Tomemos um dêles, por exemplo o ensaio 1, fig.3.4 e determinemos o tempo característico para propagação de uma onda. Da figura tiramos:

$$8 \text{ picos} \rightarrow 2 \text{ ms}$$

Logo

$$t'_e = 250 \mu s$$

Os valores encontrados nos outros ensaios são da mesma ordem de grandeza. Vemos, portanto, que o valor t'_e é muito maior que o t_e . Consequentemente podemos afirmar que as oscilações que mascaram o sinal do transdutor e, em menor escala, do corpo de prova (note-se a correspondência das oscilações nos dois sinais), não se originam da propagação das ondas de tensões no sistema. São consequentemente macro-ondas originadas pelas vibrações surgidas na máquina, particularmente em suas partes móveis.

b) Vibração no sistema

Façamos então uma análise matemática do sistema, procurando determinar a frequência das oscilações que suas partes móveis, no caso a base de tração, introduzem no sinal do transdutor. Do sistema idealizado e mostrado na figura II.1 (Apêndice II), podemos calcular



$$\frac{K}{2} = \frac{EA}{l} = 1,23 \cdot 10^6 \text{ Kgf/cm}$$

isto é:

$$K = 2,46 \cdot 10^6 \text{ Kgf/cm}$$

onde

E - módulo de Young

A - área da secção do pino do transdutor

l - comprimento do pino do transdutor

Igualmente para o corpo de prova tiramos

$$k = 0,0982 \cdot 10^6 \text{ Kgf/cm}$$

Este cálculo foi mais complexo por termos no corpo de prova partes com secções diferentes, funcionando assim como "molas" em série. Tomamos o corpo de prova com secção calibrada de comprimento igual a 3 cm.

Observa-se que $K \gg k$. E ainda mais; como durante o processamento da fratura "E" e "A" diminuem e l' cresce, k torna-se então menor ainda.

Consequentemente, como primeira aproximação, pode-se admitir o sistema na ocorrência do processamento da fratura, como tendo apenas um grau de liberdade, isto é, apenas os pinos do transdutor com efeito de mola. O novo sistema idealizado seria então o mostrado na fig.3.12. Dêle podemos calcular:

$$w = 1,32 \text{ Kg} \quad (\text{base de tração})$$

$$\therefore w = \left(\frac{K}{m}\right)^{1/2} = 42,8 \cdot 10^3 \text{ rd/s}$$



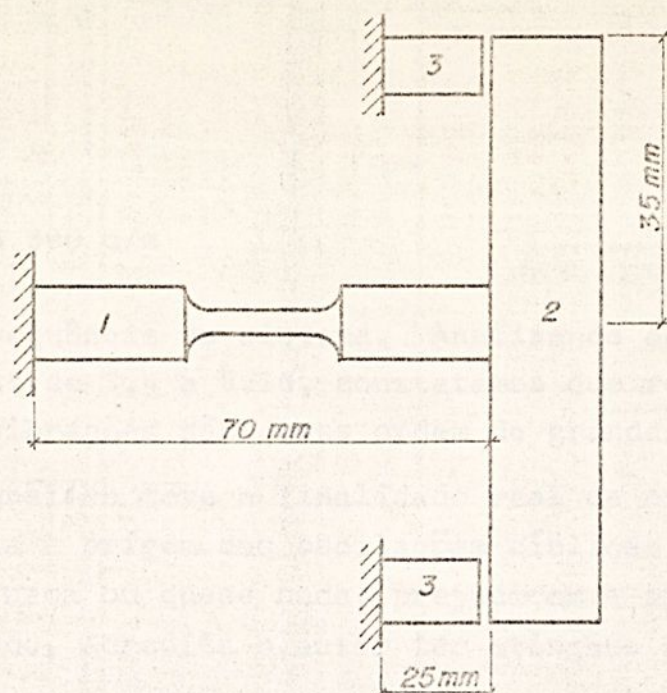


FIG.: 3.11

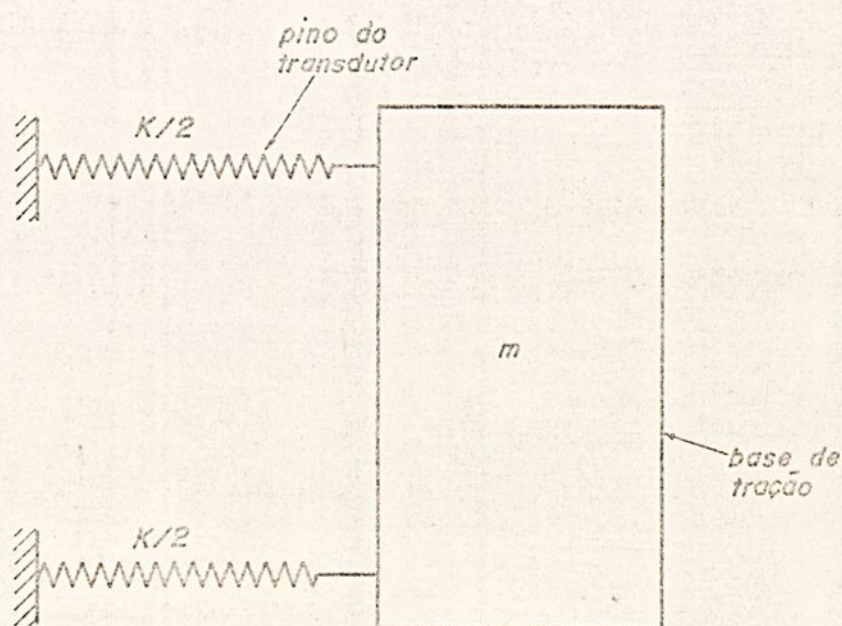


FIG.: 3.12

Logo

$$f = \frac{W}{2\pi} = 6\ 800\text{ c/s}$$

que seria a frequência do sistema. Analisando os valores mostrados nas figuras de 3.4 a 3.10, constatamos que realmente as frequências das vibrações são dessa ordem de grandeza.

Tal análise teve a finalidade real de explicar de maneira satisfatória a origem das oscilações cíclicas do sinal que, existindo, em nada ou quase nada, prejudicam a precisão da medida. Assim sendo, acredita o autor ter atingido o objetivo a que se propôs.



Ensaio nº	Figura nº	Comp. Cali- brado "L" (mm)	No Corpo de Prova		No Transdutor		Desvio +	
			P _t (Kg)	P _{max} (Kg)	P _t (Kg)	P _{max} (Kg)	de P _t %	de P _{max} %
1	3.4	30	1680	2490	1620	2420	4,5	2,8
2	3.5	30	1680	2400	1680	2410	0	0,4
3	3.6	30	1680	2320	1620	2320	4,5	0
4	3.7	30	1600	2240	1620	2240	1,3	0
5	3.8	35	1620	2510	1530	2580	5,5	2,8
6	3.9	35	1760	2640	1790	2600	1,7	1,5
7	3.10	35	1680	2240	1680	2240	0	0

+ Foram tomados como referência os valores medidos no corpo de prova.



CAPÍTULO IV

ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES
FÍSICAS DE UM AÇO SOB AÇÃO DE CARREGAMENTO
ESTÁTICO E DINÂMICO

1. Introdução

O objetivo do presente trabalho consistiu realmente no projeto, construção, calibração e prova de confiabilidade de um transdutor para medidas de cargas dinâmicas que ocorrem em ensaios de tração, numa máquina de ensaio do tipo martelo-pêndulo.

O autor, em face dos resultados obtidos e discutidos no capítulo III, acredita que este objetivo foi plenamente alcançado.

Quer, no entanto, no presente capítulo mostrar o procedimento normal de uma análise dinâmica e de uma análise comparativa do comportamento de um material sob carregamento estático e sob carregamento dinâmico.

2. Procedimento

O material utilizado foi o aço 4130 H de produção nacional. Sendo um ensaio comparativo, tomou-se uma única barra e dela foram retirados todos os corpos de prova tanto para os ensaios estáticos como para os dinâmicos.

Nos ensaios estáticos utilizaram-se corpos de prova padronizados com diâmetro e comprimento da seção calibrada de 10mm e 50,8mm (duas polegadas), respectivamente. Mediu-se carga de



escoamento e ruptura, retirado do diagrama carga vs deformação fornecida pela máquina donde foram calculadas as respectivas tensões. Calculou-se ainda o alongamento e a estrição.

Nos ensaios dinâmicos o procedimento foi o mesmo já descrito no capítulo anterior. Em adição calculou-se ainda a estrição. Atente-se para o fato de que o alongamento foi calculado segundo o comprimento calibrado do corpo de prova em questão.

3. Ensaio Estático. Resultados

- Corpo de prova

Diâmetro: 10 mm

Comprimento calibrado : 50,8 mm

Área da seção calibrada: 0,785 cm²

Os resultados são mostrados na tabela 4.1.

4. Ensaio Dinâmico. Resultados

O corpo de prova utilizado foi do tipo mostrado na figura 2.17. Na presente análise forneceremos o valor da tensão de transição calculado a partir do que chamamos no capítulo anterior de carga de transição.

Os resultados obtidos estão na tabela 4.2 e os parâmetros de ensaio constam na mesma folha da figura.



TABELA 4 . 1

ENSAIOS ESTÁTICOS

Ensaio nº	σ_{eso} (Kg/cm ²)	σ_{rup} (Kg/cm ²)	Alongamento (%)	Estrição (%)
1	3310	5450	32,4	68,6
2	3360	5480	31,1	68,6
3	3390	5480	34,1	68,6
4	3410	5450	31,9	68,6
5	3410	5440	31,6	68,6

$$(\sigma_{\text{eso}})_{\text{médio}} = 3380 \text{ Kg/cm}^2$$

$$(\sigma_{\text{rup}})_{\text{médio}} = 5460 \text{ Kg/cm}^2$$



ENSAIOS DINÂMICOS

Figura Nº	L (mm)	σ_t (Kg/cm ²)	σ_{rup} (Kg/cm ²)	Alongamento %	Extricação %
4.1	20	6420	8360	30	70,8
4.2	20	6320	8370	27	68,6
4.3	25	6430	8620	25,2	70,8
4.4	25	6430	8620	24,8	70,8
4.5	30	6270	8400	24,6	70,8
4.6	30	6530	8250	27,7	70,8
4.7	35	6430	8670	25,7	70,8
4.8	35	6530	8660	23,3	70,8
4.9	40	6880	8150	22,5	68,6
4.10	40	6520	9850	22,5	66,4
4.11	40	7000	9850	22,5	66,4
4.12	40	6640	8320	22,0	64,0
4.13 +	40	6640	8320	-	-

+ - Não fraturou. Houve alongamento e extricação apreciáveis (23,5% e 64,0% respectivamente), porém não chegou a se processar a fratura.

$$(\sigma_t)_{\text{médio}} = 6540 \text{ Kg/cm}^2$$

$$(\sigma_{rup})_{\text{médio}} = 8650 \text{ Kg/cm}^2$$



5. Comentários

Nota-se, por uma análise das grandezas das tensões obtidas experimentalmente, que tanto nos ensaios estáticos como nos dinâmicos, foram bastante uniformes.

No ensaio estático obtivemos como valor médio

$$\sigma_{esc} = 3380 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{rup_1} = 5460 \text{ Kg/cm}^2$$

enquanto que no dinâmico obtivemos

$$\sigma_t = 6540 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{rup_2} = 8650 \text{ Kg/cm}^2$$

Para o material ensaiado nota-se, portanto, que a tensão de ruptura dinâmica é cerca de 58,4% maior que o estático. De certa maneira, tal resultado contraria o princípio geralmente aplicado de ser a tensão de ruptura sob carregamento dinâmico da ordem de duas vezes o estático.

Quanto ao alongamento e estrição os valores foram também diferentes cabendo ainda uma observação. No ensaio dinâmico, ao que tudo indica, a dimensão do comprimento calibrado tem influência nestes parâmetros, contrariamente ao que ocorreu com as tensões.

No entanto, o autor furta-se a aprofundar a análise por não ser no caso o objetivo do presente trabalho. Acredita, no entanto, ter fornecido uma orientação de como tal tipo de análise pode ser processada.



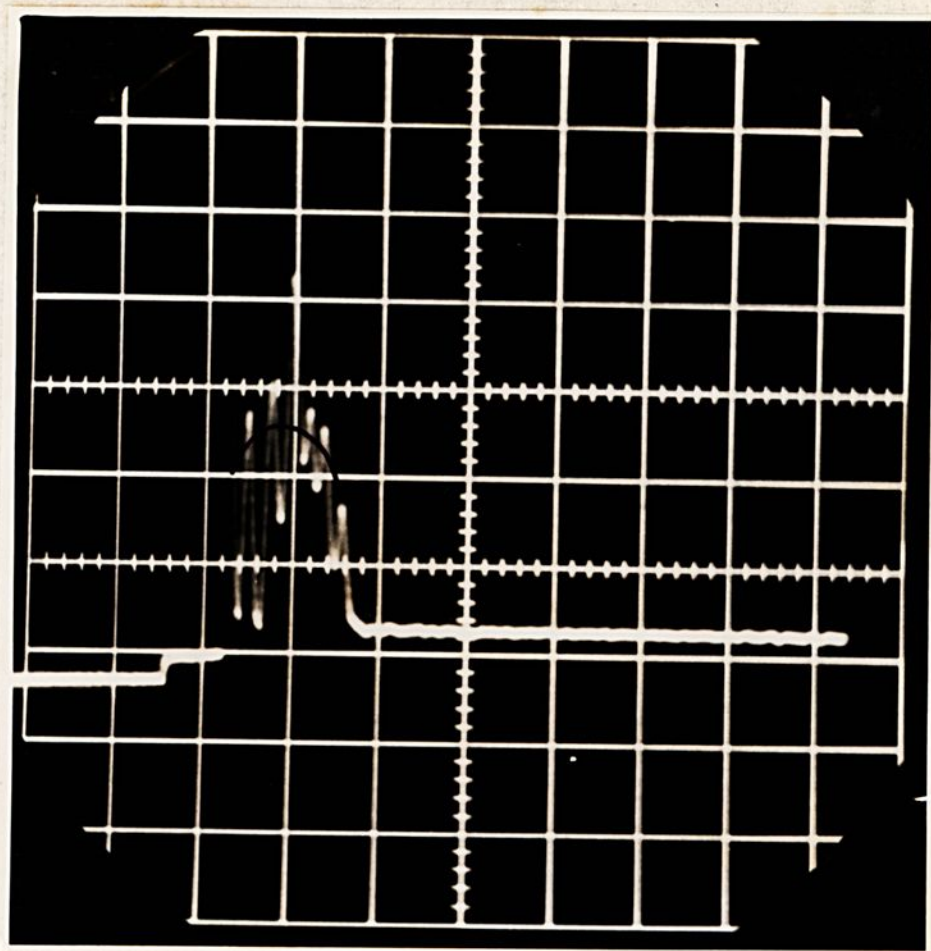


Fig.4.1

- Corpo de prova : $L_i = 20 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 26 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,7 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 5,6 \text{ div.}$
- No osciloscópio: $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 13,4 \text{ Kg.f.m}$

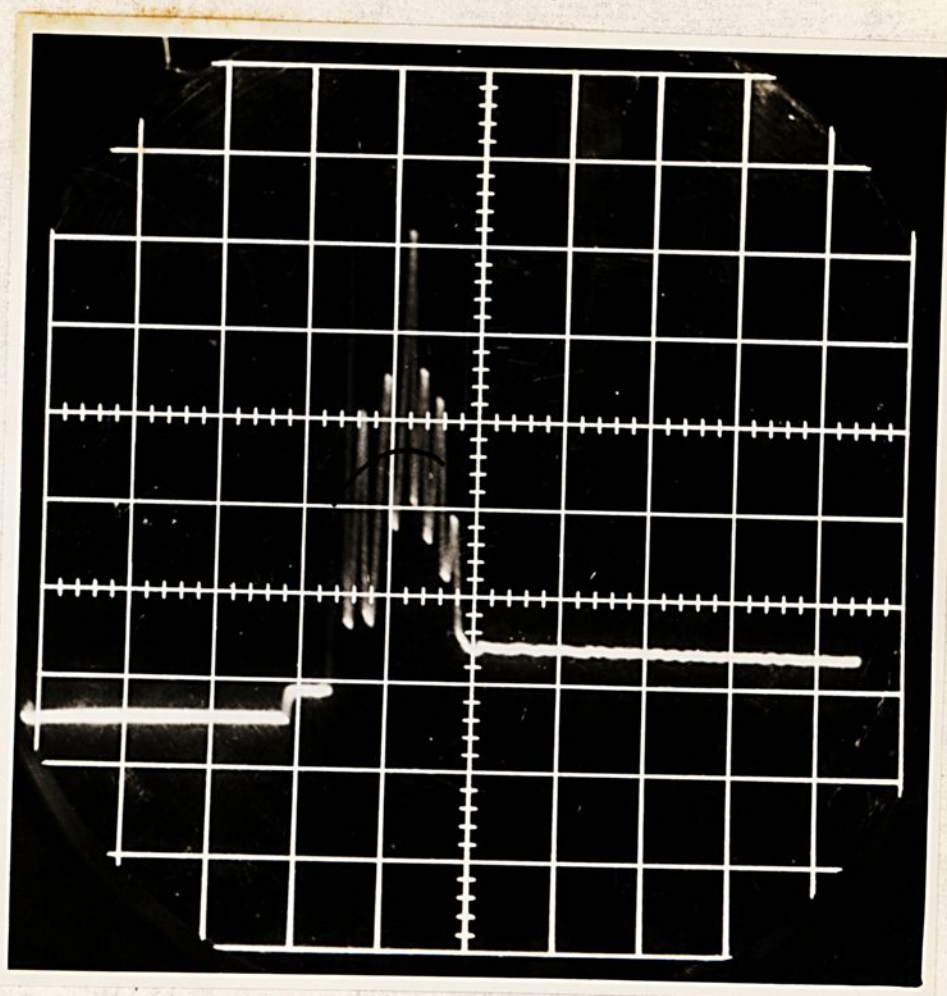


Fig.4.2

- Corpo de prova: $L_i = 20 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 25,4 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,7 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 6,0 \text{ div.}$
- No osciloscópio: $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 13,5 \text{ Kgf.m}$

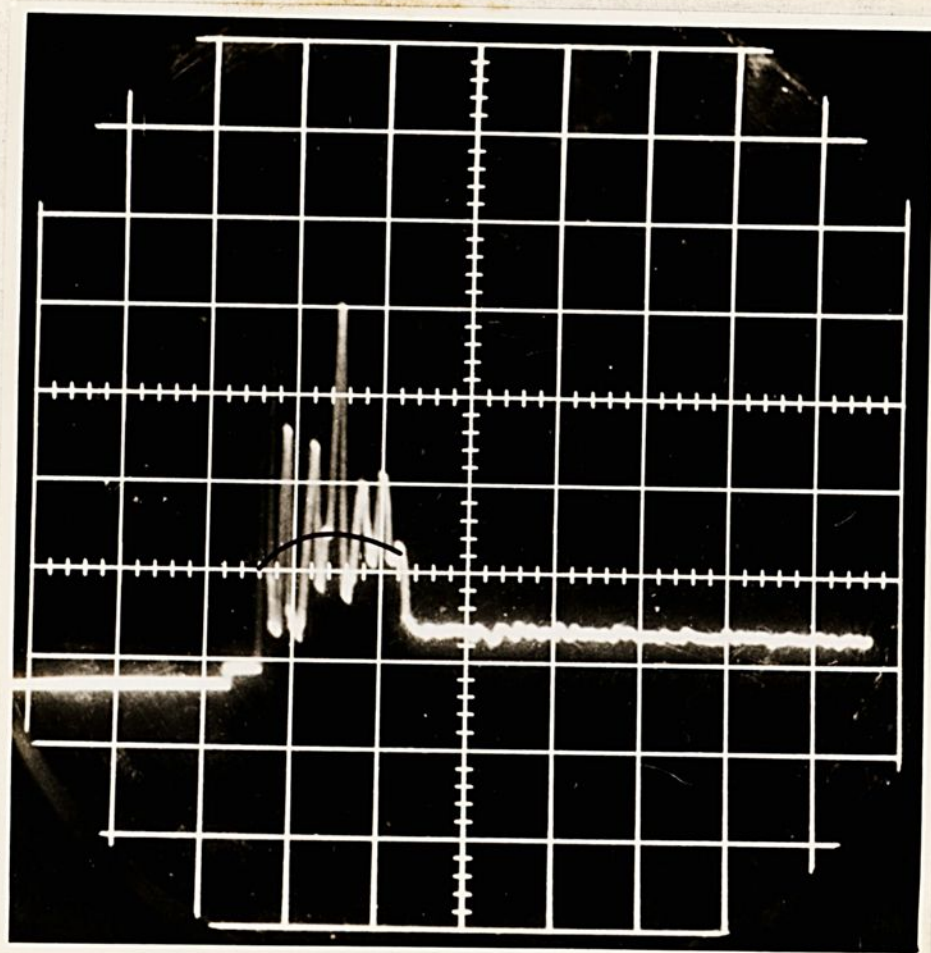


Fig.4.3

- Corpo de prova : $L_i = 25 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
- $L_f = 31,3 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,7 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 3,2 \text{ div.}$
- No osciloscópio: $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 15,8 \text{ Kgf.m}$

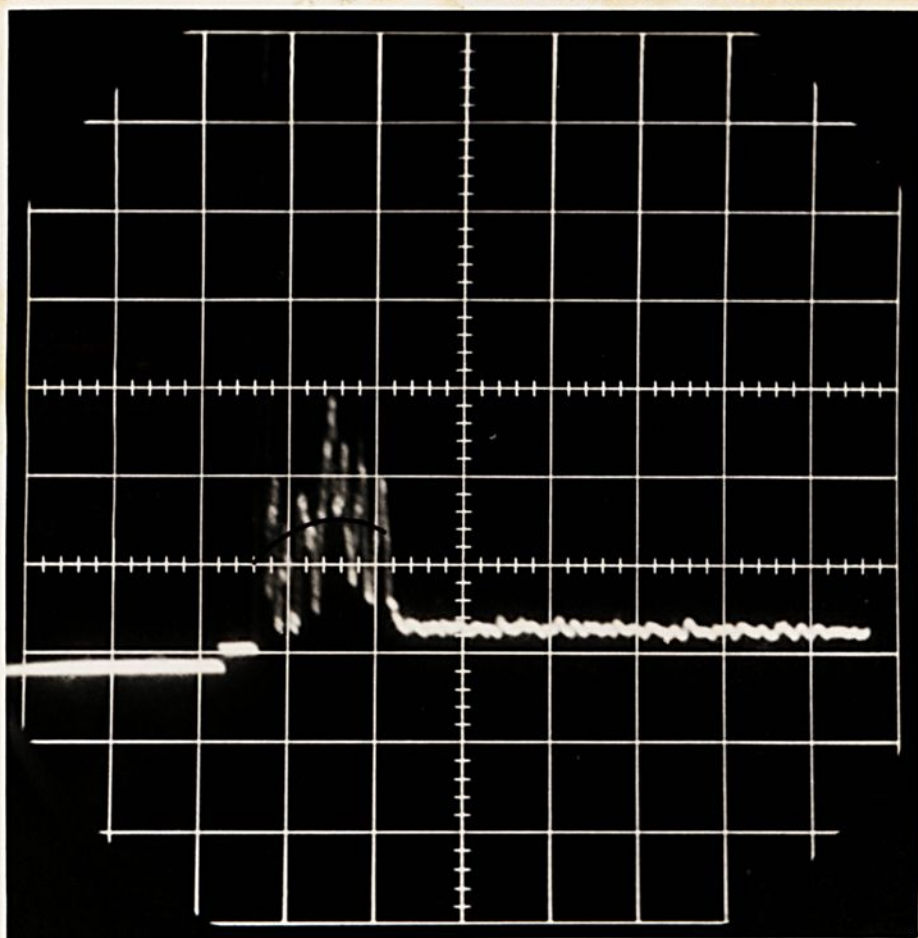


Fig.4.4

- Corpo de prova : $L_i = 25 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 31,2 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,7 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 3,2 \text{ div.}$
- No osciloscópio: $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 14,4 \text{ Kgf.m}$

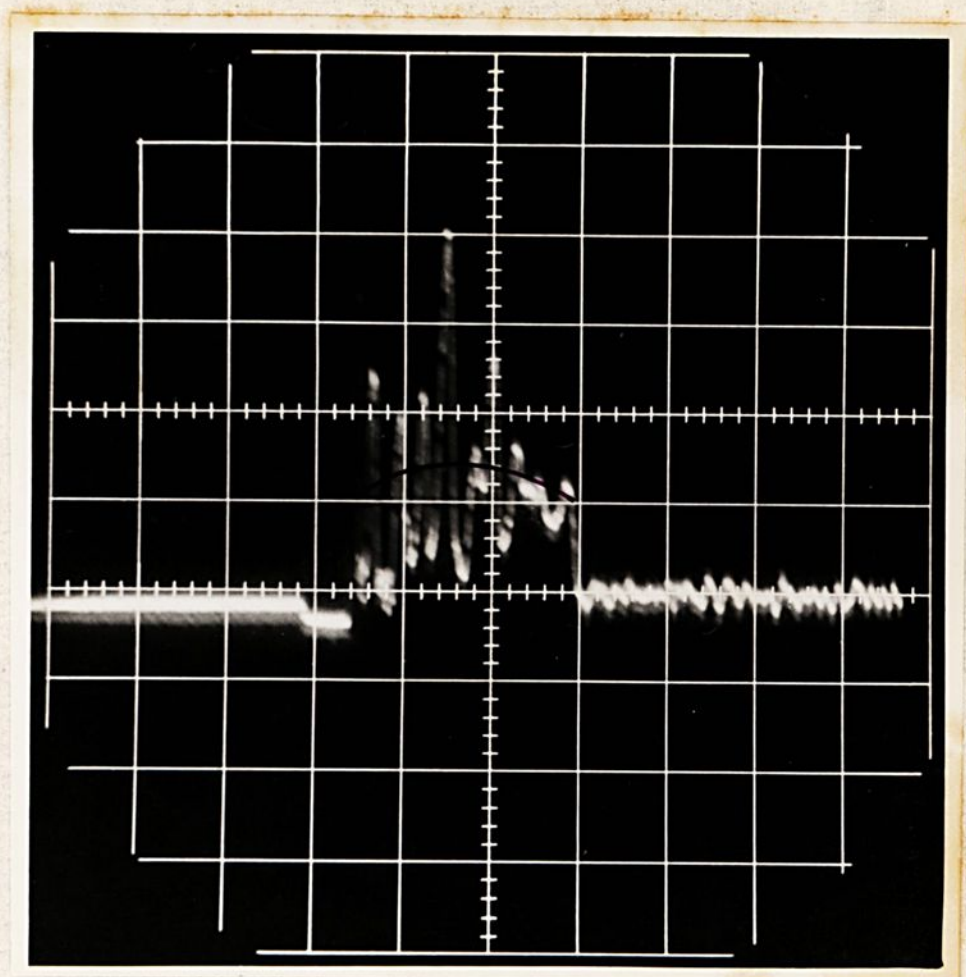


Fig.4.5

- Corpo de prova : $L_i = 30 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
- $L_f = 37,4 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,7 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 3,3 \text{ div.}$
- No osciloscópio: $S = 1 \text{ mv/s}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 18,7 \text{ Kgf.m}$

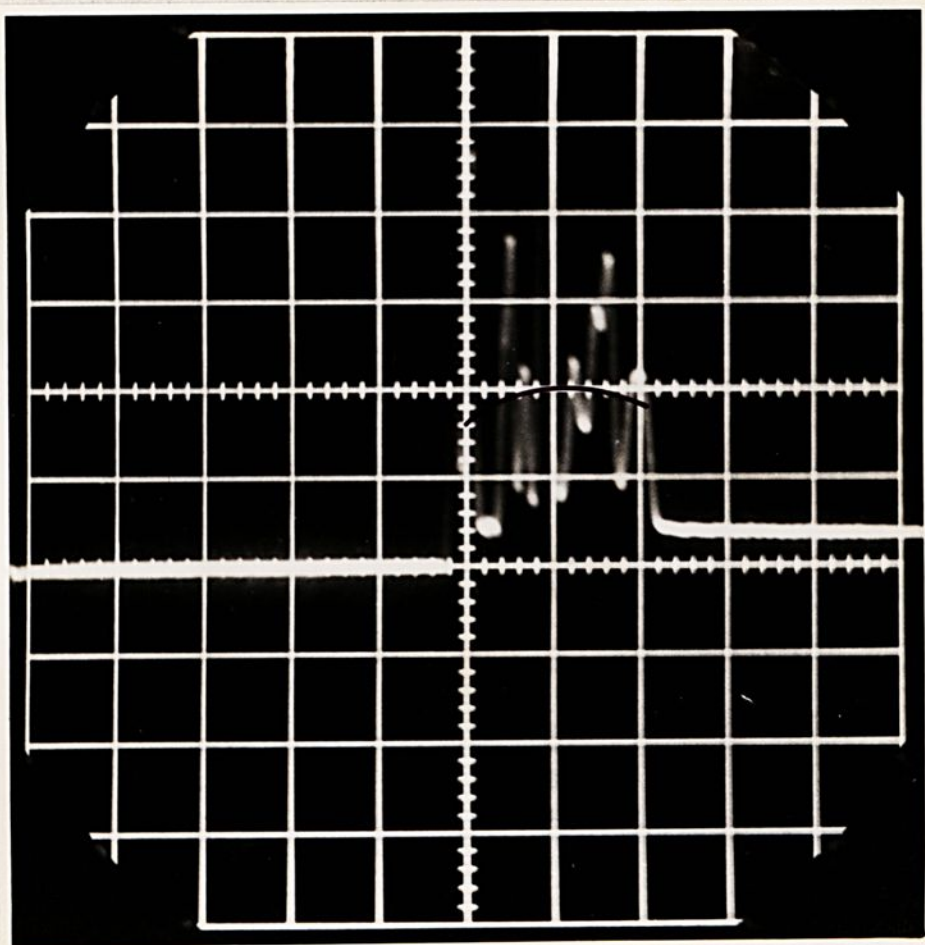


Fig.4.6

- Corpo de prova : $L_i = 30 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 38,3 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,7 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 4,2 \text{ div.}$
- No osciloscópio: $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 19,6 \text{ Kgf.m}$

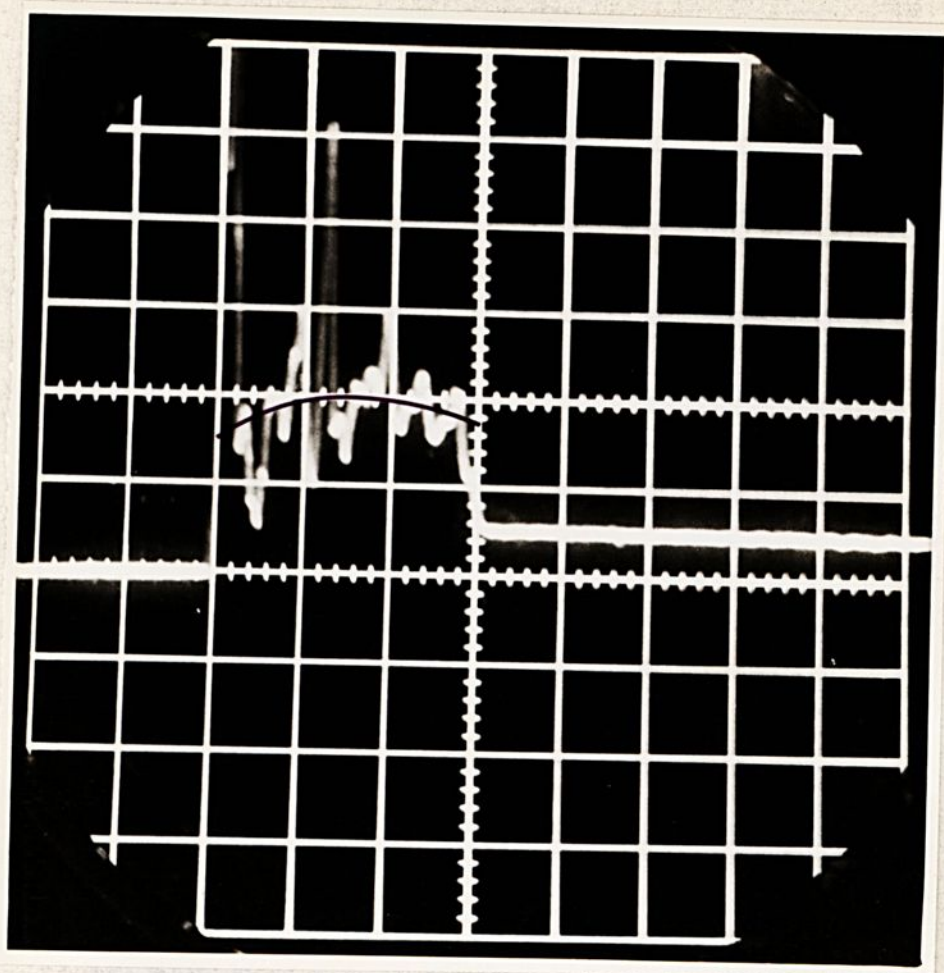


Fig.4.7

- Corpo de prova : $L_i = 35 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 44 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,7 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 4,0 \text{ div.}$
- No osciloscópio: $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 23,0 \text{ Kgf.m}$

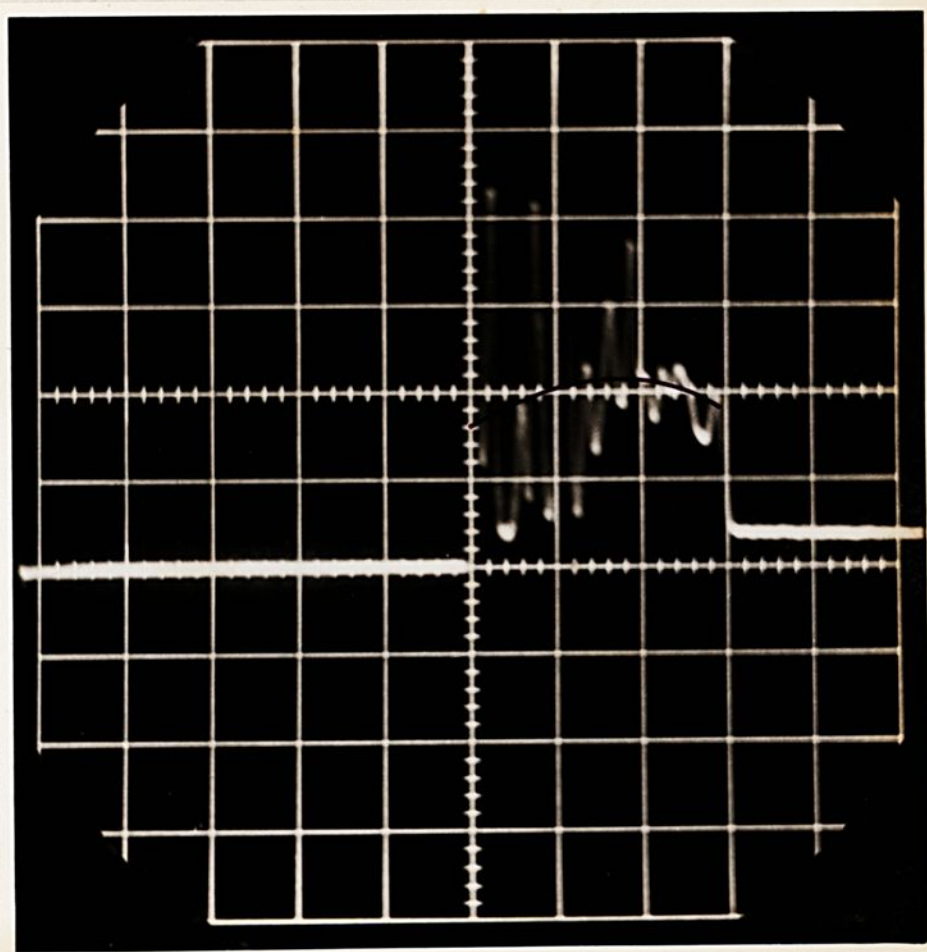


Fig.4.8

- No corpo de prova : $L_i = 35 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 44,9 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,7 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 4,2 \text{ div.}$
- No osciloscópio : $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 23,7 \text{ Kgf.m}$

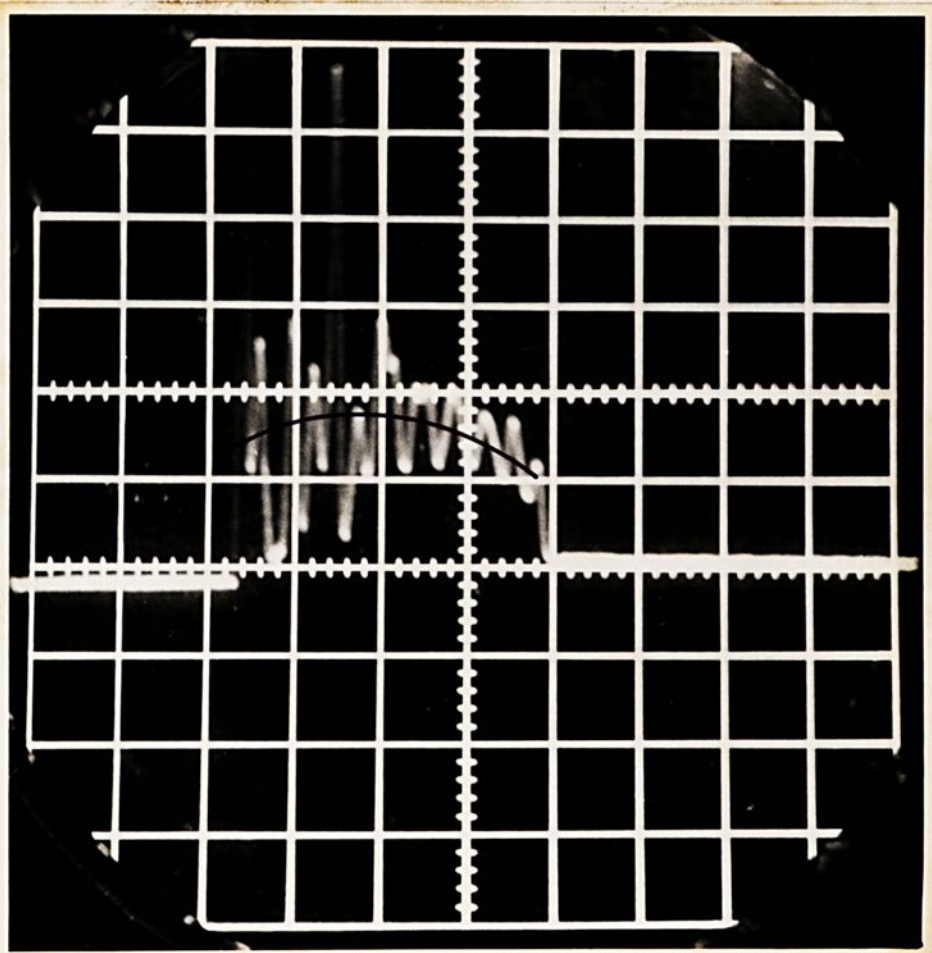


Fig.4.9

- No corpo de prova: $L_i = 40 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 49 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,8 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 4,0 \text{ div.}$
- No osciloscópio : $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 24,9 \text{ Kg.f.m}$

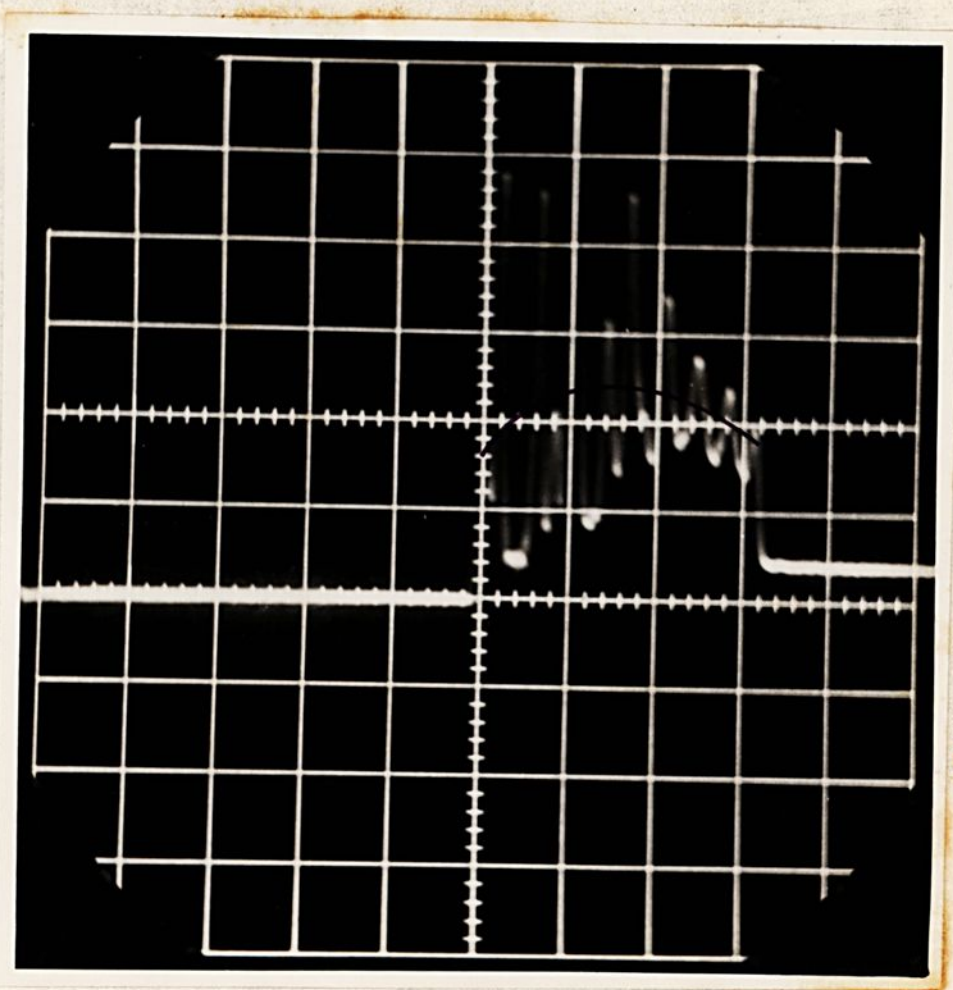


Fig.4.10

- No corpo de prova: $L_i = 40 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 49 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,9 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 4,2 \text{ div.}$
- No osciloscópio : $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 23,9 \text{ Kgf.m}$

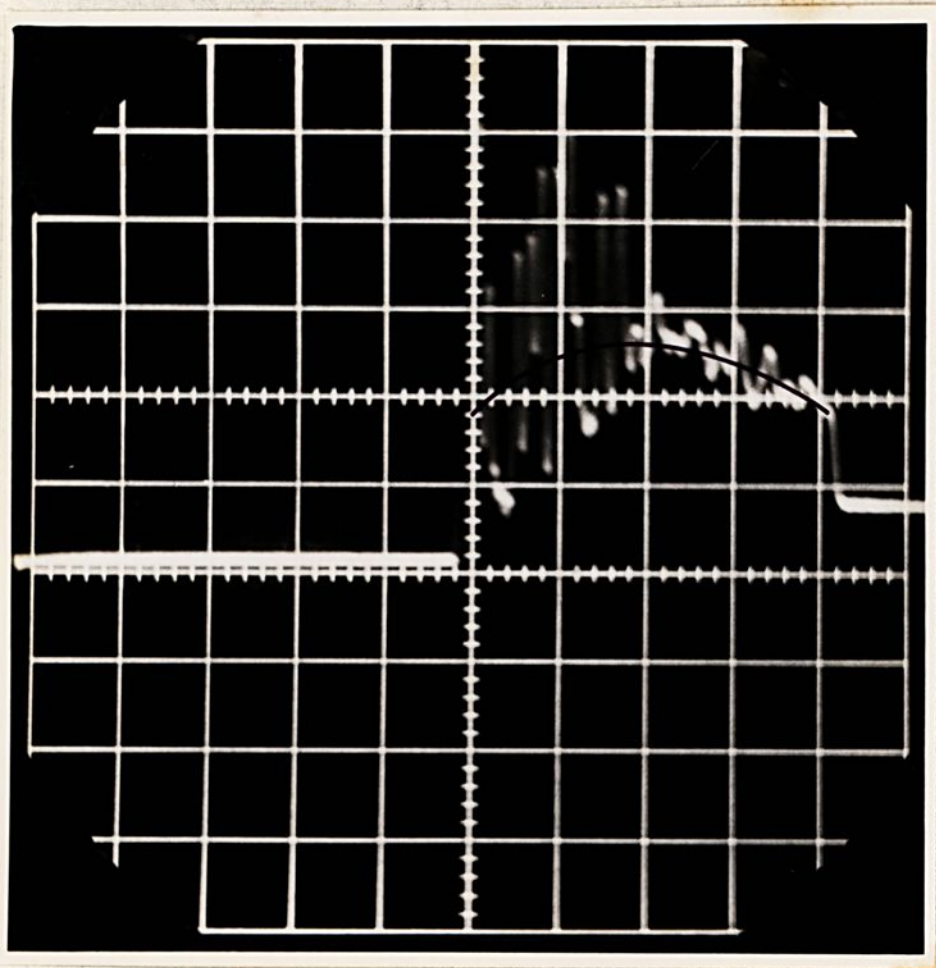


Fig.4.11

- No corpo de prova: $L_i = 40 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 49 \text{ mm}$ $\phi_f = 2,9 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 4,2 \text{ div.}$
- No osciloscópio : $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 26,0 \text{ Kgf.m}$

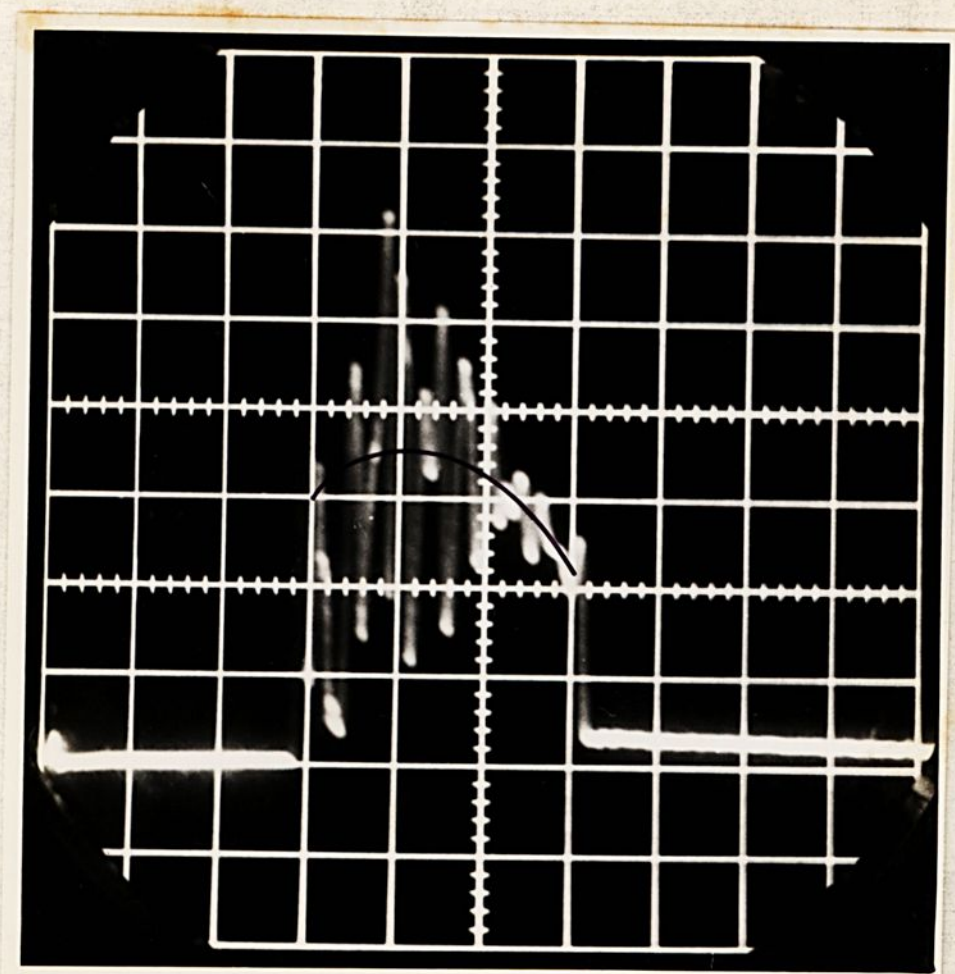


Fig.4.12

- No corpo de prova: $L_i = 40 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
 $L_f = 48,8 \text{ mm}$ $\phi_f = 3 \text{ mm}$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 7,5 \text{ div.}$
- No osciloscópio : $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = 23,8 \text{ Kg.f.m}$

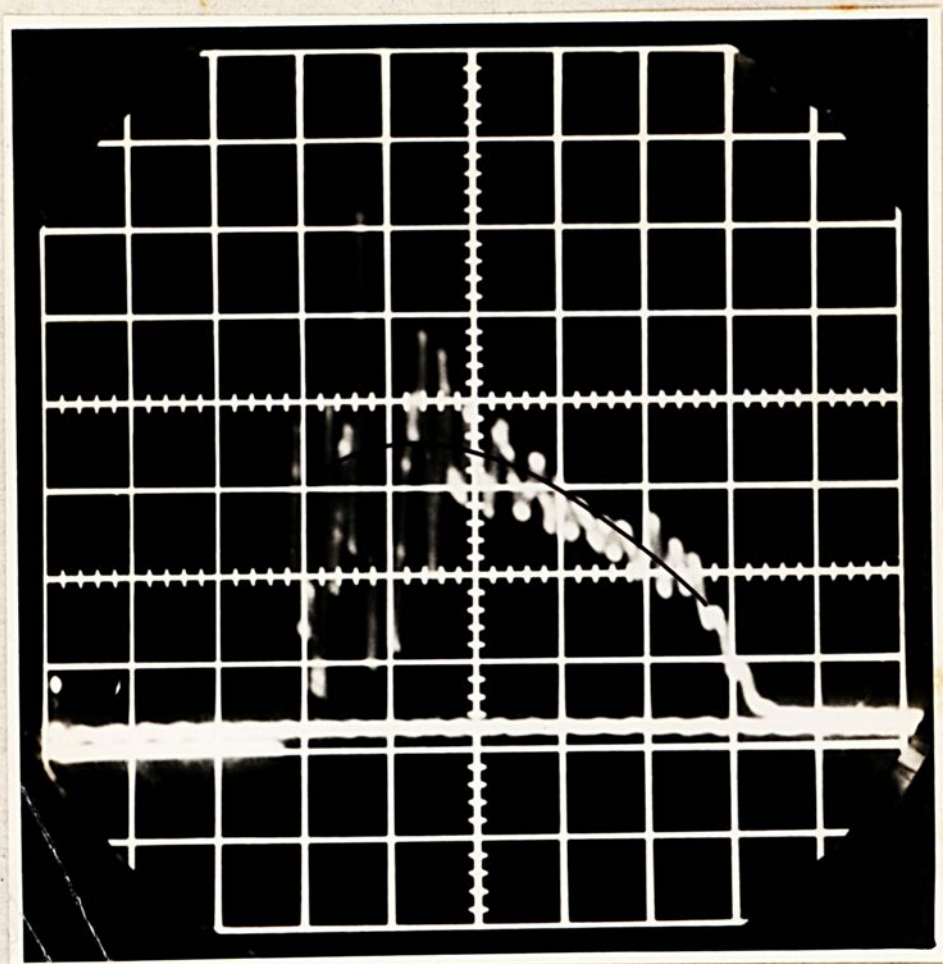


Fig.4.13

- No corpo de prova: $L_i = 40 \text{ mm}$ $\phi_i = 5 \text{ mm}$
- $L_f = -$ $\phi_f = -$
- No transdutor : $\Delta_{cal} = 7,50 \text{ div.}$
- No osciloscópio : $S = 1 \text{ mv/cm}$ $T = 1 \text{ ms/cm}$
- Na máquina : $E = -$

Nota: Houve alongamento e estrição apreciáveis, porém não chegou a se processar a fratura.

CAPÍTULO V

CONSIDERAÇÕES FINAIS1. Recomendações

Em face dos resultados apresentados e discutidos nos capítulos anteriores, em particular, no capítulo III, o autor acredita ter alcançado plenamente o objetivo a que se propôs, isto é, o da concepção, construção e calibração de um dispositivo simples, barato nos seus componentes e que fornecesse resultados confiáveis e necessários ao projetista mecânico, particularmente àquele que se dedica ao projeto aeronáutico e, ao projeto de máquinas e seus componentes.

O autor utilizou um osciloscópio Tektronix 502 A como já indicado anteriormente, modelo com boa sensibilidade e possuindo recursos outros que permitem sua utilização em múltiplas aplicações. Porém, para as condições executadas, foi necessário a utilização de técnicas fotográficas que, não sendo complicadas, introduziam uma certa dose de trabalho adicional. Atualmente já existem modelos de osciloscópios com memória o que introduz algumas facilidades ao processo. Nêles, o sinal permanece no vídeo cerca de uma hora (podendo ser apagado a qualquer instante), permitindo a análise do fenômeno diretamente nêle e seu posterior registro fotográfico, se isso fôr necessário.

Notou também o autor que, para o material ensaiado, os efeitos secundários introduzidos pela máquina de ensaio se faziam sentir principalmente nos corpos de prova com comprimento calibrado pequeno, da ordem de 20 a 25 mm, diminuindo a medida que êste comprimento crescia. Observou também que o valor das tensões dinâmicas independem de uma maneira geral da grandeza dêste comprimento calibrado. Em face destas observações, desde



que ao pesquisador só interessa a determinação da grandeza das tensões de impacto, recomenda-se a utilização de corpos de prova com comprimento calibrado grande. Obviamente tal valor será função do material ensaiado. A experiência do pesquisador indicará qual o valor mais apropriado.

Finalmente, cabe ainda um esclarecimento. O autor pretendeu tão somente criar e construir um dispositivo simples para medição de cargas de impacto. Em nenhum momento pretendeu analisar um determinado material, em particular o aço AISI-4130H utilizado em todos os ensaios. Dentro deste espírito é que acredita ter levado a bom termo o trabalho a que se propôs.



APÊNDICE I

EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA -STRAIN GAGE1. Princípio do Extensômetro Elétrico de Resistência

Quando um condutor elétrico é tracionado, ele aumenta de comprimento e fica com o diâmetro reduzido. Essa mudança de di mensões aumenta sua resistência elétrica. (Em realidade, o aumento da resistência é, ao mesmo tempo, uma função de mudança de dimensões, e também da resistividade do material do fio devido à presença da tensão de tração ou compressão). O Extensômetro Elé trico de Resistência é baseado neste efeito. A fig.I.1 mostra um tipo destes extensômetros, cujas partes funcionais são mostra das na fig.I.2.

Basicamente, o extensômetro não é nada mais que um fio fino de metal com aproximadamente, 0,001 polegadas de diâmetro, ou do tipo circuito impresso, colado entre dois pedaços de papel fino do tipo usado na fabricação de cigarros ou, mais recentemente, envolvido em substância plástica, normalmente resina epoxi. As extremidades do fio fino são soldadas pelo processo de solda de ponto a fios mais grossos para ligação a instrumentos apropri ados. O filamento é disposto de modo que a maior parte de seu comprimento fique paralela a um eixo que define



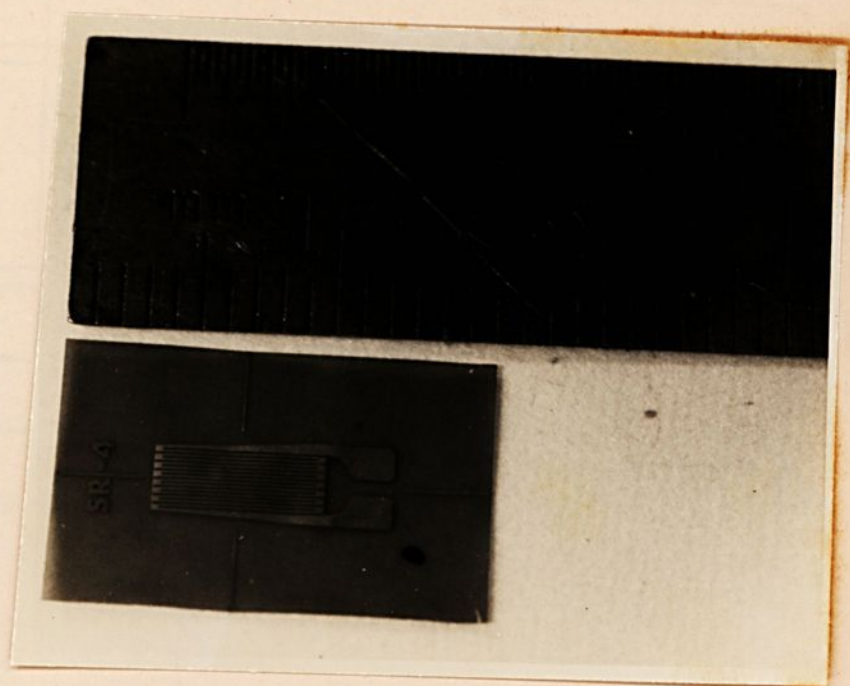


Fig. I.1

PLANTA E CORTE DE UM "STRAIN GAGE"

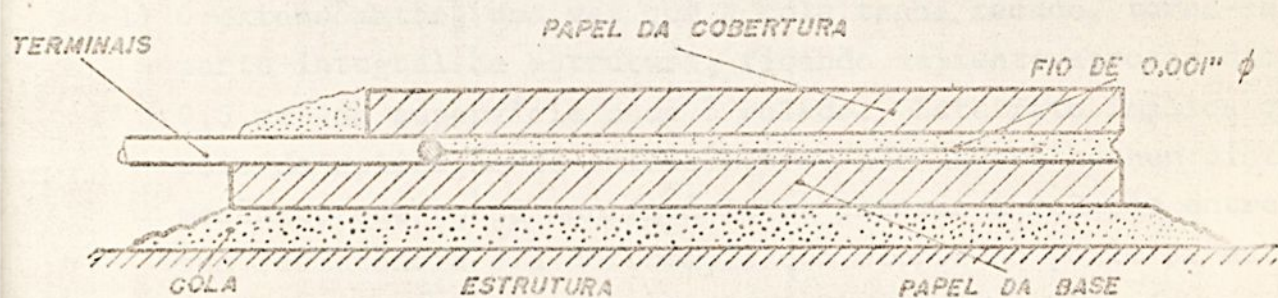
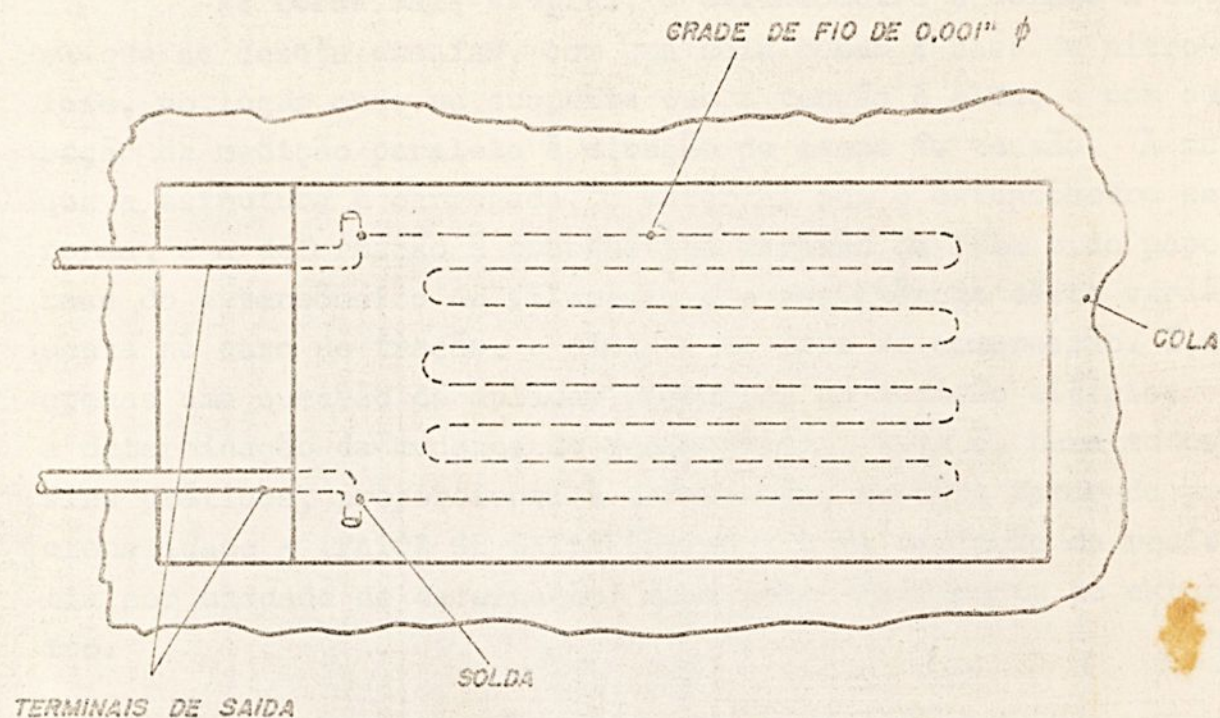


FIG. 1.2

a direção em que o extensômetro medirá a deformação.

Na forma mais simples, o extensômetro é colado à estrutura que se deseja ensaiar, com uma cola comum à base de nitro-celulose, no lugar onde se suspeita que a tensão é alta, e com sua direção de medição paralela à direção do campo de tensão. À medida que a estrutura é carregada, o material sob o extensômetro se deforma, e a deformação é transmitida através da cola e do papel da base do extensômetro ao filamento e a resistência deste varia - aumenta no caso de tração, e diminui no caso de compressão. É, depois apenas uma questão de aplicar processos de medição elétrica para a determinação da mudança de resistência. Esta é, para todos os fins práticos, proporcional à deformação, sendo o fator da proporcionalidade - (FATOR DE EXTENSÔMETRO = % de variação de resistência por unidade de deformação) dado pelo fabricante do extensômetro.

2. Características do Extensômetro Elétrico de Resistência

São dadas abaixo as características que fizeram com que estes extensômetros alcançassem a importância que têm presentemente.

- 1) O extensômetro, uma vez que a cola tenha secado, torna-se uma parte integral da estrutura, ficando saliente aproximadamente 0,5 mm da superfície onde é colado. Este fato implica que, depois da aplicação do extensômetro, não haverá nenhum distúrbio mecânico que possa danificá-lo ou alterar a relação entre a sua resistência e a deformação que ocorre no ponto da estrutura.
- 2) Em comparação com quase todos os tipos de estrutura, a massa do extensômetro elétrico de resistência é desprezível, pesando muito menos que 0,5 g. Do mesmo modo, a rigidez da ligação da cola entre o extensômetro e a estrutura é praticamente infinita com relação às vibrações mecânicas que possam nela ocorrer durante o ensaio.



Por esta razão, não há limite prático (a não ser os impostos pelos instrumentos de medição) para a rapidez de aplicação de deformação que este extensômetro acompanhará fielmente. Há um limite teórico que é atingido quando uma flutuação de deformação tem uma frequência de 50 000 ciclos por segundo. Neste limite, a relação entre o comprimento de onda da flutuação de deformação e o comprimento do extensômetro entra em jogo. Acima de tudo, este extensômetro se adapta idealmente para a medição de tensões dinâmicas, por causa de sua resposta à frequência e da sua independência das vibrações secundárias da estrutura em que está colado. A medição de tensões vibratórias nas pás das hélices de aviões em vôo, para citar apenas um exemplo, tornou-se rotina.

- 3) A sensibilidade e a precisão do extensômetro são boas. Em condições de cuidado razoável, usando instrumentos comerciais, a precisão da medição pode ser mantida dentro de 5%. O Fator do Extensômetro, para os extensômetros "Baldwin SR-4" é dado dentro de uma precisão de 1 a 2%, dependendo do tipo. Com instrumentação comercial padronizada é possível medir deformações correspondentes a tensões em aço de um valor tão baixo quanto 100 libras por polegada quadrada. (Aproximadamente, 7 kg/cm^2).
- 4) A natureza elétrica da medição é própria para indicação remota, como pode ser necessário no caso de ensaio em vôo de aviões, onde os extensômetros são instalados na superfície externa da estrutura; durante ensaios que envolvam explosões, e em ensaios onde os extensômetros devem ser colocados em lugares inacessíveis depois da montagem de uma máquina.
- 5) O custo de cada extensômetro (não dos instrumentos de medição, no entanto) é baixo, de modo que as aplicações de vários extensômetros para a completa exploração do campo de tensão são realizáveis.
- 6) Podem ser encontrados extensômetros com comprimento muito pequeno ($0,0625''$), de modo que é possível aproximar-se do caso ideal de medição de tensão em um ponto. Esta característica é importante na determinação do valor máximo de tensões em campos que



mostrem gradientes de tensão acentuados, como um ponto de concentração de tensões.

- 7) O circuito básico do extensômetro elétrico de resistência se adapta à combinação de um número variado de extensômetro em circuito que dê uma saída calculada. Isto é usado quando se deseja medir cargas aplicadas, ao invés de tensões. Por exemplo, é possível combinar extensômetros para medir torção em um eixo, independentemente de tração ou flexão. Do mesmo modo, é possível também medir tração com eliminação completa de torção e flexão.

Entre as características do extensômetro que podem restringir o seu uso, podem ser citadas as seguintes:

1) O fio de resistência do extensômetro não responde somente à deformação, mas também, às mudanças de temperatura. Nos extensômetros padronizados este efeito é diminuído pela escolha adequada do material do filamento, mas só pode ser eliminado pelo circuito de compensação de temperatura explicado adiante. Existem extensômetros que têm compensação de temperatura inerente, mas estes são fabricados para serem aplicados em estruturas de um material específico.

2) O extensômetro é sensível à umidade. Em condições ambientes desfavoráveis, ele deve ser protegido convenientemente contra ela.

3) O extensômetro com base de papel aplicado com cola nitrocelulósica começa a deslizar a uma temperatura de cerca de 80°C. Existem extensômetros com base de bakelite para temperaturas até 160°C, mas que exigem uma técnica de aplicação mais complicada. Acima dessas temperaturas, a medição de tensões com extensômetros elétricos de resistência é ainda classificada como pesquisa.

4) O sinal de saída destes extensômetros é baixo, de modo que os instrumentos auxiliares necessários devem ser delicados ou eletrônicos, e acima de tudo caros, comparados com o custo do extensômetro. Um valor típico de sinal de saída de um extensômetro medindo uma tensão de 10 000 libras por polegada quadrada



em uma estrutura de aço é 0,001 Volts, ou 5 microampêres para um galvanômetro tendo uma bobina de 100Ω.

5) Em geral, estes extensômetros só podem ser usados em um único lugar, isto é, uma vez colados e prôpriamente protegidos, podem ser usados indefinidamente, mas a grande maioria deles não pode ser removida do lugar para ser usado outra vez.

3. Circuito Básico da Ponte de Wheatstone

Qualquer que seja o tipo de medição feita, o circuito básico usado é a Ponte de Wheatstone, onde um dos braços é o extensômetro elétrico de resistência. Se a ponte fôr equilibrada inicialmente para saída nula, e fôr subsequentemente aplicada uma deformação ao extensômetro, a voltagem de saída da ponte variará proporcionalmente à deformação.

A compensação de temperatura é conseguida, instalando um segundo extensômetro em uma parte da estrutura (ou num pedaço de material idêntico ao da estrutura) que receba a mesma variação de temperatura que o extensômetro "ativo", mas que não esteja sujeito a deformação durante o ensaio. Este "extensômetro de compensação" constitui um braço adjacente da ponte de Wheatstone. Uma deformação afetará somente um dos extensômetros e produzirá um sinal. Uma mudança de temperatura afetará igualmente os dois extensômetros, a ponte permanecerá em equilíbrio, e a voltagem de saída resultante será zero. A fig. I.3 mostra este tipo de circuito.

A - Caso geral - mudanças de resistência possíveis nos 4 braços

$$V_{AC} = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad V_{BC} = V \frac{R_3}{R_3 + R_4}; \text{ então:}$$

$$E = V_{AC} - V_{BC} = V \frac{(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1)$$



CIRCUITO DE CALIBRAÇÃO POR RESISTÊNCIA

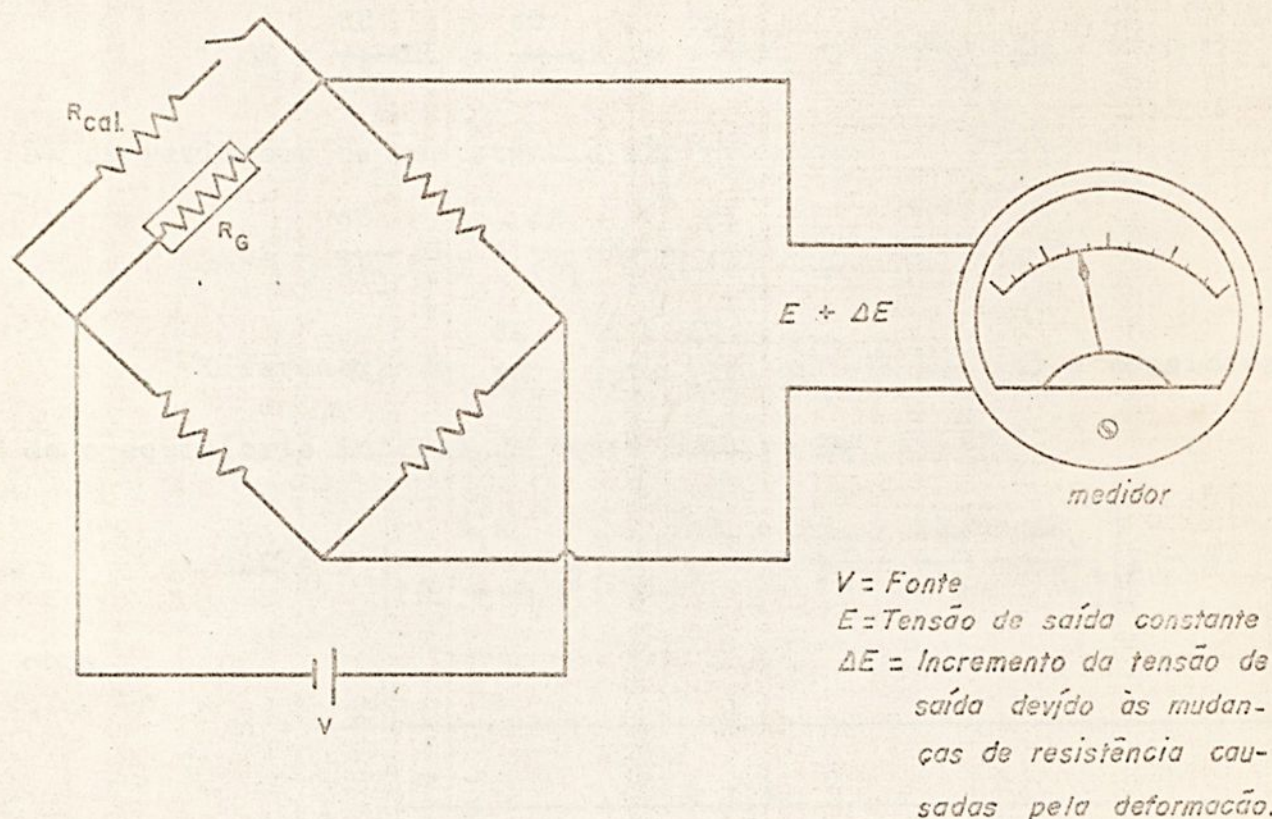


FIG. 1.3

Para $E = 0$ (tensão de saída constante na ausência de de formação).

$$\boxed{R_2 R_4 = R_1 R_3} \quad - \quad \text{Condição fundamental para equilíbrio da ponte} \quad (2)$$

Assumindo variação de resistência em todos os braços:

$$dE = \frac{\delta E}{\delta R_1} dR_1 + \frac{\delta E}{\delta R_2} dR_2 + \frac{\delta E}{\delta R_3} dR_3 + \frac{\delta E}{\delta R_4} dR_4 \quad \text{ou,}$$

se as variações de resistência são pequenas:

$$\Delta E = \frac{\delta E}{\delta R_1} \Delta R_1 + \frac{\delta E}{\delta R_2} \Delta R_2 + \frac{\delta E}{\delta R_3} \Delta R_3 + \frac{\delta E}{\delta R_4} \Delta R_4$$

Diferenciando $\frac{\delta E}{\delta R_1}$, $\frac{\delta E}{\delta R_2}$, $\frac{\delta E}{\delta R_3}$, $\frac{\delta E}{\delta R_4}$ da Eq. (1) e considerando o equilíbrio inicial da Ponte como na Eq. (2):

$$\Delta E = V \cdot \left| \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \right| \times \left| \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right| \left| \frac{1}{1} - n \right|$$

onde

$$n = \frac{1}{1 + \frac{a + 1}{\Delta R_1/R_1 + \Delta R_4/R_4 + a \Delta R_2/R_2 + a \Delta R_3/R_3}}$$

$$a = R_2/R_1$$

Se n é desprezível, então a tensão de saída

$$\Delta E = V \cdot \frac{a}{1 + a^2} \left| \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right| \quad (3)$$

Equação geral da Ponte de Wheatstone

Caso comum: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_G$

$$\Delta E = \frac{V}{4} \left| \frac{\Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_2 - \Delta R_4}{R_G} \right| \quad (4)$$

B - Variação de temperatura nos extensômetros R_1 e R_2

$$\Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R_{34}$$

porque R_3 e R_4 são resistores idênticos submetidos às mesmas condições.

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_{12}$$

porque R_1 e R_2 ;

- a) São SG idênticos.
- b) Instalados no mesmo tipo de material.
- c) Sujeitos a temperaturas idênticas.

Então:

$$\Delta E = \frac{V}{4} \left| \frac{\Delta R_{12} + \Delta R_{34} - \Delta R_{12} - \Delta R_{34}}{R_G} \right| = 0$$

Deformação agindo apenas no "strain Gage" R_1

$$\Delta E = \frac{V}{4} \left| \frac{\Delta R_1 + 0 - 0 - 0}{R_G} \right| = \frac{V}{4} \left| \frac{\Delta R}{R_G} \right|$$

mas "Fator de Extensômetro" definido como sendo; $\Gamma = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$ onde ϵ =
= Deformação;

logo

$$\Delta E = \frac{V}{4} \Gamma \epsilon$$



00001

4. Métodos de Indicação - Generalidades

As medições estáticas requerem, em geral, o mesmo tipo de instrumentação, seja para tomar a leitura de um extensômetro ou de vários - neste último caso, interpõem-se interruptores de seleção adequados entre os extensômetros e o instrumento indicador. As indicações dos extensômetros são tomadas uma de cada vez para uma da condição.

A medição de deformação dinâmica, mesmo com um só extensômetro, é um problema difícil. Como a vista humana não é capaz de fazer uma leitura em um instrumento cuja indicação se processa em fração de segundo, é necessário usar algum meio de registrar em um papel ou gráfico de deformação x tempo, que possa ser analisado com mais vagar depois do ensaio. Os instrumentos capazes de satisfazer esta função (fotograficamente) são necessariamente mais complexos e mais caros, e requerem maior habilidade, tempo e trabalho na sua operação. O problema é aumentado ainda mais se fôr necessário fazer o registro de muitos extensômetros simultaneamente. Em medições dinâmicas, este é, em geral, o caso mais frequente - a existência de um problema dinâmico, em geral, implica a necessidade de estabelecer a relação entre várias variáveis. Neste caso, o número dos componentes da cadeia de instrumentos necessária deve ser multiplicado pelo número de medições, isto é, se fôr necessário registrar quatro quantidades diferentes, é preciso empregar 4 pontos de extensômetros, 4 circuitos de calibração, 4 amplificadores e 4 dispositivos registradores.



APÊNDICE II

ESTUDO ANALÍTICO DE EFEITO DAS CARGAS INERTIAIS
DA BASE DE TRACÃO NO IMPACTO

O conjunto pêndulo mais corpo de prova, mais base de tração, sob o ponto de vista do seu comportamento elástico no instante do impacto, pode ser tomado, como idealização, o sistema com dois graus de liberdade mostrada na figura II.1, onde um dos graus de liberdade é o deslocamento da base de tração (u) e o outro o deslocamento da massa do pêndulo (v).

Na figura:

M = massa do pêndulo

m = massa da base de tração.

K = constante elástica (de mola) dos cilindros

k = constante elástica (de mola) do corpo de prova

u e v = deslocamento de m e M

V = velocidade inicial

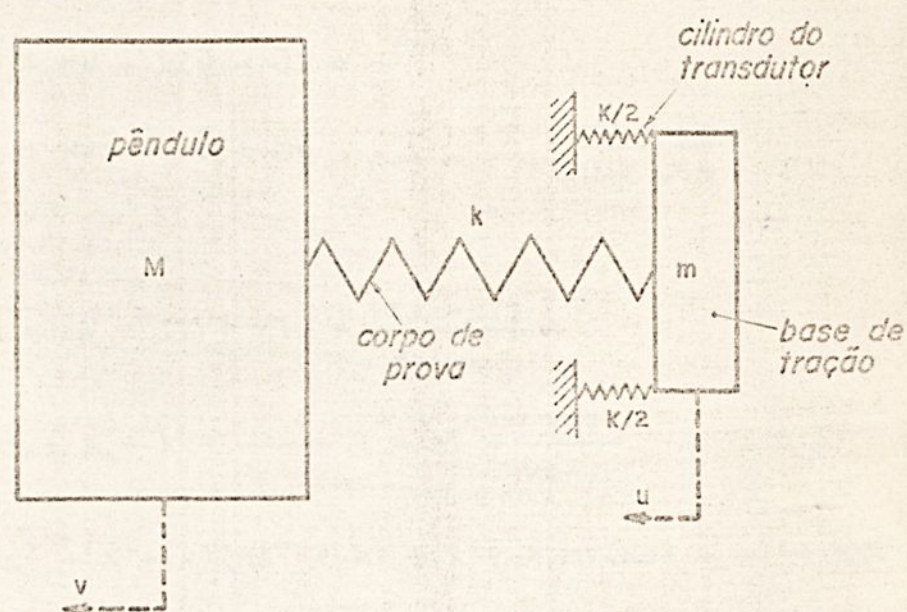
t = tempo

As equações que definem o fenômeno são:

$$m \frac{d^2u}{dt^2} + Ku + k(u-v) = 0$$

(1)

$$M \frac{d^2v}{dt^2} + k(v-u) = 0$$



$$t = 0 \rightarrow \frac{du}{dt} = \frac{dv}{dt} = v$$

FIG. II.1

Desenvolvendo estas equações:

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + (K + k)u - kv = 0$$

$$M \frac{d^2 v}{dt^2} + k(v - u) = 0$$
(2)

ou ainda, aplicando ao sistema o conceito de transformada de Laplace.

$$ms^2 \tilde{u} - mV + (K + k)\tilde{u} - k\tilde{v} = 0$$

$$Ms^2 \tilde{v} - MV + k(\tilde{v} - \tilde{u}) = 0$$

$$(Ms^2 + k)\tilde{v} = k\tilde{u} + MV \quad \therefore \quad \tilde{v} = \frac{k\tilde{u} + MV}{Ms^2 + k}$$
(3)

Portanto

$$ms^2 \tilde{u} - mV + (K + k)\tilde{u} - \frac{k(k\tilde{u} + MV)}{Ms^2 + k} = 0$$

$$\tilde{u}(ms^2 + K + k - \frac{k^2}{Ms^2 + k}) = mV + \frac{kMV}{Ms^2 + k}$$

$$\tilde{u}\{(ms^2 + K + k)(Ms^2 + k) - k^2\} = mV(Ms^2 + k) + kMV$$

$$\tilde{u} = \frac{mV(Ms^2 + k) + kMV}{(ms^2 + K + k)(Ms^2 + k) - k^2} = V \frac{(s^2 + \frac{k}{M}) + \frac{k}{m}}{(s^2 + \frac{K+k}{m})(s^2 + \frac{k}{M}) - \frac{k^2}{mM}}$$

ou ainda

$$\tilde{u} = V \frac{(s^2 + w_0^2) + w_1^2}{(s^2 + w_2^2)(s^2 + w_0^2) - w_0^2 w_1^2}$$
(4)

$$w_0^2 = \frac{k}{M} ; \quad w_1^2 = \frac{k}{m} ; \quad w_2^2 = \frac{K+k}{m}$$

Portanto:

$$\tilde{u} = V \frac{s^2 + w_0^2 + w_1^2}{s^4 + s^2(w_0^2 + w_2^2) + w_0^2 w_2^2 - w_0^2 w_1^2}$$

$$\therefore \tilde{u} = V \frac{s^2 + w_0^2 + w_1^2}{(s^2 + \beta^2)(s^2 + \alpha^2)} \quad (5)$$

donde tiramos as frequências naturais α e β dadas por

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= \frac{1}{2} (w_0^2 + w_2^2) + \sqrt{\frac{1}{4} (w_0^2 + w_2^2)^2 - w_0^2 w_1^2} = \\ &= \frac{1}{2} \left[(w_0^2 + w_2^2) + \sqrt{(w_0^2 + w_2^2)^2 - 4w_0^2 w_1^2} \right] \end{aligned}$$

e

$$\beta^2 = \frac{1}{2} \left[(w_0^2 + w_2^2) - \sqrt{(w_0^2 + w_2^2)^2 - 4w_0^2 w_1^2} \right]$$

Podemos escrever ainda

$$\tilde{u} = V \left(\frac{A}{s^2 + \alpha^2} + \frac{B}{s^2 + \beta^2} \right) \quad (6)$$

$$\text{onde } As^2 + AB^2 + Bs^2 + B\alpha^2 = s^2 + w_0^2 + w_1^2$$

e

$$A + B = 1$$

Donde tiramos que

$$A = \frac{w_0^2 + w_1^2 - \alpha^2}{\beta^2 - \alpha^2} = \frac{(\alpha^2 - w_1^2 - w_0^2)}{\alpha(\alpha^2 - \beta^2)}$$

$$B = \frac{(-\beta^2 + w_1^2 + w_0^2)}{(\alpha^2 - \beta^2)}$$

Portanto tiramos que

$$u = V \frac{(\alpha^2 - w_1^2 - w_0^2)}{\alpha(\alpha^2 - \beta^2)} \operatorname{sen} \alpha t + V \frac{(-\beta^2 + w_1^2 + w_0^2)}{\beta(\alpha^2 - \beta^2)} \operatorname{sen} \beta t \quad (7)$$

que é a solução para u.

Porém desde que $w_2 \gg w_1$, $K \gg k$, $w_1 \gg w_0$ e $M \gg m$, podemos escrever numa primeira aproximação que:

$$\alpha^2 = w_2^2$$

$$\beta^2 = w_0^2$$

Portanto,

$$u = \frac{V}{w_2} \operatorname{sen} w_2 t + \frac{V w_1^2}{w_0 w_2^2} \operatorname{sen} w_0 t$$

A carga P no instante t do impacto será

$$P = Ku = KV \sqrt{\frac{m}{K+k}} \operatorname{sen} w_2 t + \frac{KV w_1^2 m}{w_0 (K+k)} \operatorname{sen} w_0 t$$

$$P = KV \sqrt{\frac{m}{K+k}} \operatorname{sen} w_2 t + V \sqrt{Mk} \operatorname{sen} w_0 t$$

Para t muito pequeno tal que $w_2 t \ll 1$ teremos

$$\operatorname{sen} w_2 t \approx w_2 t$$

$$\operatorname{sen} w_0 t \approx w_0 t$$

Logo,

$$P = VK_t + Vkt = Vt(K + k)$$

Uma vez que K é muito grande, P irá apresentar no instante inicial um pico muito alto, correspondente às cargas inerciais do conjunto.

Tal conclusão foi confirmada pela experiência.





COMPANHIA SIDERÚRGICA SÃO CAETANO

TELEFONE: 42-3722
TELEX N.º 878
INSCRIÇÃO N.º 3.534
C. G. C. 59.263.705

ENDERÇO PARA CORRESPONDÊNCIA
RUA DR. FALGÃO, 56 - 11.º ANDAR
SÃO PAULO

AV. CONDE FRANCISCO MATARAZZO, 836
SÃO CAETANO DO SUL
SÃO PAULO

CERTIFICADO DE ANÁLISE

N.º 17 658/69

9/69

CLIENTE:	C. T. A.	INSPECIONADO POR:	Contr. de Qualidade	
CORRIDA N.º	25.889	MATERIAL:	SAE 4130 H/AE-S4/GF (A/13)	
BITOLA DA MATERIA PRIMA:	3" 1/1	BITOLA FINAL FORNECIDA:	5/8" 1/1 Descastado	
GRAU DE PUREZA: (A.S.T.M.)	A	B	C	D
	2	1-2	-	2

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Pb	N ²	Al	
0,30	0,40	.020	.018	0,28	1,00		0,17				

RESULTADOS METALOGRAFICOS: GRÃO CONFORME ASTM: 5-7 (prova de norma
lização)

RESULTADOS DE CONTRÔLE NÃO-DESTRUTIVO:

CONTRÔLE MAGNAFLUX:

CONTRÔLE MAGNATEST:

CONTRÔLE ULTRASÔNICO: aprovado

MATERIAL FORNECIDO PELA NOTA FISCAL N.º

SÉRIE

OBSERVAÇÕES:

Dureza Brinell: 184 - 189 HB.

Resistência à tração: 64 - 66 kg/mm².

Anexo: Curva
Jominy.

DATA	CONTRÔLE DE QUALIDADE	VISTO
08.01.69.		

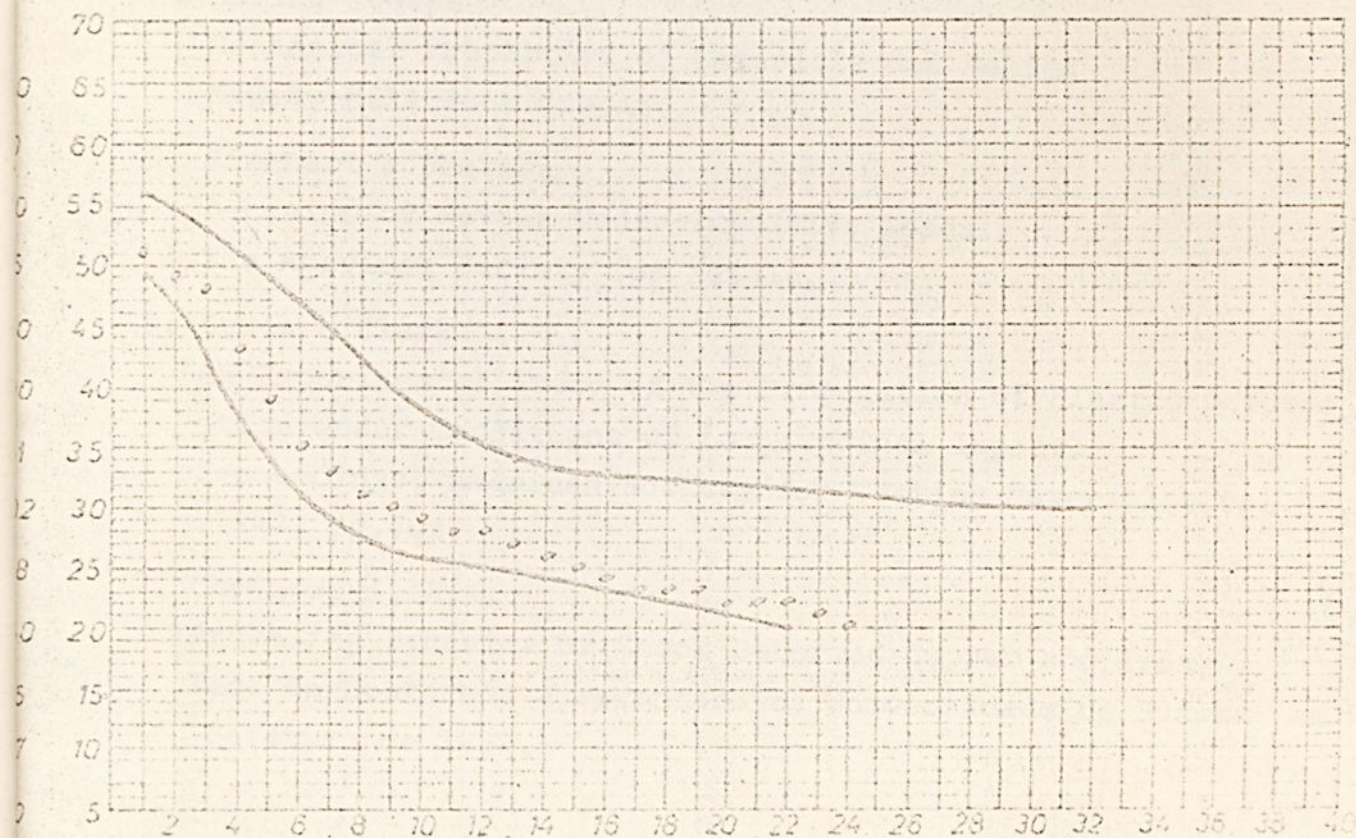
Qualidade: 4130-H

MP Nr.

Prova Nr.	Corrida NC	Composição de aço									Dimen. Inicial mm	Temperatura	
		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	V %		Norm. Temp. °C	Temp. °C
	25889	.30	.28	.40	.020	.018	1.00	.17					

FORNECEDOR:

HRC.



Distancia da extremidade resfriada em 1/16"

Observações:

Antônio

BIBLIOGRAFIA

1. Dally e Riley
Experimental Stress Analysis
McGraw-Hill Book Company.
2. Davis, Trozell e Wiskocil
The Testing and Inspection of Engineering Materials
McGraw-Hill Book Company.
3. Weinbaun, R.M.O.
Ensaio Dinâmicos de Tração com Aço
Boletim nº 52, vol.14, pg.335, de Julho de 1958 da Associação Brasileira de Metais.
4. Marin, Joseph
Mechanical Properties of Materials and Design
McGraw-Hill Book Company.
5. Rinehart e Pearson
Behavior of Metals Under Impulsive Loads
The American Society for Metals.
6. Duwez e Clark
An Experimental Study of the Propagation of Plastic Deformation Under Conditions of Longitudinal Impact.
Proceedings, American Society for Testing Materials, vol.47, 1947, pg.502.
7. Chojnowski, E.A.
Annealing Behavior of Shock Deformed Copper and Iron
Tese de Doutorado apresentado na Universidade de Sussex em Setembro de 1969.



8. Clark e Wood
The Tensile Impact Properties of Some Metals and Alloys
Transactions, American Society for Metals, vol.42, 1950,
pg.45.
9. Parker e Ferguson
The Effect of Strain Rate Upon the Tensile Impact Strength
of Some Metals
Transactions, American Society for Metals, vol.30, 1942,
pg.68.
10. Wood, D.S.
On Longitudinal Plane Waves of Elastic - Plastic Strain in
Solids.
Journal of Applied Mechanics, vol.19, 1952, pg.521.
11. Mann, H.C.
High-Velocity Tension-Impact Tests
Proceedings, American Society for Testing Materials, vol.
36-11, 1936, pg.85.
12. De Juhasz, K. J.
Graphical Analysis of Impact of Bars Above the Elastic
Range
Journal of Franklin Institute, vol.248, 1949, pg.15, 113
13. Evans, W. M.
Deformation and Fractures Produced by Intense Stress
Pulses in Steel
Research, vol.5, 1952, pg.502.
14. Miklowitz, J.
The Initiation and Propagation of the Plastic Zone in a
Tension Bar of Mild Steel Under Eccentric Loading.
Journal of Applied Mechanics, vol.14, 1947, pg.A-21.



15. Miklowitz, J.
The Initiation and Propagation of the Plastic Zone in a
Tension Bar of Mild Steel as Influenced by the Speed of
Stretching and Rigidity of Testing Machine.
Journal of Applied Mechanics, vol.14, 1947, pg.A-31.
16. Thonson, W.T.
Mechanical Vibrations
Prentice-Hall, Inc.
17. Marin, Joseph
Mechanical Behavior of Engineering Materials
Prentice-Hall, Inc.
18. Pack, Evans e James
The Propagation of Shock Waves in Steel and Lead.
Proceedings, Physical Society, vol.60, 1948, pg.1.
19. Jenks, G.F.
Application of Tension-Impact Tests
Trasactions, American Society of Mechanical Engineers, vol.
59, 1937, pg.313.



