

SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL DE EMISSÃO ACÚSTICA

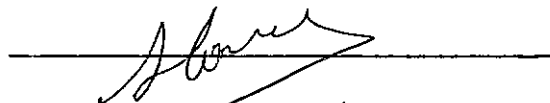

Francisco Parentes de Rezende Corrêa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS(M.Sc.)

Aprovado por:



Presidente

Rio de Janeiro  
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL

MAIO DE 1974



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

Aos Professores Arthur Ripper Neto pela orientação durante todo o trabalho e Jules Gislain Slama por sua ajuda inestimável.

Aos amigos Moysés, Lepore, Rery e Ângelo por todo o apoio que me deram.

À todos os funcionários da COPPE, e, em particular, ao pessoal dos Laboratórios de Engenharia Elétrica e Engenharia Biomédica.

R E S U M O

Uma simulação experimental é realizada para estabelecer um procedimento de análise de dados em experiências de Emissão Acústica, com base no conceito de Função de Transferência.

O sistema considerado na determinação da função inclui os efeitos de propagação através do corpo de prova e a influência da instrumentação de recepção, que afetam o sinal detectado nas experiências de Emissão Acústica.

A verificação do método é feita pela comparação da resposta do sistema, calculada por meio da Função de Transferência obtida anteriormente, com a resposta obtida experimentalmente em outra simulação.

São apresentados ainda um estudo bibliográfico da Emissão Acústica, e propõe-se uma explicação da geração deste fenômeno, a partir do estudo da dinâmica das discordâncias de Hirth e Lothe.

A B S T R A C T

An experimental simulation is done to establish a data analysis procedure for Acoustic Emission experiences, based on the Transfer Function concept.

The system used to determine the Transfer Function includes propagation and detecting instrumentation effects on the detected signal, on Acoustic Emission experiences.

The procedure is checked by comparing the system's response calculated through the Transfer Function, with the response obtained on another experimental simulation.

It is also presented a bibliographic study of Acoustic Emission, and an explanation of its generation is proposed, based on the study of dislocation dynamics of Hirth and Lothe.

I N D Í C E

<u>TÍTULOS</u>	<u>PÁGINAS</u>
CAPÍTULO 1 - TEORIA DE EMISSÃO ACÚSTICA	1
1-1. INTRODUÇÃO	2
1-2. PROCESSOS DE GERAÇÃO	3
1-3. CARACTERÍSTICAS	4
1-4. TRABALHO EXPERIMENTAL	6
1-5. APLICAÇÕES	9
1-6. DISCORDÂNCIAS E EMISSÃO ACÚSTICA	10
CAPÍTULO 2 - JUSTIFICATIVA DO MÉTODO EXPERIMENTAL	16
2-1. INTRODUÇÃO	17
2-2. PROPOSTA DA SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL COMO MÉTODO DE TRABALHO	17
2-3. SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL	19
2-3-1. ESCOLHA DO PROCESSO	19
2-3-2. MÉTODO DOS MÓDOS NORMAIS	20
2-3-3. ANÁLISE DO SINAL DE EXCITAÇÃO	24
FIGURA 2-1. GRÁFICO DA FUNÇÃO DIRAC APROXIMADA	28
CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3-1. DESCRIÇÃO	30
3-2. FABRICAÇÃO DO CORPO DE PROVA	30
3-3. EQUIPAMENTO	32

3-4. CALIBRAÇÕES	33
3-5. ACOPLAMENTO DO RECEPTOR	34
3-6. EXPERIÊNCIAS PRELIMINARES	36
3-6-1. MÉTODO FOTOELÁSTICO	36
3-6-2. ESTUDO DA FORMA DE ONDA	38
3-7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	39
FIGURA 3-1. CORPO DE PROVA	41
FIGURA 3-2. CIRCUITO ELÉTRICO DA EXPERIÊNCIA DE SIMULAÇÃO	42
FIGURA 3-3. CIRCUITO ELÉTRICO DO MÉTODO FOTOELÁSTICO	43
FIGURA 3-4. MONTAGEM DO MÉTODO FOTOELÁSTICO	43
FIGURA 3-5. ESTUDO DAS FORMAS DE ONDA	44
FIGURA 3-6. GRÁFICOS DE $ \bar{H}(w) $	45
FIGURA 3-7. GRÁFICOS DA SEGUNDA SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL	53
FIGURA 3-8. GRÁFICO DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DO SISTEMA	57
CAPÍTULO 4. ANÁLISE DE DADOS E CONCLUSÕES	63
4-1. ANÁLISE	64
4-2. CONCLUSÕES	67
4-3. SUGESTÕES	68
FIGURA 4-1. GRÁFICOS DE $ \bar{R}(w) $ TEÓRICO	69
FIGURA 4-2. GRÁFICO DE $ \bar{H}(w) $ DO ACELERÔMETRO/ $ \bar{H}(w) $ DO PZT	72
TABELA 1. COMPARAÇÃO DE $ \bar{R}(w) $ TEÓRICO COM $ \bar{R}(w) $ EXPERIMENTAL	64
TABELA 2. COMPARAÇÃO DE FREQUÊNCIAS	65

TABELA 3. COMPRIMENTOS DE ONDA	67
APÊNDICE	
1. TEORIA	79
2. APLICAÇÃO DA TEORIA	81
FIGURA A-1. GRÁFICO DE IMPEDÂNCIA DO TRANSDUTOR EMISSOR DA EXPERIÊNCIA DE SIMULAÇÃO	83
FIGURA A-2. GRÁFICO DE IMPEDÂNCIA DO ACELERÔMETRO	84
FIGURA A-3. GRÁFICO DE IMPEDÂNCIA DO RECEPTOR PZT	85
FIGURA A-4. GRÁFICO DE IMPEDÂNCIA DO TRANSDUTOR EMISSOR DO MÉTODO FOTOELÁSTICO	86



CAPÍTULO 1

TEORIA DA EMISSÃO ACÚSTICA

## 1-1 . INTRODUÇÃO

A produção de ruído por materiais que se deformam é um fenômeno conhecido há muito tempo. O rangido da madeira e o estalido produzido pelo latão quando deformado, são os exemplos mais comuns. Outro caso bem conhecido é a emissão de ruídos durante o tratamento térmico do aço, ruídos estes que são relacionados às transformações martensíticas.

Este fenômeno de produção de ruído é um processo de liberação de energia. Quando um dado material se deforma, acumula energia potencial elástica. Se em alguma região do material ocorrer uma deformação plástica localizada, a energia potencial acumulada na região será liberada, produzindo calor e/ou ondas de tensão. A produção de ondas de tensão é conhecida como Emissão Acústica, Atividade Microsísmica e Emissão de Ondas de Tensão.

Os primeiros estudos de emissão acústica (E.A., abreviadamente) estavam relacionados com fenômenos geofísicos e foram realizados no fim da década de 30 [1]. O objetivo destes estudos era a pesquisa de problemas de prevenção de acidentes em minas, como a previsão de desabamentos e irrupções de gás. Em 1948, Mason [6], publicou um trabalho no qual pesquisara a geração de ondas de tensão durante o processo de "Twinning" em latão. Em 1950, Kaiser, em sua tese de doutorado [2], [18], pesquisou Emissão Acústica em processos de deformação de aço, zinco, alumínio, cobre e chumbo. Observou também, que quando um corpo de prova era submetido à tensão mais de uma vez, a E.A. só era captada novamente depois que se ultrapassava o nível máximo de tensão atingido anteriormente. Este fenômeno já foi observado em vários materiais produtores de E.A., sendo conhecido como "Efeito Kaiser". É bom enfatizar que existem materiais que se comportam de maneira diferente dos observados por Kaiser, sendo acústicamente ativos durante o descarregamento [8], apresentando uma repeti

ção da emissão quando submetidos a um carregamento cíclico dentro do regime elástico.

Além disto, Kaiser sugeriu que a E.A. fôsse causada pelas deformações por cisalhamento das superfícies de contorno dos cristais, quando estes se deslocassem relativamente uns aos outros. Esta explicação não é aceita atualmente porque não há evidência de que este processo produza energia com a rapidez suficiente para gerar a E.A., que libera energia muito rapidamente. Mais ainda, o fenômeno citado por Kaiser não parece ser tão frequente quanto deveria ser, para produzir a emissão [5]. A explicação da E.A baseada na Teoria das Discordâncias é a que tem conseguido maiores evidências experimentais até agora.

O trabalho de Kaiser despertou o interesse pela E.A. em vários pesquisadores, e pode ser considerado como o iniciador das pesquisas recentes sobre o assunto.

## 1-2 . PROCESSOS DE GERAÇÃO

Quando um material é deformado, discordâncias são forçadas a se mover através da malha cristalina. De acordo com Gillis [5], entre dois pontos da malha nos quais a energia necessária para a movimentação da discordância é mínima, existe um ponto onde esta energia é máxima (distribuição cíclica). Este ponto de máximo é conhecido como "Barreira de Peierls" e, ao ultrapassá-lo, a discordância libera a energia acumulada para a passagem, que se transforma e se propaga como vibrações da malha.

Um modelo mecânico bastante simples foi proposto por Pollock [7]. Trata-se de uma mola presa transversalmente a uma corda elástica. Caso ocorresse um enfraquecimento súbito da mola, o sistema oscilaria transitóriamente até

chegar a uma nova configuração de equilíbrio. Este modelo foi usado para representar a geração de E.A. por processo rápidos de deformação.

Existem materiais, como os não-cristalinos, cujos mecanismos de geração de E.A. não são explicados por estes modelos. Em materiais compostos de uma matriz homogênea com fibras no seu interior, elas são atribuídas ao rompimento das fibras internas [19] e ao seu deslizamento dentro da matriz. Resultam dos dois processos emissões de características diferentes. Em corpos de prova de concreto [15], a emissão parece estar relacionada à heterogeneidade da matriz, aumentando com esta. Alguns pesquisadores, como Stephens [3], sugerem que a Emissão Acústica não deva ser atribuída a um único processo e sim à combinação de vários mecanismos de deformação.

### 1-3 . CARACTERÍSTICAS :

A Emissão Acústica consiste de pulsos de amplo espectro de frequência [3]. A amplitude dos pulsos, sua contagem total e contagem num determinado intervalo de tempo (Taxa de Emissão), variam de experiência a experiência, não só com a mudança de material, mas, também, com a variação das características do equipamento.

A energia transmitida pelo pulso é proporcional ao quadrado de sua amplitude [10]. A quantidade de energia de cada pulso depende de quanta energia pode ser armazenada pelo volume de material aonde foi gerado e de que proporção desta energia é liberada acústicamente. Os parâmetros deste processo são [3]: volume afetado, estado de tensão local antes da emissão, constantes elásticas do meio e suas propriedades de amortecimento.

A técnica de análise de E.A. através da contagem dos pulsos que

ultrapassam um determinado nível é uma das mais simples. Desta forma, a contagem é muito afetada pela sensibilidade da instrumentação. Afim de analisar as ocorrências no decorrer do processo de deformação, é usual adotar-se a Taxa de Emissão como parâmetro comparativo. Gerberich e Hartbower [11] constataram que esta Taxa é proporcional ao "Stress Intensity Factor". Com Taxas de Emissão elevadas, o intervalo de tempo entre os pulsos pode se tornar menor que o tempo de resolução do equipamento, e a E.A. aparece como um sinal contínuo. Esta emissão é característica de espécimes sem fissuras, e tem amplitude mais baixa e conteúdo de frequência mais alto que as emissões discretas, e são sensíveis à Taxa de Deformação [3]. As E.A discretas geralmente provêm de espécimes com fissuras, e são proporcionais à largura da fissura. Schofield [4], foi o primeiro a observar estas características da E.A.

O fato de um material ser um emissor fraco ou forte depende de muitos fatores. Entretanto, pode-se considerar como de mais importância a homogeneidade, a história do material e sua tensão de escoamento. Entende-se por história do material o conjunto de todos os processos de usinagem, fundição, tratamento térmico, etc, a que o corpo de prova é submetido durante sua fabricação. Estes processos têm influência na composição do corpo de prova e em outros fatores que afetam a E.A., como as tensões superficiais de usinagem.

A tensão de escoamento é especialmente importante, pois foi observado que se o máximo das emissões for alcançado antes da tensão de escoamento ser atingida, é indicação de que o espécime apresenta falhas internas. Já existem métodos para localizar falhas [16] e a identificação do mecanismo que as produz pode ser feita através da Análise Espectral do sinal e de sua Distribuição de Amplitudes [3].

## 1-4. TRABALHO EXPERIMENTAL

### 1) OBSERVAÇÕES GERAIS:

Dois métodos de ataque têm sido abordados em E.A.: o método de todos os sinais e o método dos sinais altos.

O objetivo do primeiro é registrar todos os sinais emitidos pelo corpo de prova durante o teste. É o que se faz na pesquisa dos mecanismos de geração, por exemplo. A técnica adotada neste caso é de calibrar o Limiar de Sensibilidade do equipamento de modo a registrar a máxima quantidade possível de pulsos. O nível do Limiar recomendado, neste caso, é o dobro do nível do ruído de fundo da instrumentação.

No teste de aceitação de um material do qual já se tivesse estabelecido o nível de emissões correspondentes a defeitos considerados como aceitáveis, seria usado o método dos sinais altos. A sensibilidade da instrumentação é calibrada em um nível imediatamente acima do considerado como aceitável. Só serão detetadas as emissões devidas a defeitos qualificados de graves dentro do critério estabelecido nas experiências anteriores. Este é o tipo de procedimento para uso da Emissão Acústica em controle de qualidade.

### 2) EQUIPAMENTO:

#### A - REQUISITOS MECÂNICOS

i) O primeiro problema em qualquer experiência de E.A. é submeter o corpo de prova a uma determinada carga, sem que o sistema de carregamen

to introduza ruídos que mascarem o sinal a ser captado.

ii) Outro requisito importante é que a estrutura da máquina possua uma rigidez muito superior à do corpo de prova, afim de não introduzir mais um parâmetro no sistema dinâmico.

iii) O terceiro item de natureza mecânica é ter um sistema de fixação para o corpo de prova que não gere emissões estranhas ao objetivo da experiência.

Máquinas de tração com acionamento mecânico, satisfazem os requisitos acima citados. Embora os ruídos mecânicos sejam de nível elevado, as suas frequências são suficientemente baixas em relação à frequência da emissão, podendo ser eliminadas no circuito de detecção, com filtro eletrônico do tipo passa-alto [3]. As máquinas de acionamento hidráulico, embora satisfaçam requisitos de rigidez, produzem ruídos de cavitação e turbulência, cuja faixa de frequência se sobrepõe à das emissões.

Quanto à fixação do corpo de prova, garras que funcionam por atrito não são adequadas, porque, durante o carregamento, o atrito produzido por elas contra o corpo de prova gera ruído, impossível de discriminar das outras emissões provenientes da zona central do corpo de prova, que são as que realmente interessam. Além disto, apresentam problemas de alinhamento.

A fixação do corpo de prova por meio de pino passante tem mostrado ser a mais conveniente. Entretanto, o estado de tensão em torno do furo no corpo de prova é bastante complexo e é uma fonte forte de emissões devido à concentração de tensões introduzidas por ele. Baseado no "Efeito Kaiser", Dunegan e outros [10], propuseram um dispositivo de pré-carregamento do corpo de prova nas áreas de fixação dos pinos, sem afetar a seção de testes.

## B - INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA:

Dois tipos de transdutor têm sido usados, a saber: cristais piezoelétricos e extensômetros de resistência ("strain gages"). No caso do objetivo ser a análise espectral do sinal, há necessidade de um transdutor com características planas em termos de resposta em frequência. No caso de serem usados transdutores piezoelétricos, isto se obtém por uma fixação do cristal, que introduza um certo amortecimento. Os acelerômetros em geral possuem esta característica, que é necessária para estender a resposta em frequência destes transdutores.

Quando se sabe a priori qual a frequência dominante da emissão, e se deseja um transdutor altamente seletivo em frequência, deve-se usar um cristal com uma sujeição que introduza um mínimo de amortecimento. Desta maneira, aproveita-se o fenômeno da ressonância para se conseguir amplificação e filtragem.

Um dos problemas maiores da detecção de E.A. quando se quer recolher o máximo de informações, é que a gama de amplitude do nível dos sinais pode se estender por mais de seis ordens de grandeza. Sendo a diferença de nível entre os sinais mais altos e mais baixos tão grande, é recomendável o uso de um amplificador logarítmico. Este aparelho, com escala de amplificação logarítmica, evita problemas com sobrecarga nos sinais de entrada muito altos, ou de pouca amplificação nos sinais muito baixos.

Quanto ao restante do equipamento, existem muitas opções, que dependem, entre outras coisas, do objetivo da experiência a realizar. Os métodos mais comuns de registro de dados são [3] a fotografia da tela do osciloscópio, o uso de registradores gráficos e a gravação em fita magnética. Este último método é o mais flexível do ponto de vista da análise dos resultados. En



tretanto, é limitado pela resposta em frequência do gravador usado, pois os sinais de Emissão Acústica ficam geralmente entre 10 KHz e 1 MHz [1].

A análise dos sinais da emissão tem sido feita de diversas maneiras. O método mais simples é a observação da forma de onda diretamente na tela do osciloscópio [6]. Mais recentemente, foi desenvolvida aparelhagem especializada para a contagem da distribuição de amplitudes, permitindo determinar a distribuição do número de emissões por faixa de amplitude [9]. Outro método bastante simples é a contagem da Taxa de Emissão, usando contadores digitais [10]. No caso das pesquisas dos mecanismos de geração, tem sido feito o estudo do conteúdo de energia e do conteúdo de frequência [3], com Analisadores de Espectro.

Um estudo bastante detalhado sobre o projeto de experiências de E.A. é o de Tatro [20], que apresenta várias sugestões sobre a avaliação do transdutor, o sistema de sujeição do corpo de prova, e a instrumentação.

## 1- 5. APLICAÇÕES

A diferença fundamental entre E.A. e o teste não-destrutivo de materiais denominado Ultrassom, está no fato do primeiro ser um teste puramente passivo, ao passo que o segundo engloba um gerador de sinal externo, podendo um único transdutor funcionar como emissor e receptor do sinal refletido dentro da peça. Na E.A., a fonte de sinal é o próprio defeito, durante a deformação do material. Desta forma, a emissão caracteriza-se por ser um teste dinâmico; destrutivo ou não, conforme a carga aplicada. A Emissão Acústica, portanto, indica as modificações ocorridas no material durante o carregamento, quando elas estão se processando. Isto a torna especialmente útil na detecção da fragilização por resfriamento [18] e por radioatividade [13].

O primeiro uso da E.A. foi em testes de integridade de motores de mísseis [12]. Atualmente, o seu uso já está difundido na detecção de falhas em materiais [17]. Além disto, ela pode ser usada no controle de soldas durante sua realização [14], ou para localizar falhas em vasos de pressão usados em indústrias de processamento [16]. Esta localização pode ser feita durante o teste hidrostático de aceitação ou durante a operação.

Muito trabalho em E.A. tem sido feito em Ciência dos Materiais. As pesquisas nesta área [18], incluem trabalhos em espécimes mono-cristalinos e poli-cristalinos, transformações martensíticas, corrosão sob tensão, etc.

#### 1-6. DISCORDÂNCIAS E EMISSÃO ACÚSTICA

A exposição desta secção, baseada no estudo de Hirth e Lothe da dinâmica das discordâncias [21], propõe uma justificativa para a geração de Emissão Acústica pelas discordâncias.

Para uma discordância reta helicoidal em um meio infinito, as equações de equilíbrio em termos do deslocamento elástico  $\underline{u}$  próximo à linha da discordância é dado por

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \underline{u} + (\mu + \lambda) \nabla (\nabla \cdot \underline{u}) \quad (1 - 1)$$

onde  $\rho_0$  é a massa específica,  $\mu$  e  $\lambda$  as constantes de Lamé.

Caso esta discordância seja paralela ao eixo z de um sistema fixo de coordenadas cartesianas, seu vetor deslocamento é  $\underline{u} = u_z \underline{z}$  e a eq.(1 - 1) toma a forma

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) u_z = \frac{\rho_0}{\mu} \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (1-2)$$

Esta equação é a das ondas de cisalhamento, onde

$$\left( \mu / \rho_0 \right)^{1/2} = c_t \quad (1-3)$$

Introduzindo, por conveniência, um sistema de coordenadas  $x', y', z'$  que se move com a discordância, a transformação de coordenadas é dada por

$$x' = \frac{x - vt}{(1 - v^2/c_t^2)^{1/2}}, \quad y' = y, \quad z' = z \quad \text{e} \quad t' = \frac{t - vx/c_t^2}{(1 - v^2/c_t^2)^{1/2}} \quad (1-4)$$

sendo  $v$  a velocidade de deslocamento da discordância.

A origem do novo sistema de coordenadas coincide com a origem do sistema inicial quando  $t = 0$ .

O campo de deslocamentos em torno da discordância deve aparecer como constante no tempo nos sistemas de coordenadas que se movem com a discordância. Em consequência disto  $u_z = u$  constante no tempo, e

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2}{\partial y'^2} \right) u_z = 0 \quad (1-5)$$

A condição de contorno a ser satisfeita na vizinhança da linha da discordância é

$$\lim_{\substack{\epsilon \rightarrow 0 \\ x' > 0}} \left[ u_z(x', \epsilon) - u_z(x' - \epsilon) \right] = -b, \quad \epsilon > 0 \quad (1-6)$$

Neste sistema de coordenadas estacionário em relação à discordância, uma solução para as equações da elasticidade é

$$u_z(x, y, z) = \frac{b}{2\eta} \tan^{-1} \frac{\gamma y}{x-vt} \quad (1-7)$$

aonde  $b$  é o módulo do vetor de Burgers

$$\underline{b} = \oint_c \frac{\partial \underline{u}}{\partial \ell} d\ell \quad (1-8)$$

sendo  $c$  um circuito fechado em torno da linha de discordância, e  $\gamma$  é dado pela expressão

$$\gamma = \left( 1 - \frac{v^2}{c_t^2} \right)^{1/2} \quad (1-9)$$

No limite,  $v = c_t$ , e considerações de energia mostram que as discordâncias não podem atingir velocidades superiores a  $c_t$ .

Para uma discordância reta de borde, movendo-se uniformemente, a equação do movimento é

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial t^2} = -\mu (\nabla \times \underline{G}) + (\lambda + \mu) \nabla H \quad (1-10)$$

aonde

$$\underline{G} = \nabla \times \underline{u} \quad H = \nabla \cdot \underline{u} \quad (1-11)$$

Atuando nesta equação com os operadores  $(\nabla \times)$  e  $(\nabla \cdot)$  e transformando-a para o sistema de coordenadas móveis, chega-se a duas equações, que são

$$\nabla_t^2 G = 0 \quad \nabla_e^2 H = 0 \quad (1-12)$$

aonde

$$\nabla_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_t^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_t^2} \quad (1-13)$$

e)

$$x_t = \frac{x - vt}{\gamma_t} \quad (1-14)$$

$\gamma_t$  sendo dado por

$$\gamma_t = \left( 1 - \frac{v^2}{C_t^2} \right), \quad C_t = (\mu/\rho_0)^{1/2} \quad (1-15)$$

e  $\nabla_e$  simboliza a expressão

$$\nabla_e = \frac{\partial^2}{\partial x_e^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_e^2} \quad (1-16)$$

na qual

$$x_e = \frac{x - vt}{\gamma_e} \quad (1-17)$$

e  $\gamma_e$  significa

$$\gamma_e = \left( 1 - \frac{v^2}{C_e^2} \right)^{1/2}, \quad C_e = \left( \frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (1-18)$$

$C_e$  é a velocidade de propagação das ondas longitudinais. Como para as discordâncias helicoidais, a velocidade limite para as discordâncias de borde é  $v = C_t$ .

Até agora, somente discordâncias em movimento uniforme foram consideradas, porque o campo de deslocamento aparece como constante no tempo em sistemas de coordenadas que se movem com a discordância.

O interesse principal está frequentemente na radiação de energia, ou na consideração de forças de amortecimento, como em testes de atrito interno. A formulação teórica do problema da radiação emitida por uma discordân-

cia oscilante fornece subsídios para o desenvolvimento da teoria dinâmica geral, que possibilita a determinação do campo de tensões resultante.

Da teoria desenvolvida de Hirth e Lothe, concluiu-se que em pontos afastados da discordância, as ondas irradiadas constituem a parte dominante da perturbação elástica, uma vez que as suas amplitudes diminuem com  $r^{-1/2}$ , enquanto o campo de tensões de uma discordância estacionária diminui com  $r^{-1}$ , sendo  $r$  o afastamento da discordância dos pontos considerados.

Ainda na mesma referência, quando se analisa a analogia das discordâncias com cordas vibrantes, chega-se à conclusão que, quando somente configurações locais são consideradas, esta analogia fornece resultados apenas aproximados. Entretanto, o interesse mais frequente é na energia de um segmento de discordância inserido em um arranjo complexo com várias outras. Neste caso, considerando-se o problema qualitativamente, o campo de tensões de uma discordância dada é cancelado na sua maior parte pelos campos de tensões das discordâncias restantes, fora de uma região aproximadamente cilíndrica com raio  $R$ , circundando a discordância. As incertezas no caso do cálculo das tensões pela analogia de corda, nestas condições, são praticamente as mesmas inerentes a um arbitramento de um valor para  $R$ , que é, aproximadamente, o do afastamento entre as discordâncias.

Das experiências de Emissão Acústica, sabe-se que, à medida que se aumenta o carregamento de um corpo de prova, aumenta a quantidade de regiões com defeitos, que vão cedendo sob o efeito da tensão crescente. Mas, como os comprimentos das linhas de discordância são limitados por estes defeitos, as linhas de discordância vão ficando mais curtas à medida que a tensão cresce.

De acordo com a analogia da corda, ao encurtamento das linhas de tensão, corresponderia um aumento da frequência de oscilação das discordâncias,

e, conseqüentemente, o aumento da frequência de vibração da onda irradiada.

Pode-se, então, tentar estabelecer uma correspondência entre o aumento da frequência desta irradiação com o aumento da frequência do espectro da E.A com o aumento do carregamento. Uma vez que a dissipação de energia das discordâncias é de natureza ondulatória, poder-se-ia supor que, em alguns casos, a E.A. fôsse gerada por estas oscilações.

CAPÍTULO 2

JUSTIFICATIVA DO METODO EXPERIMENTAL



## 2-1 . INTRODUÇÃO

Como consequencia do levantamento bibliográfico sôbre a Emissão Acústica apresentado no Cap.1, chegou-se à conclusão de que a maior parte dos estudos feitos em E.A. não leva em conta a propagação do pulso antes de atingir o receptor. Nêstes estudos, o procedimento experimental limita-se a contar os pulsos, a calcular sua taxa de Emissão ou classifica-los por amplitude.

Em consequência dêstes métodos, a simples colocação do transdutor em um lugar diferente do corpo de prova é suficiente para que os resultados sejam muito diferentes. Ou então, experiências realizadas com o mesmo corpo de prova, de um dado material e geometria, fornecem resultados diferentes com receptores diferentes. É necessário, então, um método que leve em conta êstes efeitos.

## 2-2 . PROPOSTA DA SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL COMO MÉTODO DE TRABALHO

Estudando uma experiência de Emissão Acústica, observa-se que ela pode ser desmembrada em várias etapas, a seguir:

- i) Aplicação de carga no espécime
- ii) Geração, em algum ponto do corpo de prova, do pulso de E.A.
- iii) Propagação do pulso gerado, da fonte até o ponto onde está localizado o receptor. Estão incluídos aqui todas as distorções sofridas pelo pulso durante sua propagação em um meio limitado.

iv) Transformação do pulso mecânico em sinal elétrico, por meio de um transdutor. Esta transformação depende do tipo de transdutor receptor usado e do método de acoplamento dêste ao corpo de prova.

v) Amplificação do sinal elétrico.

vi) Observação do sinal elétrico em tela de osciloscópio e/ou processamento em outros aparelhos.

Dêste nosso estudo preliminar, torna-se evidente que o nosso problema ficará simplificado se o equipamento de recepção, incluindo o transdutor receptor e seu acoplamento ao espécime, fôr padronizado para todas as experiências. Desta maneira, usando corpos de prova de mesmo material e geometria, as diferenças entre os pulsos observados serão devidas sômente ao afastamento entre o receptor e a fonte, e a diferentes formas de pulso inicial.

Como já vimos anteriormente, existem procedimentos experimentais que permitem localizar a fonte dos pulsos. Mas, numa experiência de E.A., a forma do pulso na fonte é descohecida. É, portanto, impossível a determinação das transformações sofridas pelo pulso nêste caso.

A solução proposta para esta dificuldade é a realização de uma simulação experimental da Emissão Acústica. Nesta simulação, a geração do pulso é feita por um transdutor piezoelétrico colocado no interior do corpo de prova. Dêste modo, o pulso inicial é conhecido e é possível compará-lo ao observado. Assim, para um determinado corpo de prova e equipamento de recepção, conheceríamos o que acontece ao pulso inicial até que ele possa ser observado.

Aplicando o conhecimento obtido na simulação experimental a uma experiência de E.A. real, mantidos o mesmo corpo de prova e equipamento de recepção, teríamos informações sôbre a forma do pulso produzido por êste material.

Observando a simulação experimental, pode-se ver que existe uma analogia entre ela e a experiência de E.A., que é a seguinte:

i) A aplicação de carga no espécime na experiência de E.A., corresponde na simulação experimental a aplicação de uma voltagem.

ii) Ao processo de geração do pulso na experiência de E.A., corresponde na simulação a produção de um pulso mecânico pelo transdutor emissor, em resposta à excitação da voltagem aplicada.

iii) Os demais itens são iguais nos dois casos.

## 2-3 . SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL

### 2-3-1 . ESCOLHA DO PROCESSO

Uma vez decidido que o método de trabalho seria o de se proceder à simulação experimental da E.A., resta ainda o problema do próprio processo experimental, ou seja, que variáveis tomar e como correlacioná-las umas com as outras, de modo a obtermos uma relação entre o sinal inicial e o observado que exprima as transformações do processo em estudo.

Viu-se do Cap. 1, que o conteúdo de frequência, juntamente com o conteúdo de energia e a distribuição de amplitudes, são considerados como parâmetros do processo de geração de pulsos na E.A. [3]. Decidiu-se então, trabalhar com o espectro de frequência. Tomou-se esta decisão porque não se dispunha de um analisador de conteúdo de energia e porque não há sentido em se falar de distribuição de amplitudes em uma simulação, na qual os pulsos emitidos têm a amplitude controlada de antemão.

Verifica-se também, que, uma vez correlacionadas as características escolhidas do pulso inicial e do observado, o processo de transformação do pulso pelo sistema corpo de prova-equipamento de recepção estaria estabelecido, e que os detalhes de seu funcionamento estariam englobados.

Este tipo de raciocínio nos leva naturalmente ao conceito de Função de Transferência, e, tendo em vista a aplicação do método à E.A real,

que é um processo aleatório, decidiu-se, de acordo com a referência [25], adotar o método dos modos normais na análise do problema.

Antes, porém, de iniciarmos esta análise, é necessário ressaltar que antes de se chegar a estas conclusões, vários processos experimentais foram tentados, tendo por base a realização da simulação. Estes processos serão discutidos na descrição da parte experimental.

## 2-3-2 . MÉTODO DOS MODOS NORMAIS

A resposta do sistema considerado a uma excitação indicial  $\delta(x - x_0)$  sendo  $\delta(x)$  a função de Dirac, é  $G(x, x_0)$ , que é a sua Função de Transferência, ou função de Green.

Aplicando este conceito à Emissão Acústica, e resposta em um ponto da superfície do espécime de posição  $\underline{r}$ , em um instante  $t$ , um pulso  $P$  gerado no ponto  $\underline{r}_0$ , no instante  $t_0$ , é dado pela convolução

$$h(\underline{r}, t) = \int_D \int_0^t P(\underline{r}_0, t_0) G(\underline{r}, \underline{r}_0, t, t_0) d\underline{r}_0 dt_0 \quad (2-1)$$

$\underline{r}$  e  $\underline{r}_0$  são os vetores  $(x, y, z)$  e  $(x_0, y_0, z_0)$  e  $G(\underline{r}, \underline{r}_0, t, t_0)$  é a função de transferência do sistema.

Por simplicidade, consideraremos somente uma variável espacial, daqui em diante.

Tomando  $G(x, x_0, t, t_0)$  como função de transferência, temos na Equação do Movimento do sistema,

$$m(x)\ddot{G} + C(x)\dot{G} + A(G) = \delta(x - x_0) \delta(t - t_0) \quad (2-2)$$

sendo  $m(x)$  e  $C(x)$  funções da variável espacial  $x$  e  $A$  um operador diferencial linear auto-adjunto na variável  $x$ .

Para esta Função de Transferência, a resposta do sistema a uma excitação  $\tau(x_0, t_0) = \delta(x_0 - x_1) \delta(t_0 - t_1)$

é

$$H(x, t) = \int_D \left[ \int_0^t \tau(x_0, t_0) G(x, x_0, t, t_0) dt_0 \right] dx_0 \quad (2-3)$$

ou

$$H(x, t) = \int_D \left[ \int_0^t G(x, x_0, t, t_0) \delta(t_0 - t_1) dt_0 \right] \delta(x_0 - x_1) dx_0 \quad (2-4)$$

e portanto, a resposta do sistema será

$$H(x, t) = G(x, x_1, t, t_1) = G(x, x_1, t - t_1) \quad (2-5)$$

Supondo que o nosso sistema satisfaz as condições necessárias para a aplicação do método dos modos normais, isto é, ser fracamente amortecido, e que, além disto, sua resposta é estacionária no tempo, sua resposta a uma excitação indicial em termos dos modos normais é

$$G(x, x_0, t - t_0) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i(x) T_i(x_0, t') \quad (2-8)$$

$$\text{aonde } t - t_0 = t' \quad (2-9)$$

Substituindo (2-8) em (2-2), virá

$$m(x) \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{T}_i X_i + C(x) \sum_{i=1}^{\infty} \dot{T}_i X_i + \sum_{i=1}^{\infty} T_i A(x_i) = \delta(x - x_0) \delta(t') \quad (2-10)$$

Combinando a equação do movimento para vibrações livres não amortecidas com a expressão dos seus modos normais, vem

$$A(X_i) = m(x) \omega_i^2 X_i \quad (2-11)$$

aonde  $\omega_i$  é a frequência natural do  $i$ -ésimo modo.

Como a eq. (2-11) e as condições de contorno constituem um problema de valor característico, aplica-se a relação de ortogonalidade dos modos normais

$$\int_S m(x) X_i X_j dx = m_i \delta_{ij} \quad (2-12)$$

sendo  $m_i$  a massa generalizada do  $i$ -ésimo modo.

O método dos modos normais geralmente é utilizado no estudo de sistemas reais quando temos o caso de estruturas pouco amortecidas. Nesta situação, o acoplamento de modos através do amortecimento é desprezado, e, neste caso teremos

$$\int_S C(x) X_i X_j dx = c_i \delta_{ij} \quad (2-13)$$

aonde  $c_i$  é o amortecimento generalizado do  $i$ -ésimo modo

Aplicando-se (2-11) em (2-10), vem

$$m(x) \sum_{i=1}^{\infty} \ddot{T}_i X_i + C(x) \sum_{i=1}^{\infty} \dot{T}_i X_i + m(x) \sum_{i=1}^{\infty} T_i \omega_i^2 X_i = \delta(x - x_0) \delta(t') \quad (2-14)$$

A equação (2-14) reduz-se a um sistema de equações diferenciais desacopladas, através de (2-12) e (2-13), que são do tipo

$$m_i \ddot{T}_i + c_i \dot{T}_i + m_i \omega_i^2 T_i = X_i \delta(t') \quad (2-15)$$

Resolvendo (2-15), temos

$$T_i = \frac{X_i e^{-\xi_i w_i t'}}{m_i \left[ (1-\xi_i^2)^{1/2} w_i \right]} \text{ sen } \left\{ \left[ (1-\xi_i^2)^{1/2} w_i \right] t' \right\} \quad (2-16)$$

onde  $\left[ (1-\xi_i^2)^{1/2} w_i \right]$  é a frequência natural amortecida do i-ésimo modo.

Se fizermos

$$\hat{T}_i(t') = \frac{e^{-\xi_i w_i t'}}{m_i \left[ (1-\xi_i^2)^{1/2} w_i \right]} \text{ sen } \left\{ \left[ (1-\xi_i^2)^{1/2} w_i \right] t' \right\} \quad (2-17)$$

teremos, substituindo em (2-15)

$$T_i = X_i \hat{T}_i \quad (2-18)$$

Aplicando (2-18) em (2-8)

$$G(x, x_0, t') = \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x) X_i(x_0) T_i \quad (2-19)$$

sendo  $\hat{T}_j$  a resposta impulsiva do j-ésimo modo.

Como

$$\bar{G}_i(x, x_0, w) = \int_{-\infty}^{\infty} G_i(x, x_0, t') e^{-iwt'} dt' \quad \text{e} \quad \bar{T}_i(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{T}_i(t') e^{-iwt'} dt' \quad (2-20)$$

teremos, aplicando (2-20) em (2-19)

$$\bar{G}(x, x_0, w) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x) X_i(x_0) \bar{T}_i(w) \quad (2-20)$$

$\bar{T}_j(w)$  é a resposta indicial em frequência do j-ésimo modo.

A importância deste tipo de análise para a Emissão Acústica, vem do fato de que, a colocação do receptor em um nó do modo predominante de propagação levaria à completa anulação da resposta deste modo. A eq.(2-20) mostra que a resposta depende do modo, que é função das coordenadas espaciais, e de sua frequência. Então uma análise prévia do corpo de prova pelo método dos modos normais é necessária, de maneira a que os transdutores receptores sejam colocados nos pontos mais favoráveis, e que tenham características de resposta em frequência adequadas. A ressonância obtida colocando-se o transdutor no pico de um anti-nó de um modo de frequência igual à sua frequência natural pode ser usada para amplificação e filtragem.

### 2-3-3. ANÁLISE DO SINAL DE EXCITAÇÃO

O objetivo da nossa primeira simulação experimental foi determinar a Função de Transferência (Função de Green) do sistema corpo de prova-receptor. Para isto, o primeiro passo foi a escolha da função de excitação.

Seja  $S(x_0, t_0)$  a nossa função de excitação. A resposta do sistema a esta excitação será

$$H(x, t) = \int \int \left[ S(x_0, t_0) * G(x, x_0, t, t_0) \right] dx dt \quad (2-21)$$

Mas, sabemos que exprimindo em termos de transformada de Fourier

$$H(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{H}(x, w) e^{-iwt} dw \quad (2-22)$$

e, pelo Teorema da Convolução [24], temos ainda



$$S(x_0, t_0) * G(x, x_0, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}(x_0, w) \bar{G}(x, x_0, w) e^{-iwt} dw \quad (2-23)$$

De (2-21), (2-22) e (2-23), vem

$$\bar{H}(x, w) = \int_D \bar{S}(x_0, w) \bar{G}(x, x_0, w) dx_0 \quad (2-24)$$

Se  $S(x_0, t_0)$  fôsse a função de Dirac,  $\bar{S}(x_0, w) = 1$ , e então

$$\bar{H}(x, w) = \int_D \bar{G}(x, x_0, w) \delta(x_0 - x_1) dx_0 = \bar{G}(x, x_1, w) \quad (2-25)$$

Devido ao fato de não se dispor de um analisador de tempo real necessário à análise de pulsos isolados, utilizou-se um pulso repetitivo que pudesse ser analisado com o equipamento disponível.

O sinal escolhido foi um pulso quadrado de amplitude  $h$ , duração  $\zeta$  e periodicidade  $T$ .

A Transformada de Fourier deste sinal é

$$\bar{S}(x_0, w) = \frac{hT}{2\pi} \frac{\text{sen}(\pi \zeta/T)}{(\pi \zeta/T)} \quad (2-26)$$

Quando  $\zeta/T \rightarrow 0$ ,  $\text{sen}(\pi \zeta/T) \rightarrow \pi \zeta/T$  e  $\bar{S}(x_0, w) \rightarrow \frac{hT}{2\pi}$

Aplicando-se este resultado em (2-25), temos

$$\bar{H}(x, w) = \frac{hT}{2\pi} \int_D \bar{G}(x, x_0, w) \delta(x - x_0) dx_0 \quad (2-27)$$

Para uma dada posição de recepção  $x_0$ , (2-27) tem a forma

$$\bar{H}_\ell(x_\ell, x_0, w) = \frac{hT}{2\pi} \bar{G}_\ell(x_\ell, x_0, w) \quad (2-28)$$

onde  $\ell = 1, 2, 3, \dots$  etc, são os pontos discretos tomados em  $x$ . Explicitando  $G_\ell$ , vem

$$\bar{G}_\ell(x_\ell, x_0, w) = \bar{H}_\ell(x_\ell, x_0, w) / (hT/2\pi) \quad (2-29)$$

O espectro de frequência, em forma vetorial, pode ser expresso pelo produto dos módulos das amplitudes por seus ângulos de fase. O conjunto dos módulos é denominado espectro de amplitudes, e o dos ângulos, espectro de fase. Como um analisador de espectro não fornece informações sobre o espectro de fase, temos então

$$|\bar{G}_\ell| = |\bar{H}_\ell| / (hT/2\pi) \quad (2-30)$$

Isto equivale a dizer que as ordenadas do espectro de amplitude da função de green do sistema, em unidades adimensionais, para um dado  $x_\ell$ , são iguais às ordenadas do espectro de amplitude da resposta divididas pela constante  $(hT/2\pi)$ .

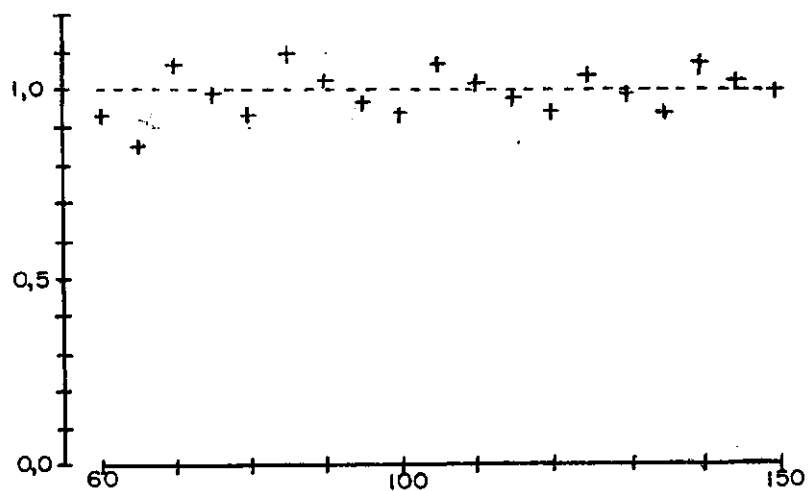
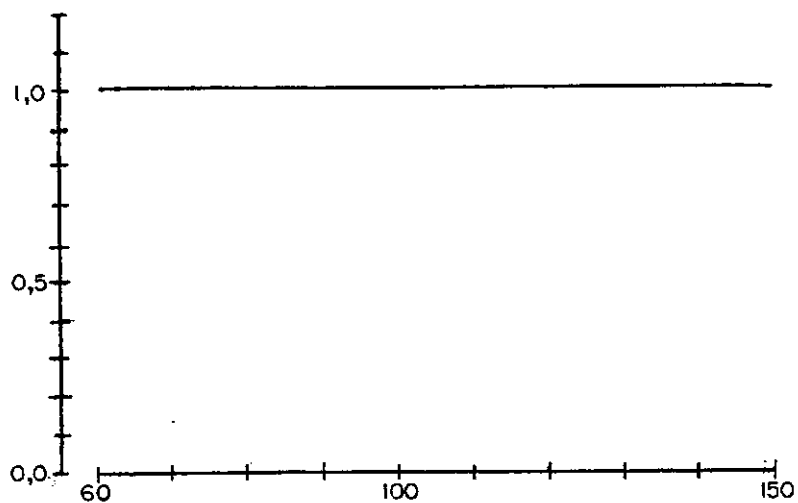
Conhecida  $|\bar{G}_\ell|$ , se tomarmos uma excitação diferente  $|\bar{E}(x_0, w)|$ , obteremos a resposta

$$|\bar{R}_\ell| = |\bar{E}| |\bar{G}_\ell| \quad (2-31)$$

em um ponto dado  $x_\ell$

Os valores de  $|\bar{R}_g|$  calculados por (2-31) poderão ser comparados aos obtidos experimentalmente em uma segunda simulação.

Na figura (2-1) apresenta-se o gráfico da resposta em frequência da função  $\text{sen}(\pi \zeta/T) / (\pi \zeta/T)$ , usada como aproximação da função de Dirac, para comparação com o espectro plano do pulso ideal de Dirac.



ESCALAS:   HORIZ. — 1cm = 10KHz  
          VERT. — ADIMENSIONAL

fig. 2-1

C A P Í T U L O 3  
P R O C E D I M E N T O E X P E R I M E N T A L

### 3-1 . DESCRIÇÃO:

Três experiências foram realizadas para testar o método justificado no capítulo anterior.

O procedimento experimental consistiu em provocar uma excitação por meio de um transdutor piezoelétrico no interior de um corpo de prova, este transdutor sendo acionado por um gerador de função acoplado a um amplificador.

O sinal de resposta foi captado em diversos pontos do corpo de prova e o seu espectro de amplitude foi obtido por meio de um analisador, nas duas simulações em que a excitação usada foi um pulso quadrado periódico. Na experiência restante, usou-se uma excitação harmônica senoidal e registrou-se somente a resposta no domínio do tempo. Os sinais de resposta foram registrados por meio do dispositivo de memória da tela do osciloscópio aonde eram projetados.

### 3-2. FABRICAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Escolheu-se o "epoxy"(EPIKOTE SHELL) como material de fabricação do corpo de prova devido à facilidade de confecção do corpo de prova com um transdutor no seu interior.

O transdutor escolhido para isto foi uma pastilha "PZT", com 6,4 mm de diâmetro e 1,2 mm de espessura. Este transdutor foi usado devido às suas dimensões, que permitiam sua colocação no interior do molde.

O molde usado consistia de três partes; duas tampas retangulares e uma alma, também retangular, na qual foram cortados o formato do corpo

de prova e o canal de enchimento do molde. As duas tampas têm 12,5 mm de espessura e foram feitas, uma de alumínio e a outra de acrílico. A alma tem 6,9 mm de espessura e também é de alumínio. O conjunto é mantido em posição por meio de parafusos.

Além dos orifícios dos parafusos de fixação, a tampa de acrílico foi perfurada em mais dois pontos. Estes dois últimos furos têm diâmetro de 1 (um) milímetro e igual separação, servindo para a passagem dos fios do transdutor.

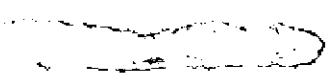
Depois que o transdutor foi posicionado, os furos de passagem dos fios foram vedados com borracha de silicone. Esta vedação também serviu para manter o transdutor no lugar durante a polimerização.

Uma vez feito isto, revestiu-se as superfícies interiores do molde com o preparado "Dow Corning 107", para evitar que o "epoxy" aderisse às paredes do molde depois de curado. Depois disto, o molde foi montado e aparafusado. A mistura "epoxy" foi, então, vertida dentro do molde.

Depois da cura, o corpo de prova foi retirado de dentro do molde e teve seu contorno acertado por meio de serra e lixa. Não foi dado polimento nas superfícies para evitar a criação de tensões superficiais.

Finalmente, o corpo de prova foi colocado sobre uma base de madeira com calços de espuma de borracha para isolá-lo de vibrações mecânicas externas e os fios do transdutor foram soldados a um cabo coaxial blindado.

No lado oposto ao transdutor, aonde começa a seção de largura variável, traçou-se a linha de referência para o posicionamento. A partir desta linha, a distância até o ponto de colocação do receptor era medida com paquímetro, ao longo da linha média da face (fig. 3-1).



## 3-3 EQUIPAMENTO

De acordo com a figura 3-2, o equipamento usado foi o seguinte:

1. Gerador de Função - oscilador de amplo espectro, "Hewlett Packard" tipo 200 CD ou gerador de pulsos "Hewlett Packard" tipo 222 A.
2. Amplificador de alta frequência "Hewlett Packard" tipo 450 A.
3. Amplificador de medida - "Bruel and Kjaer" tipo 2606 ou "Hewlett Packard" tipo 460 A.
4. Analisador de espectro-marca "Tektronix", tipo 3L5 "plug-in unit".
5. Osciloscópio - um "Tektronix" tipo 564 B com base de tempo 3B3 e máquina fotográfica modelo C-12.
6. Transdutor receptor - acelerômetro modelo 4344P da "Bruel and Kjaer" ou transdutor tipo PZT da "Brush Clevite".

O transdutor emissor e o corpo de prova já foram descritos.

Um objetivo secundário da experiência foi enfatizar a influência do equipamento receptor no sinal recebido, e, por esta razão, foram usados dois transdutores receptores.

O acelerômetro tem frequência natural de 122 KHz e sensibilidade de 2,85mV/gf a 50 Hz. Quanto ao PZT, tem uma sensibilidade calculada de 13,7 Newton/Volt e sua frequência de ressonância é (quando o comprimento de onda é o dobro da espessura) de 1,4 MHz. As dimensões do PZT são 16 mm de diâmetro e 1,2 mm de espessura.



## 3-4. CALIBRAÇÕES

Para a primeira simulação o gerador de pulsos foi calibrado para uma abertura de pulso de  $3 \times 10^{-8}$  s, com uma taxa de repetição de 10 KHz. Nesta experiência, o ganho do amplificador de alta frequência foi fixado em 40 dB. O amplificador de medida usado nesta parte foi o "BRUEL AND KJAER", e o ganho variou de 74 dB até 54 dB à medida que o receptor se aproximava da fonte.

Nesta experiência, a sensibilidade vertical do osciloscópio variou de 0,5 a 5,0 Volts por centímetro de amplitude para os sinais no domínio do tempo, e de 0,001 a 0,05 Volts por centímetro de amplitude nos sinais da Análise Espectral. No primeiro caso a velocidade de varredura foi de  $50 \times 10^{-6}$  s/cm e no segundo foi 0,1 s/cm.

Após esta simulação, foi realizada a determinação das frequências de ressonância do sistema corpo de prova-receptor. Para isto, no lugar do gerador de pulsos foi utilizado um oscilador, com sinal de saída senoidal. A frequência do oscilador, para cada medição, variou continuamente de 60 KHz a 150 KHz, controlada por um contador digital, que era um 1191-C da "GENERAL RADIO". Nesta experiência, o ganho do amplificador de alta frequência ficou em 20 dB e o do amplificador de medida em 75 dB. As calibrações do osciloscópio foram as mesmas da experiência anterior.

Finalmente, na última experiência, que também foi uma simulação de Emissão Acústica, usou-se o gerador de pulsos com uma duração de pulso de  $20 \times 10^{-6}$  s e taxa de repetição de 10 Hz. Novamente, usou-se 40 dB no amplificador de alta frequência. A sensibilidade vertical do osciloscópio, para os sinais no domínio das frequências, variou de 0,0005 a 0,001 Volts por centímetro de

amplitude. Não foram feitas leituras de sinais no domínio do tempo e a velocidade de varredura foi conservada em 0,1 s/cm.

Na segunda simulação, o amplificador de medida usado foi o "Hewlett Packard" modelo 460 A, com ganho fixo de 40 dB. O uso de dois amplificadores diferentes, um na determinação dos  $|\bar{H}_\ell|$  e outro para  $|\bar{R}_\ell|$ , não é importante, pois, como estamos medindo espectros de amplitude, as características de distorção de fase dos amplificadores não influem no resultado. Como ambos amplificadores têm resposta em frequência plana na gama de frequências utilizada na análise, não existe diferença, entre os sinais de saída de um ou outro, que influam significativamente nos resultados.

O analisador foi calibrado de acordo com as especificações do fabricante, o que dá uma precisão nominal de  $\pm 5\%$  em amplitude e de  $\pm 6\%$  em frequência. A frequência central da análise era de 100 KHz, com o limite inferior da faixa de análise em 50 KHz e o superior em 150 KHz. Entretanto, em decorrência do próprio processo de calibração, o traço do osciloscópio teve de ser deslocado, e começa entre as marcações de 50 KHz e 60 KHz. Como a calibração é feita para intervalos de 10 KHz à partir da frequência central, usou-se 60 KHz como frequência inicial da análise.

### 3-5. ACOPLAMENTO DO RECEPTOR

O acoplamento transdutor-corpo de prova é ponto crítico da experiência, pois se o receptor não estiver corretamente ligado ao espécime, não fornecerá dados de confiança. É necessário, portanto, que a adesão seja firme e uniforme.

O critério de firmeza representa a invariabilidade das características de transmissão (frequências naturais e amortecimento, por exemplo) da camada de adesivo durante a tomada de dados, depois da cura.

O critério de uniformidade é a manutenção das características de transmissão em todos os pontos em que o adesivo seja usado, desde que na mesma quantidade e com tempo de cura igual.

Além destes critérios de caráter geral, para a nossa experiência o adesivo deveria ser de cura rápida e assegurar fácil remoção do transdutor, rompendo a camada de adesivo sem danificar o transdutor ou o corpo de prova.

As características de firmeza e uniformidade são perfeitamente satisfeitas pelos adesivos que curam por polimerização, como os de tipo "epoxy". Entretanto, a cura destes adesivos é lenta, o que nos faria perder muito tempo para a realização das medições em vários pontos do corpo de prova. Além disto, sua adesão é muito resistente, tornando difícil a remoção do receptor para o seu posicionamento em outro lugar.

O adesivo escolhido é uma solução de compromisso. Embora seja de cura rápida e não apresente problemas de firmeza, seu processo de cura é por evaporação de solvente, o que pode formar bolhas de ar na camada de adesivo entre o transdutor e o corpo de prova. É possível que isto tenha introduzido erros nas medidas, apesar de todos os cuidados que eram tomados durante o processo de colagem.

### 3-6. EXPERIÊNCIAS PRELIMINARES

#### 3-6-1. MÉTODO FOTOELÁSTICO

O objetivo desta experiência era desenvolver um método de observação da E.A. através do efeito fotoelástico.

O corpo de prova usado foi uma barra de secção retangular, feita de "epoxy". Utilizou-se como molde um tubo de PVC, e o corpo de prova foi cortado do molde, depois da cura, por meio de fresa. O transdutor emissor usado era um PZT-4 de "Brush Clevite", com 1/2" de diâmetro e 1/4" de espessura, frequência natural de 155 KHz, colocado no interior da barra.

A montagem experimental está na figura 3-4 e o circuito elétrico utilizado está na figura 3-3.

O equipamento utilizado foi o seguinte:

1. Gerador de função - oscilador "Hewlett Packard" 200 CD, produzindo uma onda senoidal contínua de 155 KHz.
2. Gerador de pulsos - "Tone-Burst Generator" da "General Radio", que seccionava o sinal do oscilador em porções de um ciclo, separados um do outro por intervalos de 20 milisegundos. Esta separação era necessária para a completa atenuação de um pulso antes da chegada do próximo. Além disto, o Gerador de Pulsos fornecia o sinal de sincronização para o acionamento do osciloscópio e do estroboscópio.
3. Amplificador de potência - "Mc Intosh" modelo M C 3500.
4. Amplificador de medida - "Hewlett Packard" modelo 460 A.
5. Transdutor receptor - acelerômetro modelo 4344 P da "Bruel

and Kjaer".

6. Osciloscópio - "Tektronix" modelo 564 B com base de tempo 3B3 e amplificador de duplo traço 3A6.

7. Circuito de retardamento - "General Radio" tipo "flash delay 1531 P2".

8. Estroboscópio - "General Radio" tipo "strobotac 1531".

O polariscópio usado constava de duas placas "polaroid" e de duas placas de 1/4 de onda, e como fonte de luz a própria lâmpada do estroboscópio, de luz branca. O estroboscópio era sincronizado ao gerador de pulsos, através do circuito de retardamento.

O tempo de retardamento era necessário para que o sinal de sincronização disparasse o estroboscópio quando o pulso estivesse a meio caminho entre o emissor e um dos extremos do corpo de prova. Foi necessário determinar previamente a velocidade do pulso no corpo de prova utilizado, que foi de 2.400 m/s.

Entretanto, não foi possível observar qualquer efeito fotoelástico. Calculando-se a tensão mecânica produzida pelo transdutor, verificou-se que, mesmo na sua frequência natural, seria necessário aplicar cerca de 400V para obter efeito fotoelástico, mesmo com uma mistura "epoxy" calculada para alta sensibilidade. (Cálculos no Apêndice)

Mesmo assim, o intervalo de tempo do disparo é muito curto, de modo que seria preciso uma câmara fotográfica sincronizada ao estroboscópio para registrar o efeito fotoelástico do pulso.

## 3-6-2. ESTUDO DA FORMA DE ONDA

Nesta experiência, foi tentado estabelecer a correlação entre o sinal de excitação e o sinal da resposta do sistema através da observação da forma de onda da resposta. O corpo de prova e o circuito utilizado foram os mesmos da experiência anterior, sem o polariscópio, evidentemente.

O sinal de excitação era uma onda senoidal, de frequência variando entre 70 KHz e 30 KHz, subdividida em pulsos de um ciclo, separados por um intervalo de tempo equivalente a 124 ciclos.

A resposta era detetada em diversos pontos do corpo de prova, observando-se a forma de onda variando de ponto a ponto e, num mesmo ponto, a variação com frequência.

Destacaram-se dois tipos básicos de forma de onda, que aparecem nas figuras 3-5C e 3-5D.

No quadro da figura 3-5A, temos, os diagramas correspondentes à abertura da janela no gerador de pulsos, o sinal elétrico que chega ao transdutor emissor, e o sinal acústico captado pelo circuito de recepção.

Os dois tipos de sinais captados apresentam um certo intervalo de tempo para atingir o máximo e depois outro intervalo, ainda maior, para decrescer.

O amortecimento mecânico dos transdutores, faz com que, quando operados na ressonância, a amplitude do sinal só atinja seu nível máximo após um certo número de ciclos e que uma vez interrompida a excitação, a amplitude volte a zero após um intervalo de oscilações amortecidas.

No caso da experiência, um dos fatores mais importantes da

deformação do sinal eram que as características de frequência do amplificador de potência eram inadequadas para este tipo de experiência, resultando disto, um aumento do tempo de subida do sinal.

Isto é visto claramente no quadro da figura 3-5a

A diferença de forma de onda entre 3-5C e 3-5D, deve-se a que, quando a frequência da excitação estava em ressonância com o receptor, a subida de nível do sinal era mais lenta devido a um efeito mais forte do amortecimento do acelerômetro. Para as frequências de excitação afastadas da frequência natural do receptor, o amortecimento quase não atuava e o sinal subia mais rapidamente, apresentando após a subida, oscilações de amplitude em torno do nível máximo. Neste caso, o nível máximo era bem inferior ao obtido em operação na ressonância. Observações análogas foram feitas próximas à ressonância do transdutor de excitação.

### 3-7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos são apresentados de duas maneiras:

a) Fotografias, das medições da primeira simulação, mostrando em alguns pontos, a correlação entre o sinal recebido apresentado no domínio do tempo e das frequências. As exceções são as fotografias número 1(um), que é a análise do sinal que sai do Gerador de Pulsos.

Na metade superior desta fotografia, está a Análise do sinal de 0 Hz a 1MHz. O traço vertical central do retículo é a coordenada de 500 KHz e o traço horizontal do meio é o seu nível zero de amplitudes.

A metade inferior é a análise de 50 KHz a 150 KHz do mesmo sinal, sendo o traço vertical central a coordenada de 100 KHz. Seu nível de amplitude zero é o traço horizontal inferior do retículo.

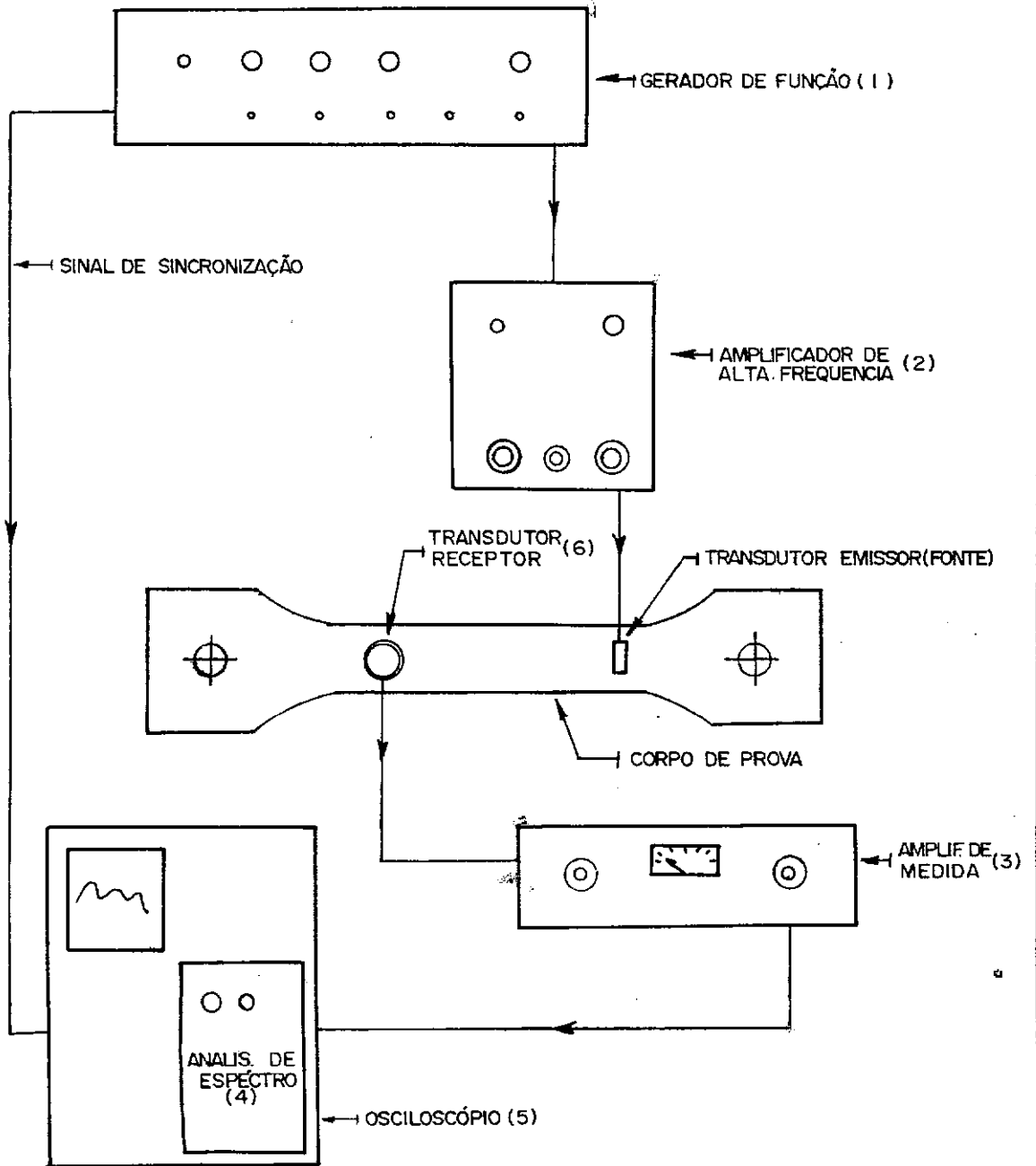
Em todas as outras fotografias, a metade superior é o sinal no domínio do tempo e a inferior é o mesmo sinal no domínio das frequências. Na metade superior, o nível zero de amplitudes é o traço horizontal que passa pelo meio do sinal (o terceiro, de cima para baixo). Na metade inferior, o nível zero de amplitudes é o traço horizontal inferior do retículo.

O primeiro traço vertical, nestas fotos, na parte inferior, é a coordenada de 50 KHz.

b) Nos gráficos da  $|\bar{H}(w)|$  e  $|\bar{R}(w)|$ , o nível inicial das amplitudes é o nível de amplitude zero. A frequência inicial, no eixo de abscissas, é 60 KHz, por motivos já explicados.







CIRCUITO DA SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL

fig 3-2

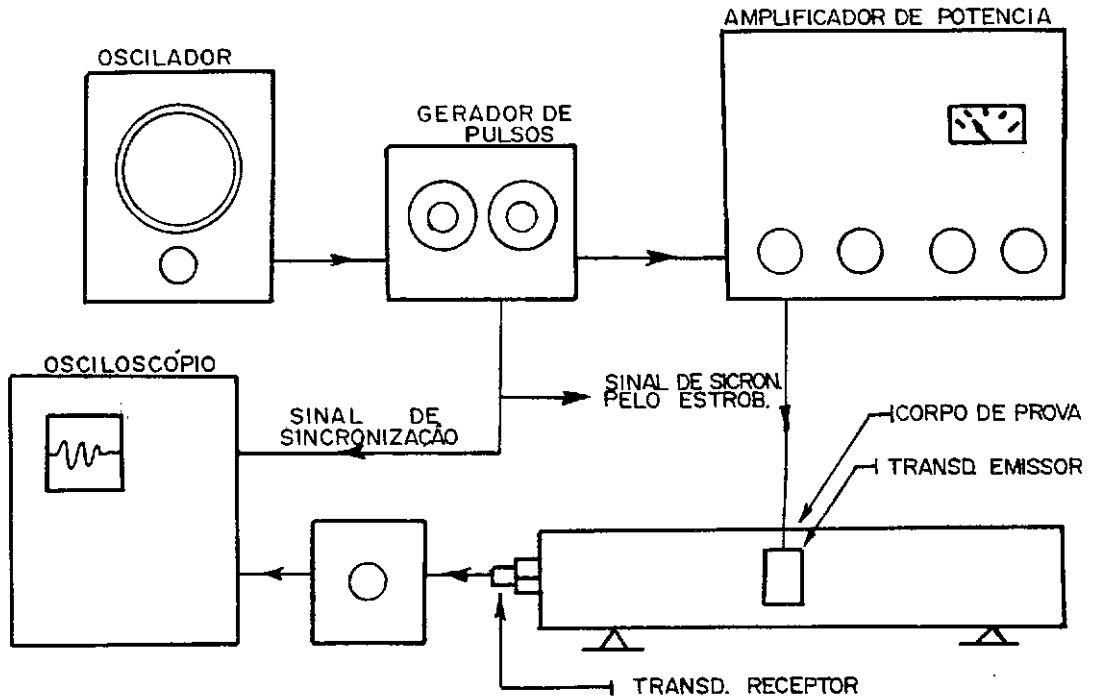


fig 3-3

CIRCUITO DO MÉTODO FOTOELÁSTICO

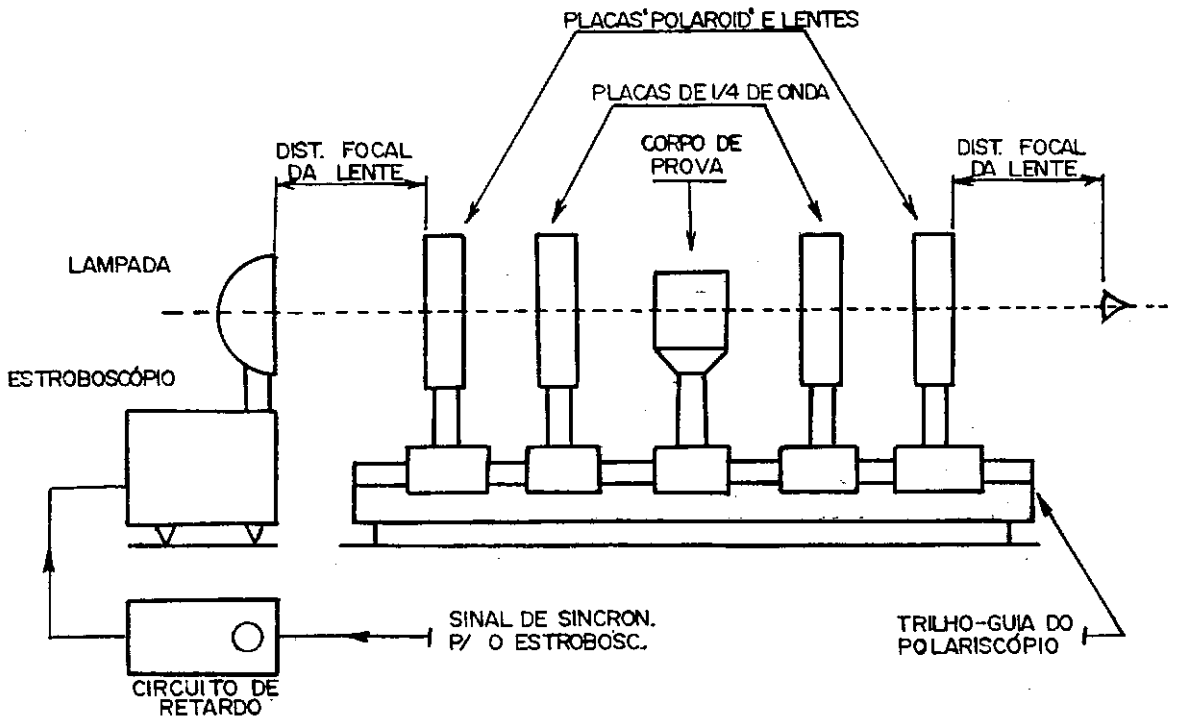


fig 3-4

MÉTODO FOTOELÁSTICO - MONTAGEM EXPERIMENTAL

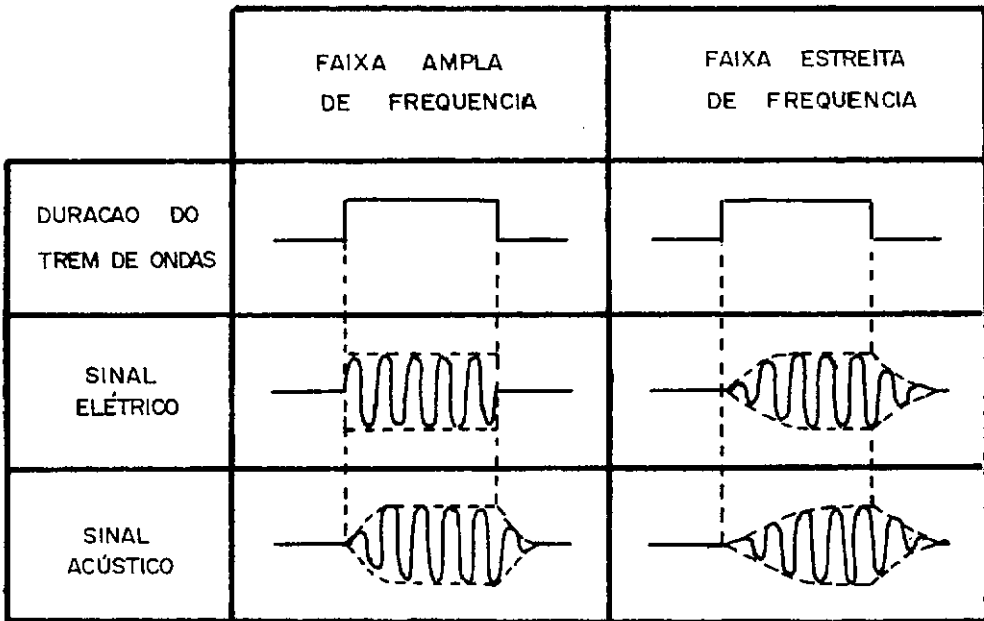


fig 3-5 a

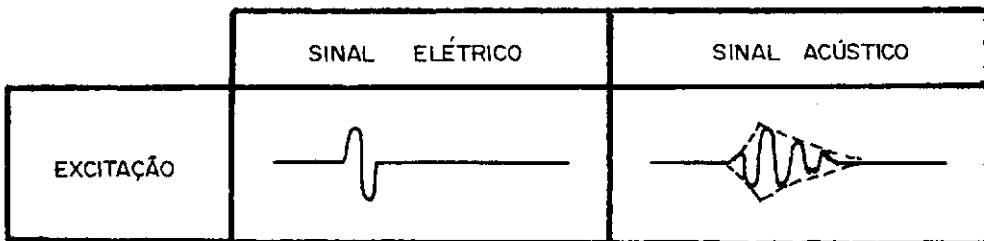
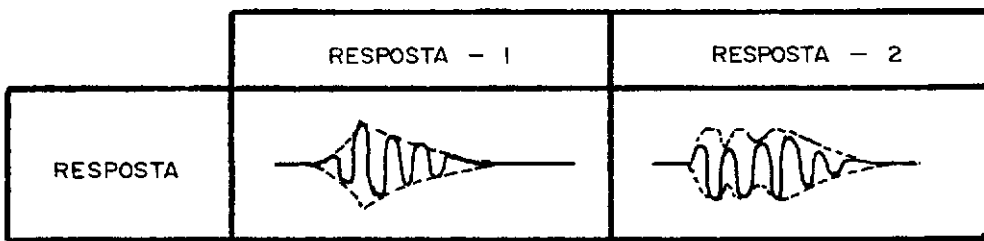


fig 3-5 b



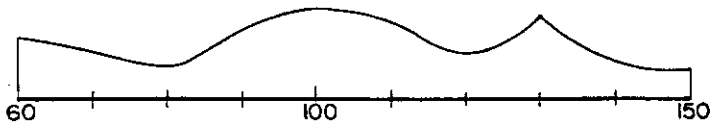
fig

3-5 c

3-5 d

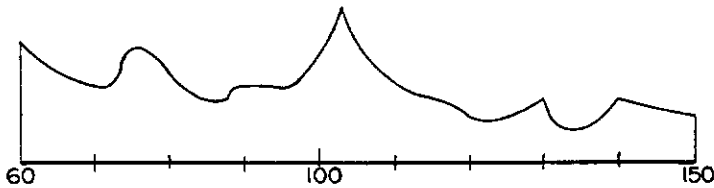
ANÁLISE DA FORMA DE ONDA

fig 3-6a

DIST. DA  
FONTE(mm)TIPO DO  
TRANSD.

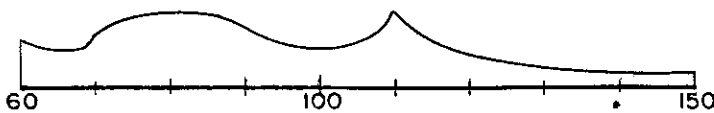
98

ACEL.



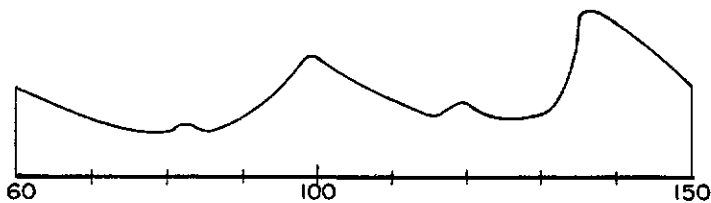
98

PZT



88

ACEL.



88

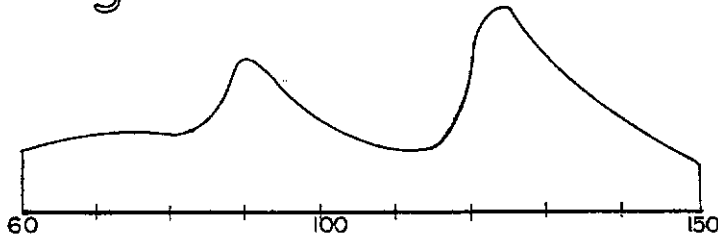
PZT

G R Á F I C O S D O S  $\bar{H}(\omega)$ 

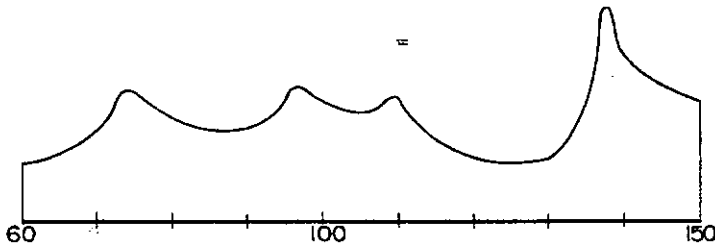
ESCALAS: HORIZONTAL - 1 cm = 10 KHz  
 VERTICAL - 1 cm = 1  $\mu$ V

fig 3-6b

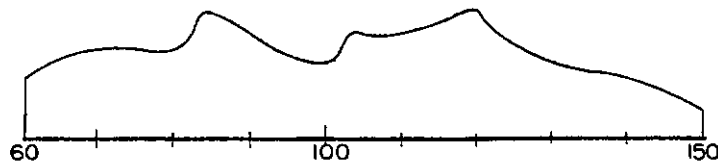
DIST. DA FONTE(mm) TIPO DO TRANSD.



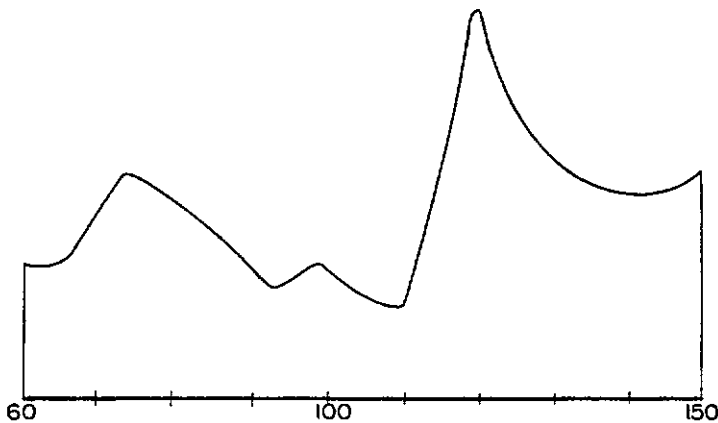
78 ACEL.



78 PZT



68 ACEL.

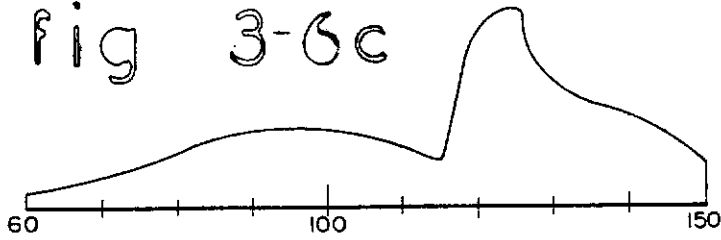


68 PZT

GRAFICOS DOS  $\bar{I}H(\omega)$

ESCALAS: HORIZONTAL - 1cm = 10 KHz  
 VERTICAL - 1cm = 1  $\mu$ V

fig 3-6c

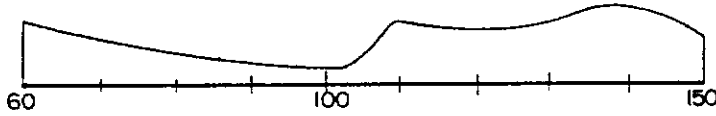


DIST. DA FONTE(mm)

TIPO DO TRANSD.

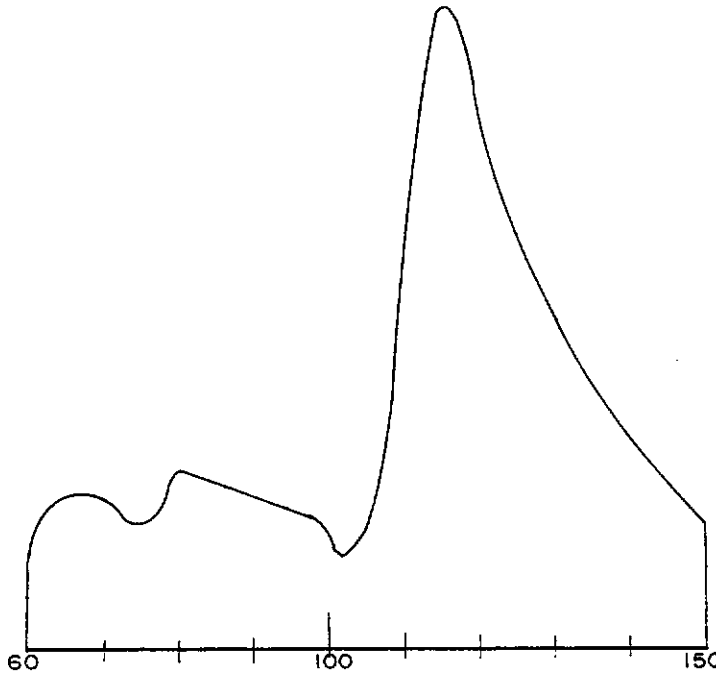
58

ACEL.



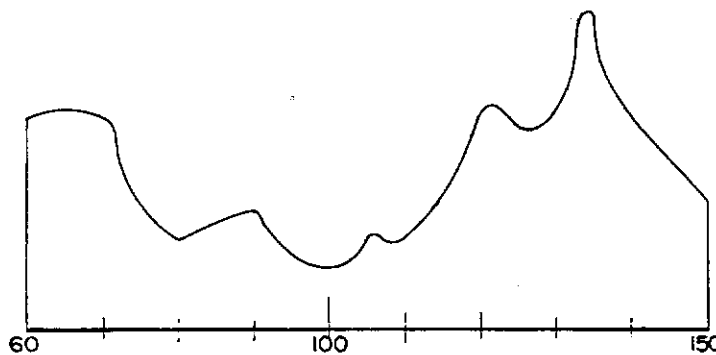
58

PZT



48

ACEL.



48

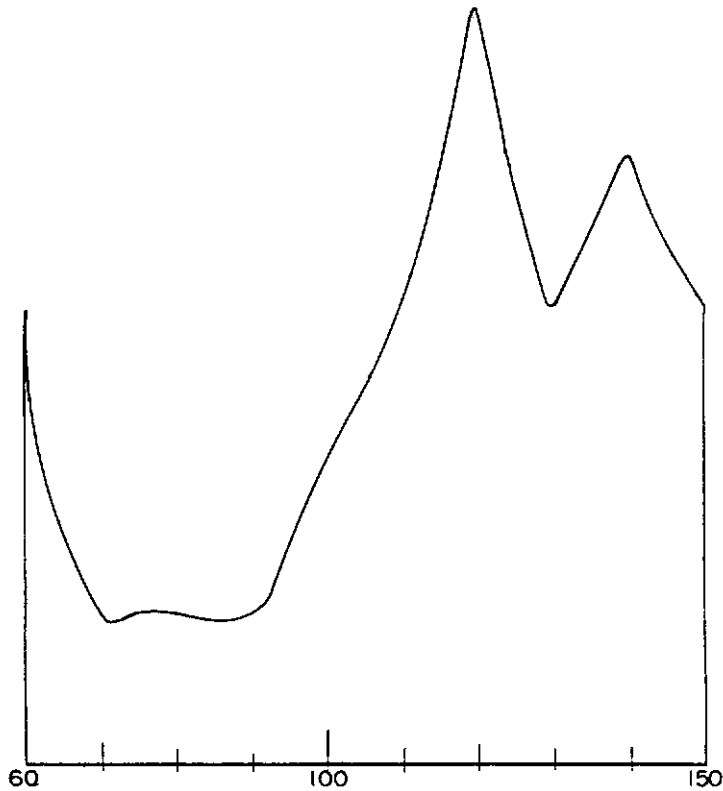
PZT

GRÁFICOS DOS  $|\bar{H}(W)|$

ESCALAS: HORIZONTAL - 1cm = 10 KHz  
 VERTICAL - 1cm = 1  $\mu$ V

fig 3-6d

DIST. DA	TIPO DO
FONTE(mm)	TRANSD.



38

PZT

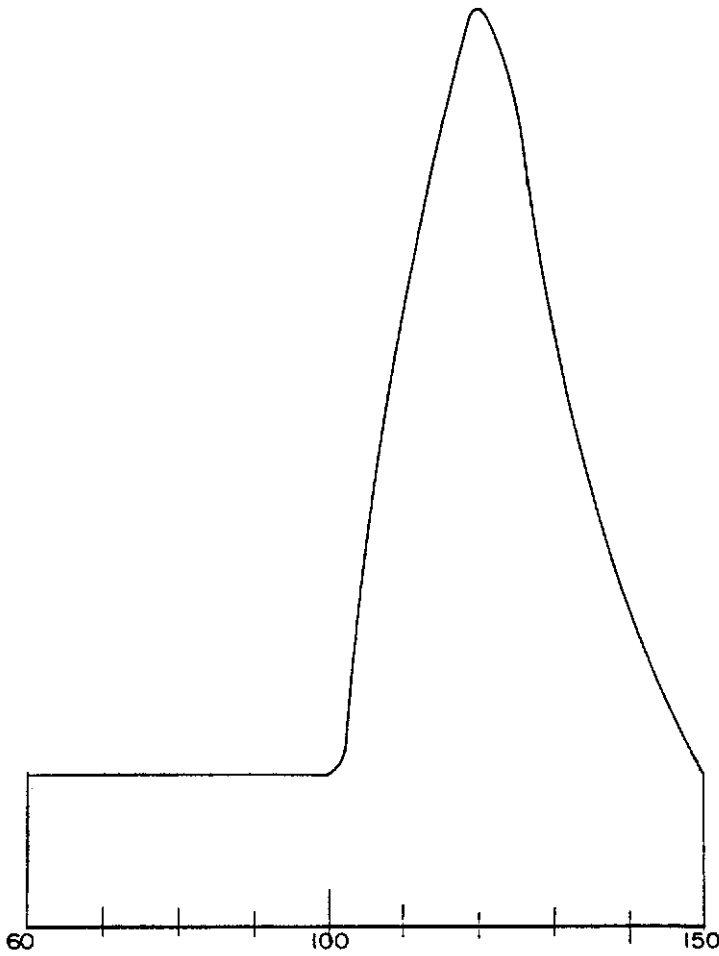
GRÁFICOS DOS  $|\bar{H}(\omega)|$ 

ESCALAS: HORIZONTAL - 1cm = 10KHz  
 VERTICAL - 1cm = 1  $\mu V$



fig 3-6e

DIST. DA	TIPO DO
FONTE (mm)	TRANSD.



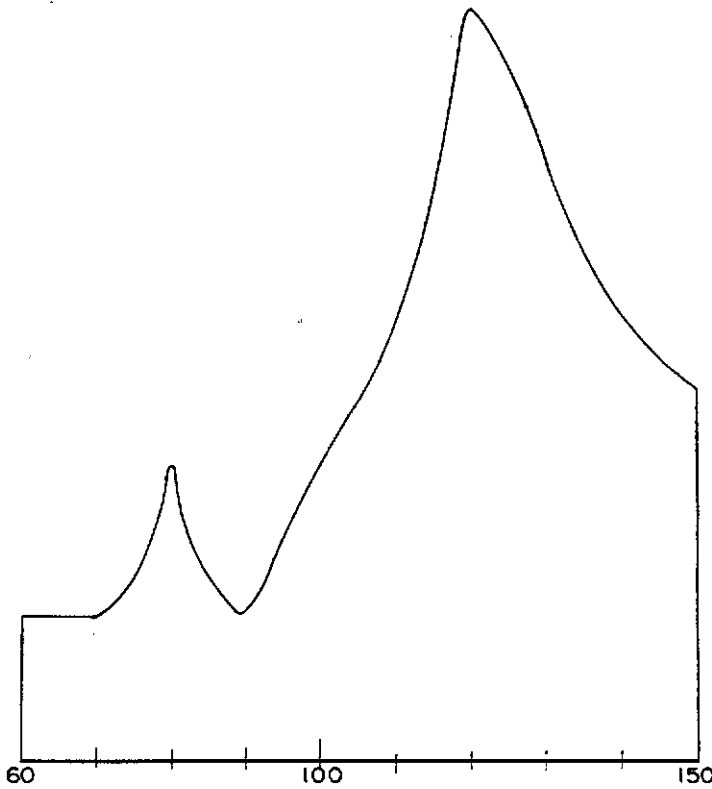
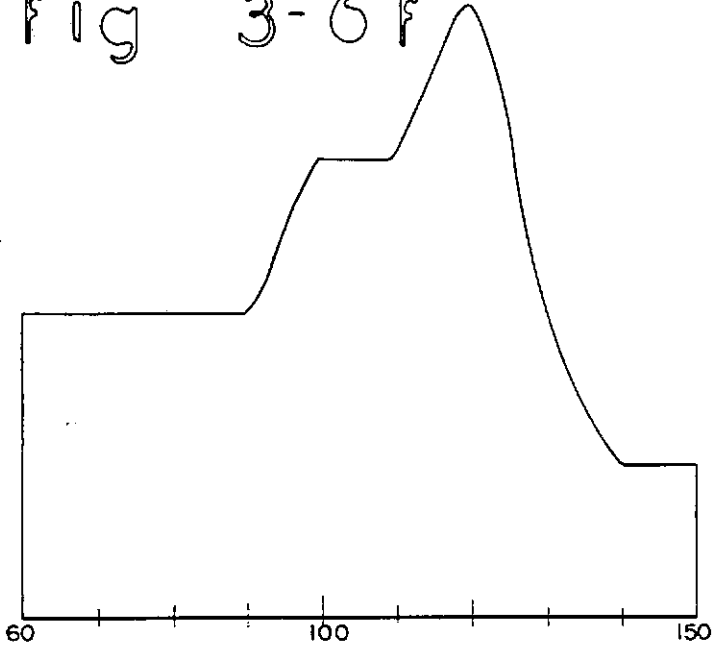
38

ACEL.

GRÁFICOS DOS H(ω)

ESCALAS: HORIZONTAL - 1cm = 10KHz  
 VERTICAL - 1cm = 1 μV

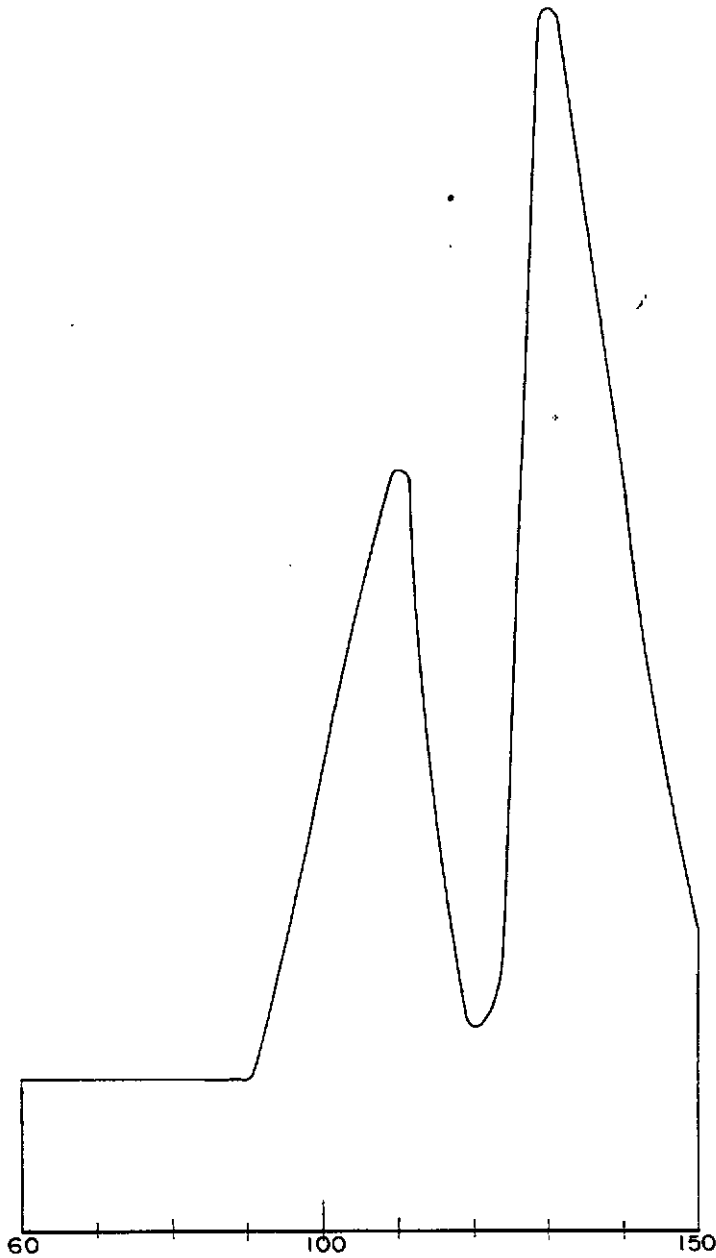
fig 3-6f

DIST. DA  
FONTE(mm)TIPO DO  
TRANSD.GRÁFICOS DOS  $\bar{|H(\omega)|}$ 

ESCALAS: HORIZONTAL - 1cm = 10KHz  
 VERTICAL - 1cm = 1  $\mu$ V

fig 3-6g

DIST. DA	TIPO DO
FONTE(mm)	TRANSD.



18

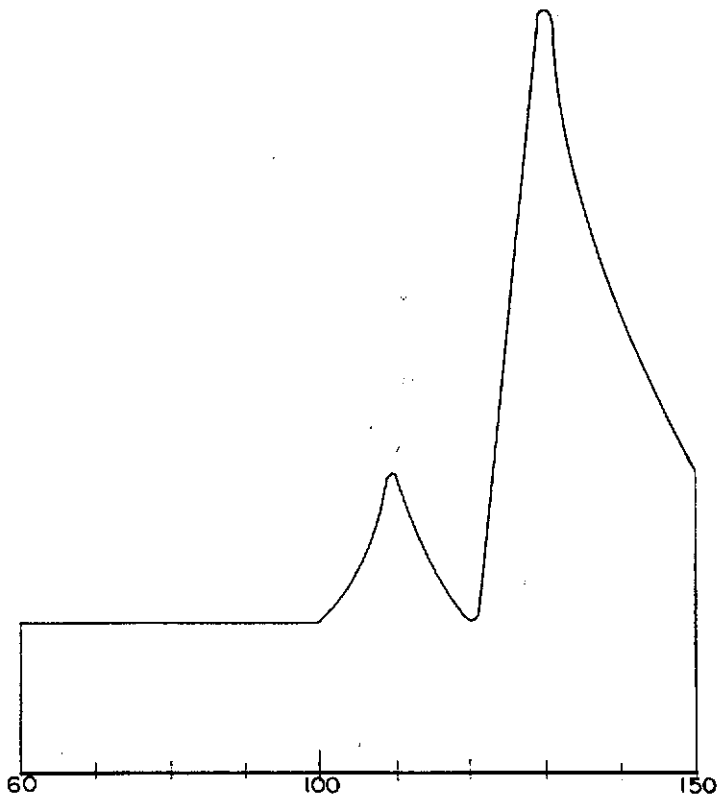
ACEL.

GRÁFICOS DOS  $\bar{H}(\omega)$ 

ESCALAS: HORIZONTAL - 1cm = 10KHz  
 VERTICAL - 1cm = 1  $\mu$ V

fig 3-6h

DIST. DA	TIPO DO
FONTE (mm)	TRANSD.



18

PZT

GRÁFICOS DOS  $|\bar{H}(\omega)|$ 

ESCALAS: HORIZONTAL - 1cm = 10KHz  
 VERTICAL - 1cm = 1  $\mu$ V

fig 3-7a

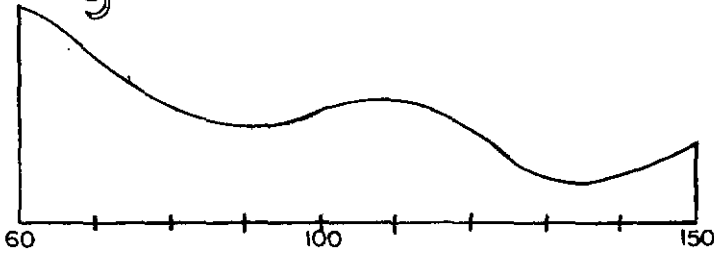
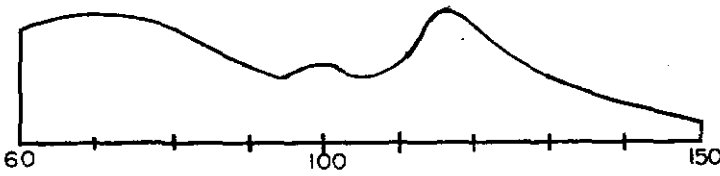


GRÁFICO DE  $|\bar{E}(\omega)|$

ESCALAS

HORIZ. — 1cm = 10 KHz

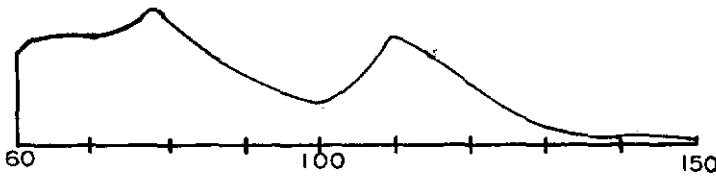
VERT. — 1cm = 100  $\mu$ V



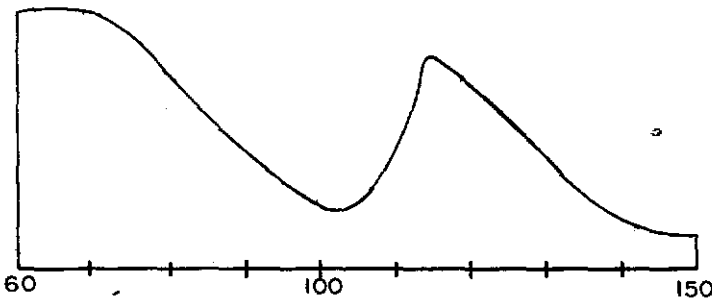
DIST. DA FONTE(mm)

98

fig 3-7 b



88



78

GRÁFICOS DOS  $R(\omega)$  EXPERIMENTAIS

ESCALAS

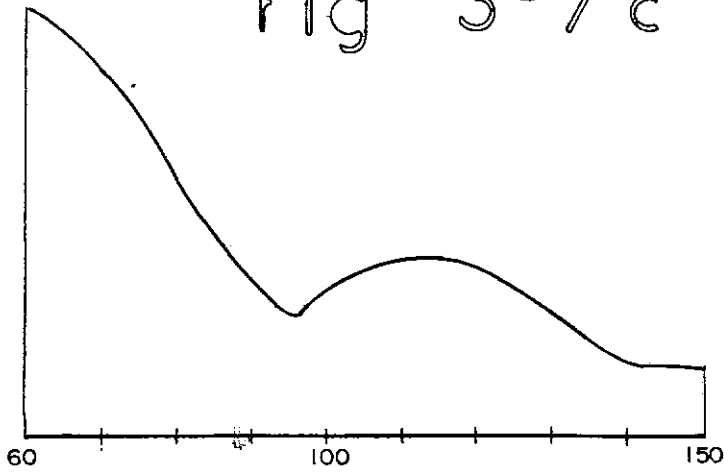
HORIZ. — 1cm = 10 KHz

VERT. — 1cm = 1  $\mu$ V

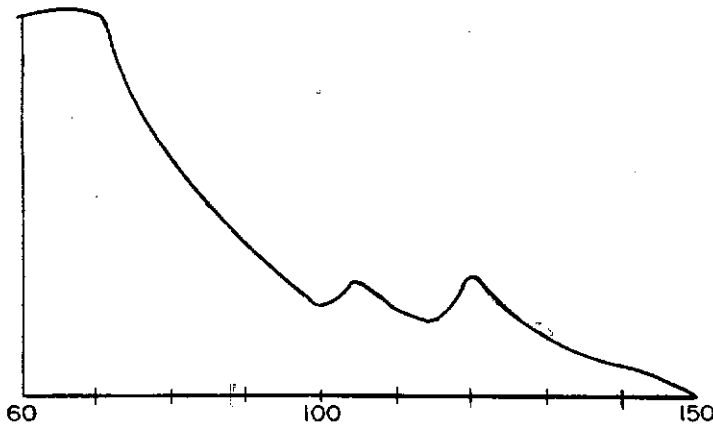
TRAND.

ACEL.

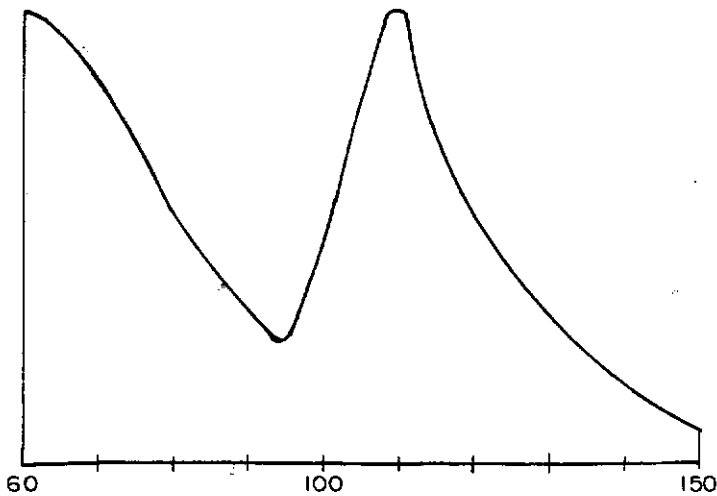
fig 3-7c

DIST. DA  
FONTE(mm)

68



58



48

GRÁFICOS DOS  $|\bar{R}(\omega)|$  EXPERIMENTAIS

ESCALAS

HORIZ. — 1cm = 10 KHz

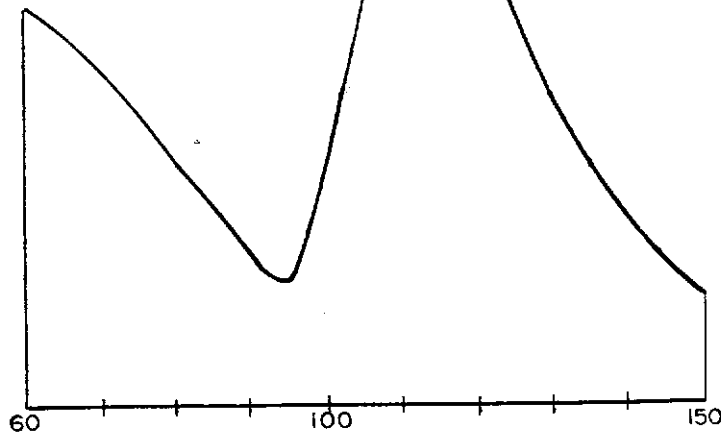
VERT. — 1cm = 1  $\mu$ V

TRANSD.

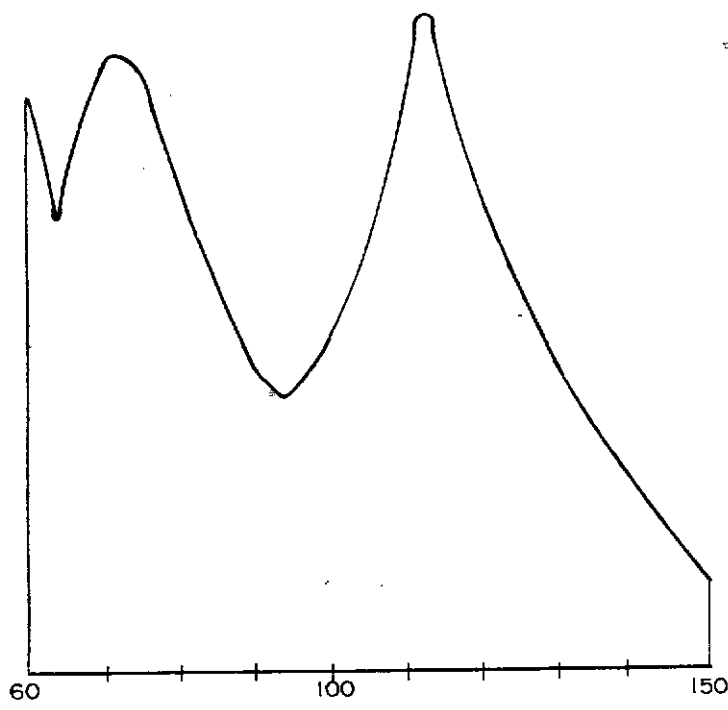
ACEL.

fig 3-7d

DIST. DA FONTE(mm)



38



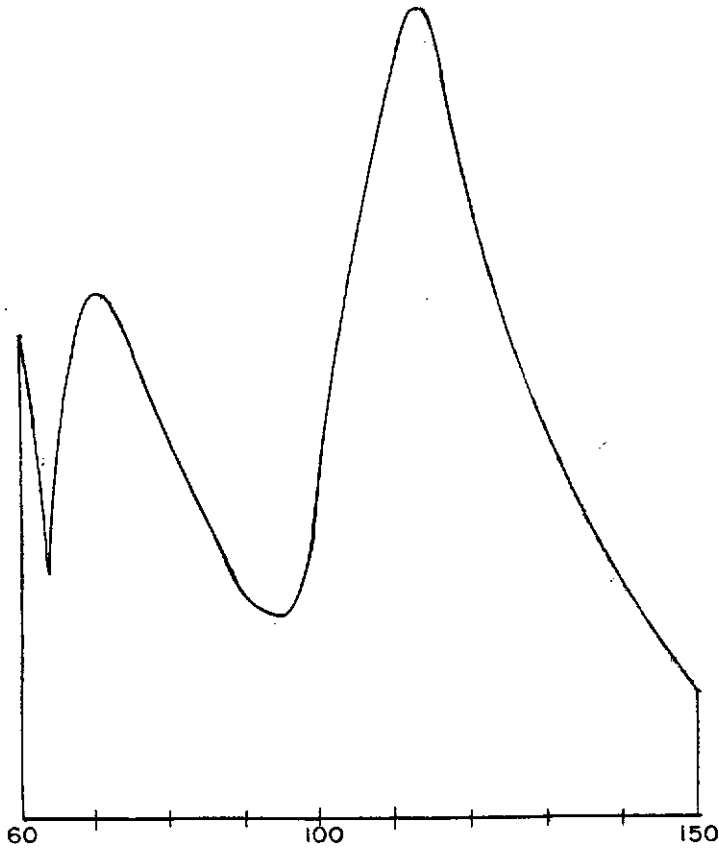
28

GRÁFICOS DOS  $IR(\omega)$  EXPERIMENTAIS

ESCALAS      HORIZ. — 1cm = 10KHz  
 VERT.        — 1cm = 1  $\mu$ V

TRANSD.  
 ACEL.

fig 3-7e

DIST. DA  
FONTE

18

GRAFICOS DOS  $|\bar{R}(\omega)|$  EXPERIMENTAIS

ESCALAS

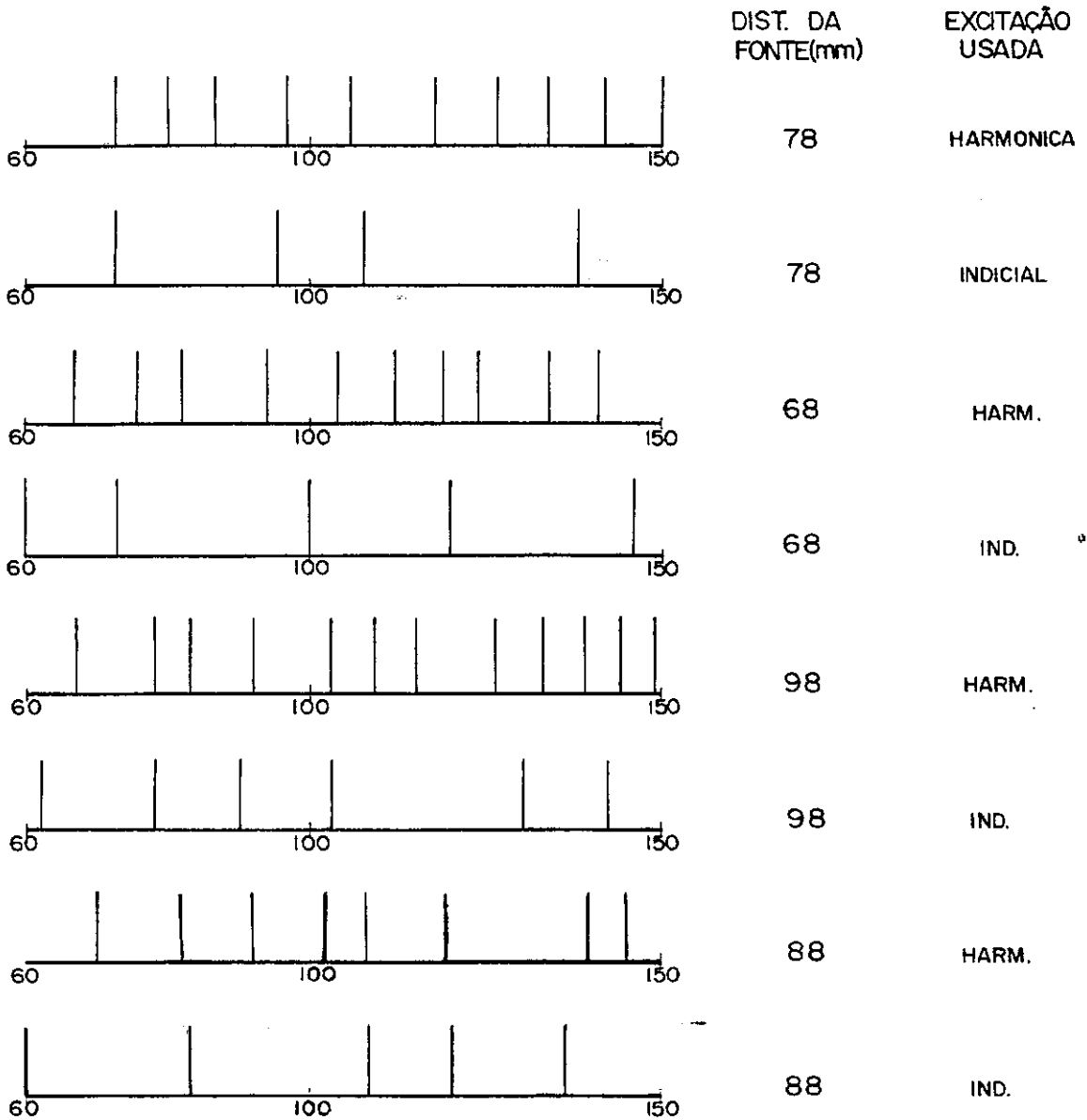
HORIZ. — 1cm = 10 KHz

VERT. — 1cm = 1  $\mu$ V

TRAND.

ACEL.





DETERMINAÇÃO DAS FREQUENCIAS NATURAIS  
DO SISTEMA CORPO DE PROVA — RECEPTOR

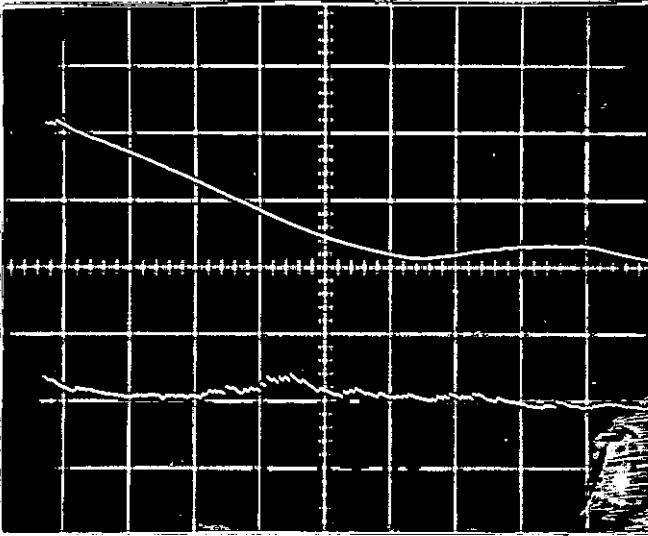


FOTO Nº1 . ANÁLISE DA EXCITAÇÃO

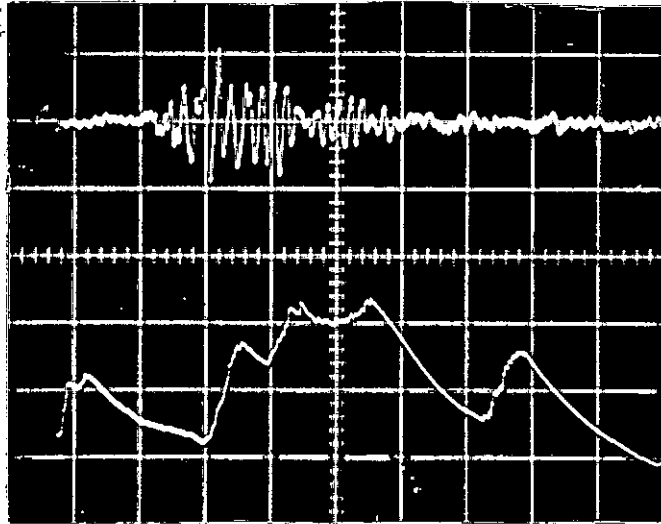
ESCALAS      HORIZONTAL SUPERIOR - 100 KHz/DIV  
                 HORIZONTAL INFERIOR - 10 KHz/DIV  
                 VERTICAIS                    - 0,002 V/DIV



FOTO Nº 2 . EQUIPAMENTO

RESPOSTAS H(t) e H(w)

DIST. DA FONTE - 98 m m



RECEPTOR

ACEL.

FOTO Nº 3

ESCALAS

HORIZONTAL SUPERIOR-50  $\mu$ s/DIV

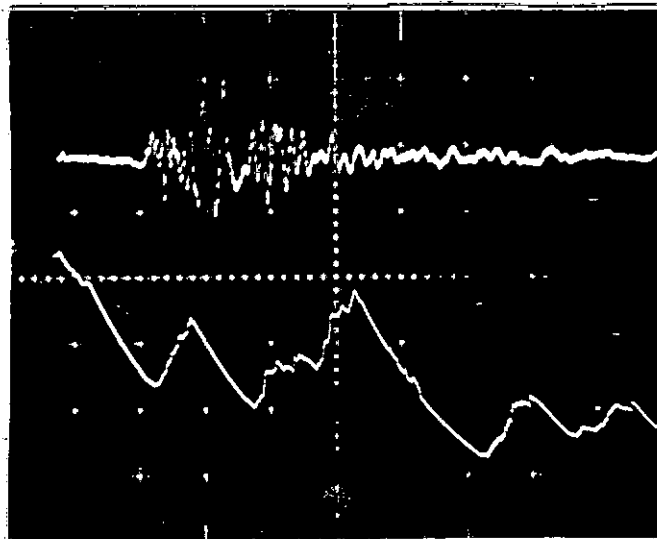
HORIZONTAL INFERIOR-10 KHz/DIV

VERTICAL SUPERIOR -0,5 V/DIV

VERTICAL INFERIOR -0,002 V/DIV

AMPL.

74 dB



RECEPTOR

P.T.T.

FOTO Nº 4

ESCALAS

HORIZONTAL SUPERIOR- 50  $\mu$ s/DIV

HORIZONTAL INFERIOR- 10 KHz/DIV

VERTICAL SUPERIOR- 1,0 V/DIV

VERTICAL INFERIOR- 0,002 V/DIV

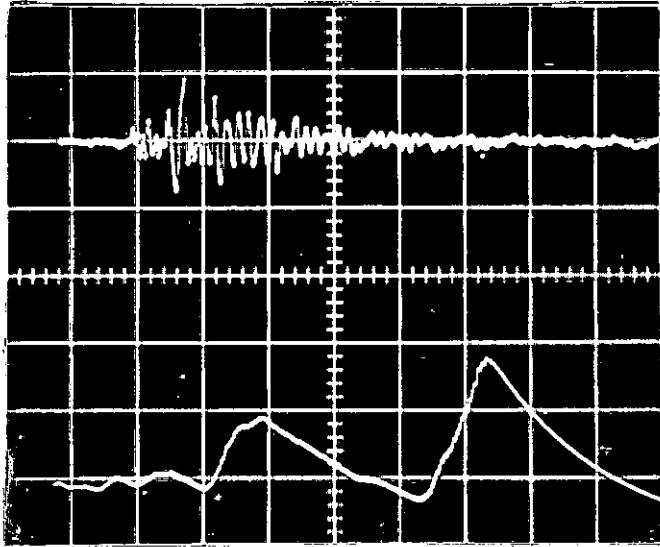
AMPL.

74 dB

RESPOSTAS  $H(t)$  e  $H(w)$ 

DISTÂNCIA DA FONTE - 88 m m

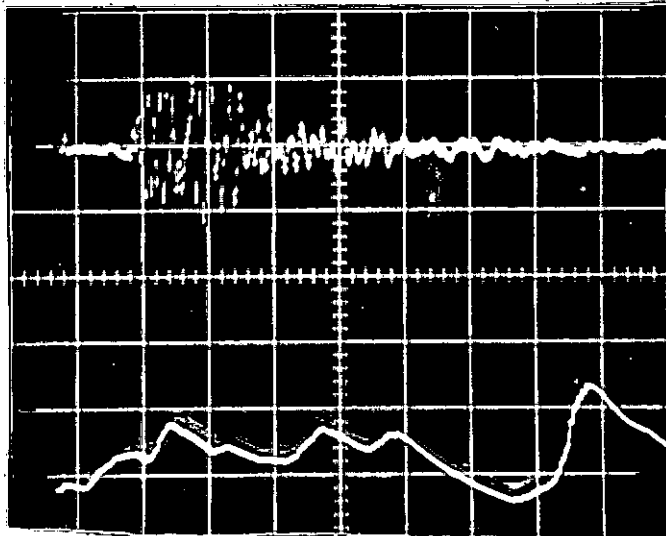
60



RECEPTOR

ACEL.

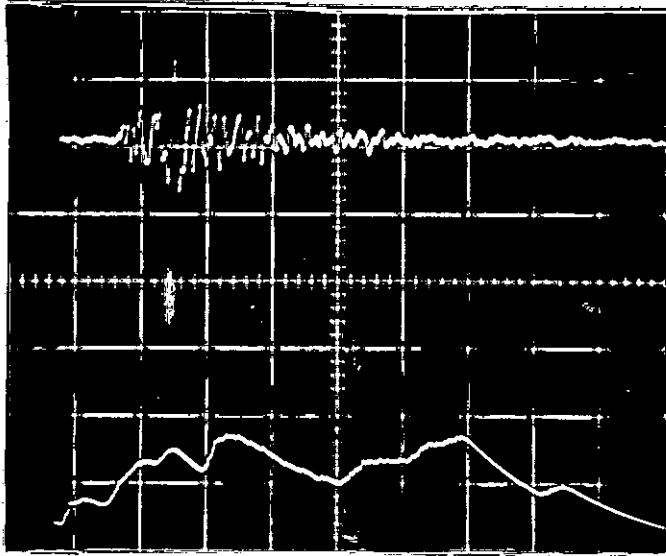
FOTO Nº 5      HORIZONTAL SUPERIOR - 50  $\mu$ s/DIV  
                   HORIZONTAL INFERIOR - 10 KHz/DIV      AMPL.  
                   VERTICAL SUPERIOR - 1,0 V/DIV      74 dB  
                   VERTICAL INFERIOR - 0,005 V/DIV



RECEPTOR

PZT

FOTO Nº 6      HORIZONTAL SUPERIOR - 50  $\mu$ s/DIV  
                   HORIZONTAL INFERIOR - 10 KHz/DIV      AMPL.  
                   VERTICAL SUPERIOR - 1,0 V/DIV      74 dB  
                   VERTICAL INFERIOR - 0,005 V/DIV

RESPOSTAS  $H(t)$  e  $H(\omega)$ BIST. DA FONTE - 68 m m

RECEPTOR

ACEL.

FOTO Nº 7

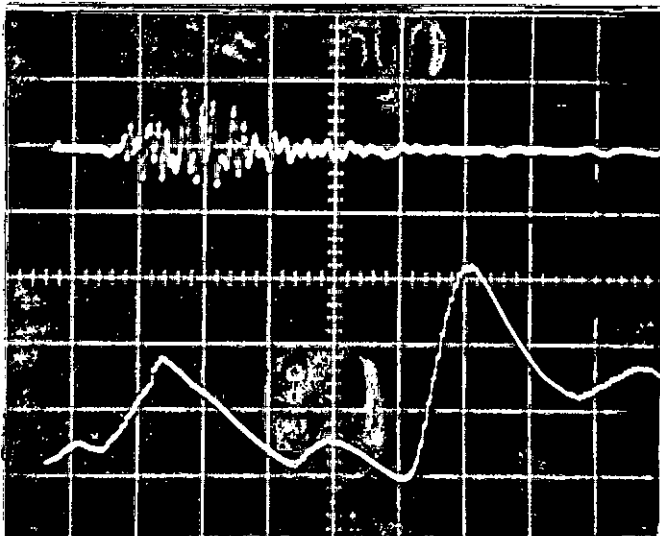
HORIZONTAL SUPERIOR - 50  $\mu$ s/DIV

HORIZONTAL INFERIOR - 10 KHz/DIV

VERTICAL SUPERIOR - 1,0 V/DIV

AMPL.

74 dB



RECEPTOR

PZT

FOTO Nº 8

HORIZONTAL SUPERIOR - 50  $\mu$ s/DIV

HORIZONTAL INFERIOR - 1,0 KHz/DIV

VERTICAL SUPERIOR - 0,2 V/DIV

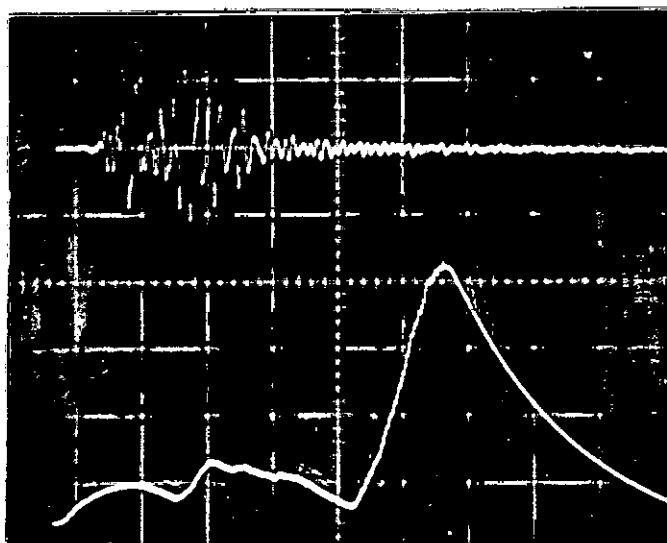
VERTICAL INFERIOR - 0,002 V/DIV

AMPL.

74 dB

RESPOSTAS  $H(t)$  e  $H(\omega)$ 

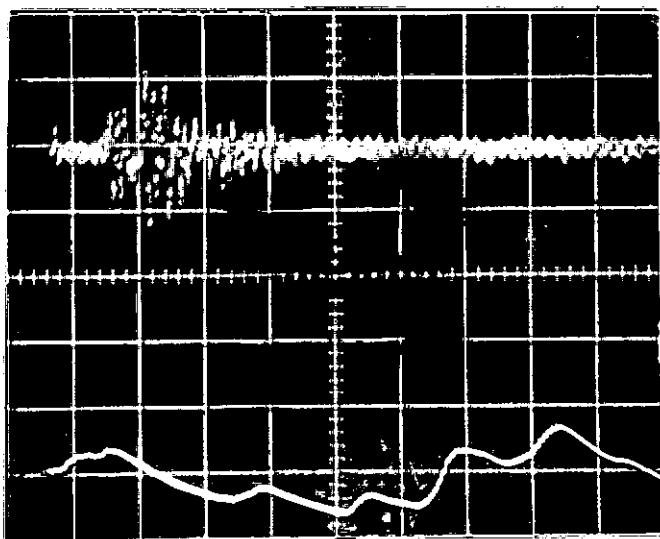
DISTÂNCIA DA FONTE - 48 m m



RECEPTOR

ACEL.

FOTO Nº 9    HORIZONTAL SUPERIOR - 50  $\mu$ s/DIV  
 HORIZONTAL INFERIOR - 10 KHz/DIV    AMPL.  
 VERTICAL SUPERIOR - 2,0 V/DIV    54 dB  
 VERTICAL INFERIOR - 0,01 V/DIV    74 dB



RECEPTOR

PZT

FOTO Nº 10'    HORIZONTAL SUPERIOR - 50  $\mu$ s/DIV  
 HORIZONTAL INFERIOR - 10 KHz/DIV    AMPL.  
 VERTICAL SUPERIOR - 0,2 V/DIV    74 dB  
 VERTICAL INFERIOR - 0,001 V/DIV

C A P Í T U L O 4

A N Á L I S E   D E   D A D O S   E   C O N C L U S Õ E S

## 4-1. ANÁLISE

Para comprovar a validade do método proposto, a resposta  $|\bar{R}(w)|$  do sistema e uma excitação  $|\bar{E}(w)|$  (figura 3-7A), determinada experimentalmente (figuras 3-7, a partir de B), é comparada com  $|\bar{R}(w)|$  obtida teoricamente (figuras 4-1) de acordo com a teoria do Cap. 3.

Na determinação teórica de  $|\bar{R}(w)|$ , primeiramente calcula-se  $|\bar{G}(w)|$  a partir da eq. 2-30, utilizando-se os gráficos de  $|\bar{H}(w)|$  determinados experimentalmente (figuras 3-6). A constante  $(hT/2\pi)$  é obtida substituindo-se  $h$  e  $T$  por seus valores utilizados na calibração do gerador de pulsos durante a primeira experiência de simulação. Estes valores são  $h=10$  Volts e  $T=10^{-4}$ , portanto,  $(hT/2\pi) = 1,59 \times 10^{-4}$  Volts.

Tabela 1 - Comparação de  $|\bar{R}(w)|$  teórico com  $|\bar{R}(w)|$  experimental.

DISTÂNCIA DA FONTE (m m)	FREQUÊNCIA (KHz)	$ \bar{R}(w) $ EXPERIMENTAL ( $\times 10^{-6}$ Volts)	$ \bar{R}(w) $ TEÓRICO ( $\times 10^{-6}$ Volts)
58	120	1,6	1,7
58	130	0,8	1,0
58	140	0,4	0,5
48	90	2,0	1,5
48	95	1,6	1,5
48	110	6,0	5,1
38	90	2,0	1,5
38	95	1,6	1,6



DISTÂNCIA DA FONTE (m m)	FREQUÊNCIA (KHz)	$ \bar{R}(w) $ EXPERIMENTAL ( $\times 10^{-6}$ Volts)	$ \bar{R}(w) $ TEÓRICO ( $\times 10^{-6}$ Volts)
38	110	7,6	7,8
38	115	8,5	8,7
38	150	1,4	1,3
28	60	7,6	7,1
28	105	5,6	5,6
28	120	6,4	6,0
28	150	1,2	1,3
18	100	4,8	5,3
18	105	7,7	7,8
18	110	10,0	9,8
18	135	3,9	4,1

Além disto, ocorrem as seguintes concordâncias de pontos máximos e mínimos:

Tabela 2 - Comparação de frequências

EVENTO	DISTÂNCIA	FREQUÊNCIA	FREQUÊNCIA
	DA FONTE (m m)	EXPERIMENTAL (KHz)	TEÓRICA (KHz)
MÁXIMO	58	120	120
MÍNIMO	48	95	102
MÁXIMO	48	110	118
MÍNIMO	38	95	90

EVENTO	DISTÂNCIA	FREQUÊNCIA	FREQUÊNCIA
	DA FONTE	EXPERIMENTAL	TEÓRICA
	(m m)	(KHz)	(KHz)
MÁXIMO	38	114	120
MÍNIMO	28	94	90
MÁXIMO	28	113	115
MÍNIMO	18	95	90
MÁXIMO	18	113	110

As melhores concordâncias entre as curvas teóricas e experimentais ocorreram com 48 m m e 38 m m de distância da fonte, sendo a segunda a melhor de todas. As curvas de 68 m m até 98 m m da fonte não apresentam concordância.

Um fator que deve ter contribuído para as discrepâncias entre valores experimentais e teóricos foi o desempenho do analisador. Conforme pode ser visto nos gráficos comparativos da excitação harmônica e indicial (figura 3-8), todas as frequências de ressonância do sistema determinadas com excitação indicial são também encontradas com excitação harmônica. Entretanto, várias frequências determinadas com excitação harmônica não aparecem com excitação indicial.

Caso consideremos intervalos de  $\pm 5\%$ , correspondentes ao erro nominal do analisador, em torno de cada frequência determinada por este aparelho, as ressonâncias determinadas somente com excitação harmônica estarão quase todas incluídas nêstes intervalos. Portanto, as limitações do analisador influíram muito no erro experimental.

Devido à complexa geometria do corpo de prova, suas frequên-

As características não foram determinadas teoricamente. Entretanto, algumas frequências determinadas experimentalmente apresentam comprimentos de onda iguais às dimensões características do corpo de prova (figura 3-1). No cálculo dos comprimentos de onda usou-se a velocidade de propagação do som no "epoxy", de  $V_D = 2.400$  m/s, calculada anteriormente.

Tabela 3 - Comprimento de Onda

Frequência (KHz)	Comprimento de onda (m m)	Dimensão Característica	Relação $R = d/\lambda$
$f_1 = 80$	$\lambda_1 = 30$	$d_1 = 60$ m m	$R_1 = 2$
$f_2 = 100$	$\lambda_2 = 24$	$d_2 = 25$ m m	$R_2 = 1$
$f_3 = 120$	$\lambda_3 = 20$	$d_3 = 60$ m m	$R_3 = 3$

Para observar a influência da mudança de receptor no sinal de resposta, traçou-se o gráfico da resposta do acelerômetro relativamente à do PZT (figuras. 4-2), dividindo-se  $|\bar{H}(w)|$  obtido com o acelerômetro pelo  $|\bar{H}(w)|$  obtido com o PZT (figuras. 3-6). Sendo a sensibilidade do PZT constante com a frequência, na faixa analisada, as variações se devem quase totalmente ao acelerômetro.

#### 4-2. CONCLUSÕES

a) A comparação dos  $|\bar{R}(w)|$  experimentais e teóricos mostra que o método proposto pode ser usado para fornecer informações sobre a E.A., pe

lo menos de maneira semi-quantitativa. A precisão dos dados obtidos dependerá das limitações do equipamento e de até que ponto o processo estudado pode ser considerado como linear.

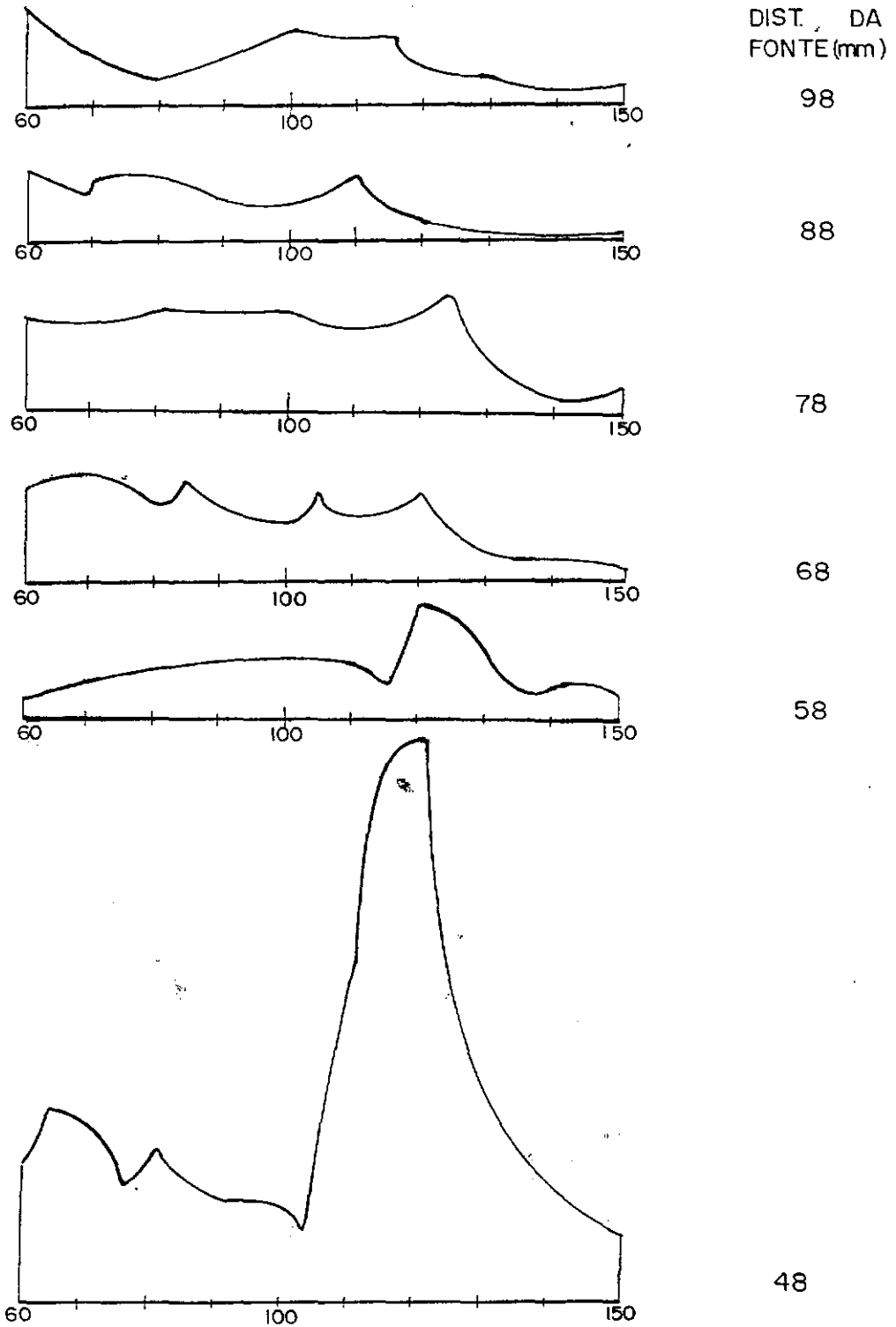
b) Em decorrência do estudo do problema de acoplamento, realizado no Cap. 3, concluiu-se que deve ser usado o mesmo adesivo da simulação experimental na experiência de E.A. que utilize as informações obtidas por esta simulação. Caso contrário, não se pode garantir que a função de transferência do sistema seja a mesma nas duas experiências.

#### 4-3 . SUGESTÕES

1) Sugere-se que a função de transferência seja determinada com um analisador de funções de transferência. Os aparelhos deste tipo usam excitação harmônica, que oferece maior precisão, e têm ainda a vantagem de fornecer o espectro de fase.

2) Caso seja possível, as dimensões do transdutor emissor e a faixa de frequência utilizada devem ser escolhidos de modo a que tenham a melhor aproximação possível de uma fonte pontual.

3) A área de contato do transdutor receptor com o corpo de prova deve ser a menor possível, para que suas dimensões não influenciem na precisão da medida. É conveniente que este transdutor seja blindado, para evitar influências eletromagnéticas que mascarem o sinal.

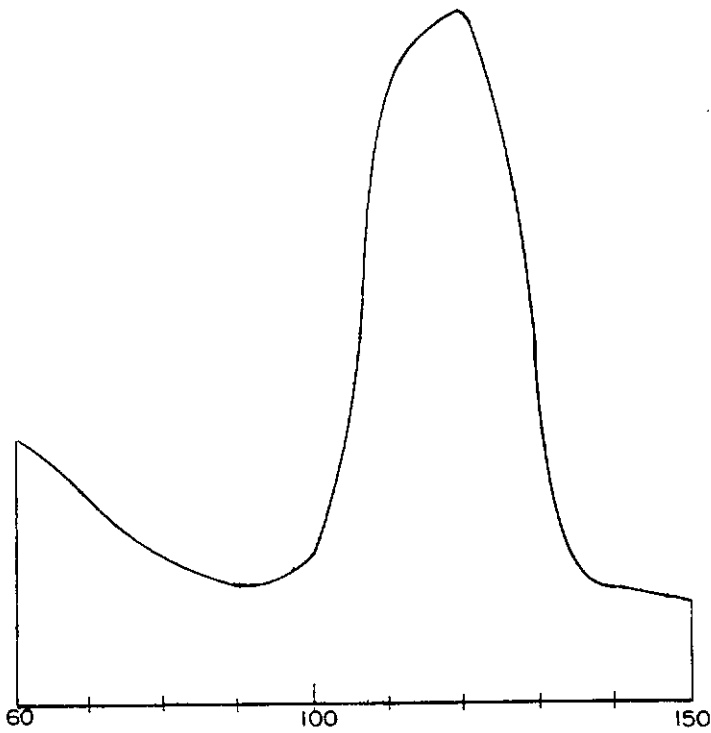


GRÁFICOS DE  $\bar{I}R(j)$  TEÓRICOS

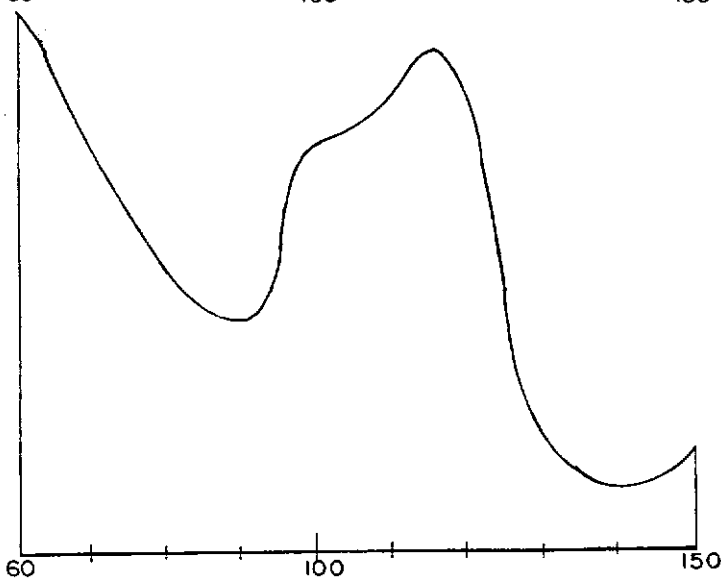
ESCALAS    HORIZ. — 1cm = 10 KHz  
               VERT. — 1cm = 1  $\mu$ V

fig 4-1a

DIST. DA  
FONTE (mm)



38



28

GRÁFICOS DE  $|R(\omega)|$  TEÓRICOS

ESCALAS:      HORIZ. - 1cm = 10 KHz  
                  VERT.    - 1cm = 1  $\mu$ V

fig 4-1b

DIST. DA  
FONTE (mm)

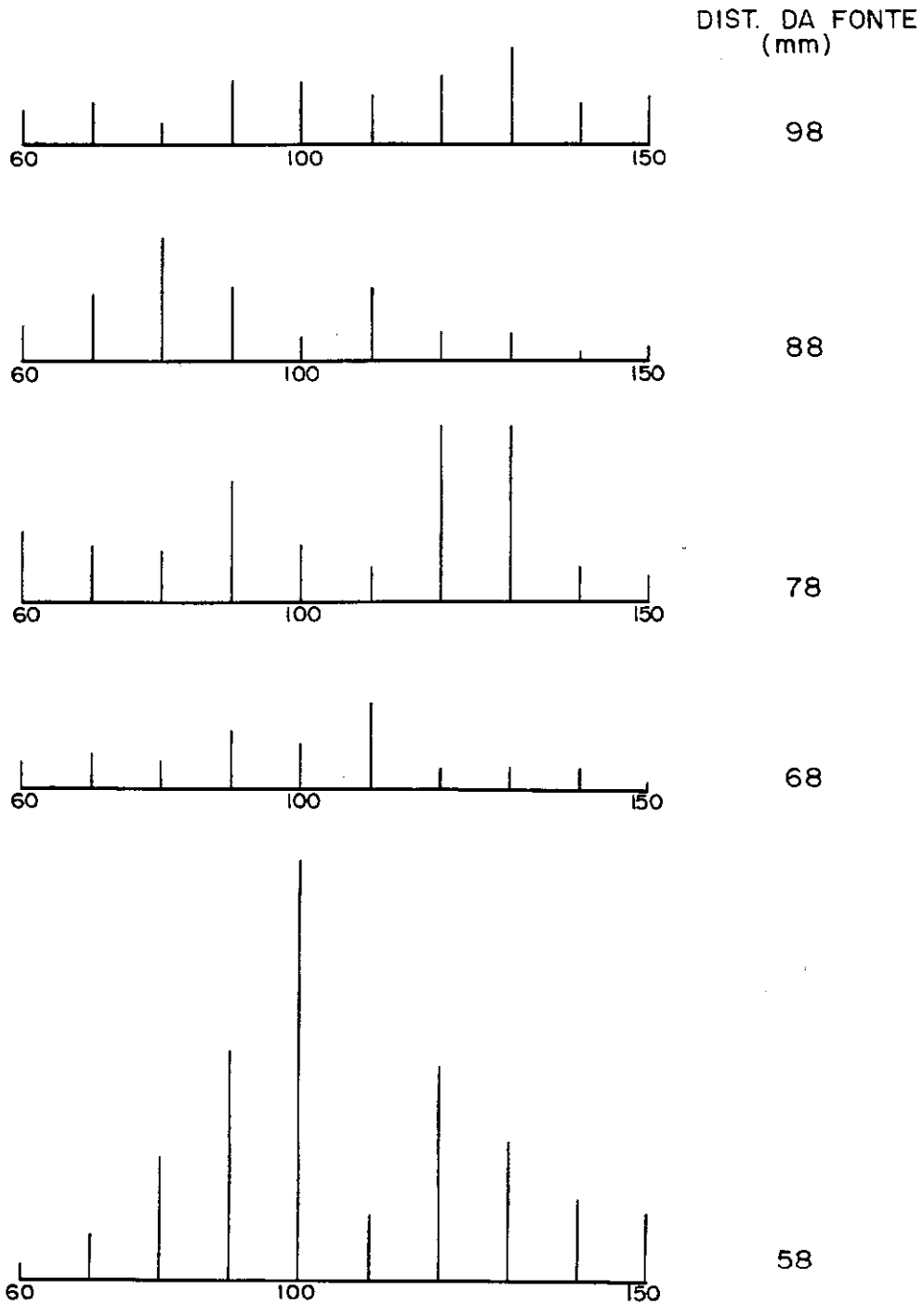


18

GRÁFICOS DE R(W) TEÓRICOS

ESCALAS:    HORIZ. - 1cm = 10 KHz  
              VERT.   - 1cm = 1 μV

fig 4-1c

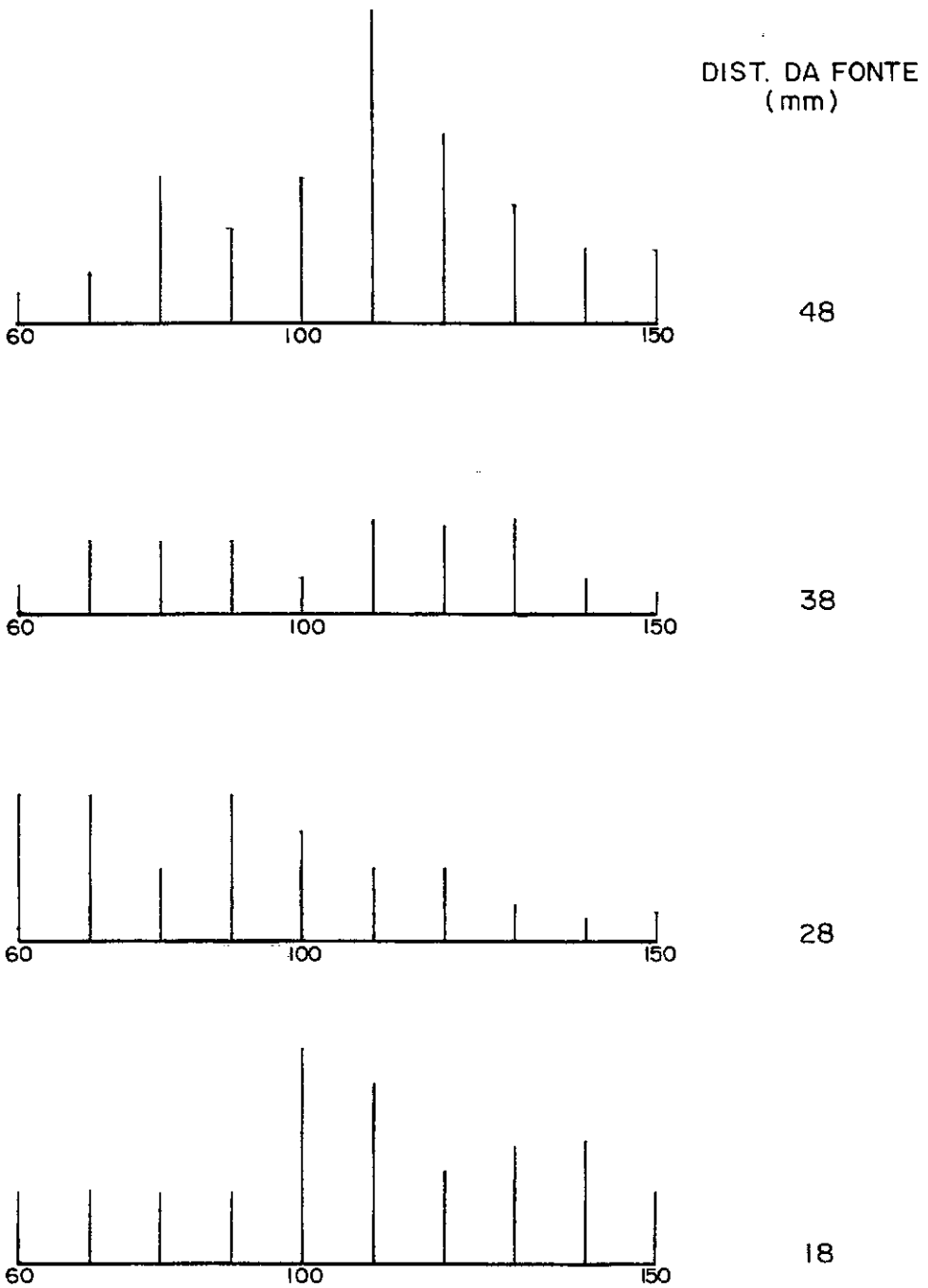


GRÁFICOS DE  $H(\omega)_{ACEL.} / H(\omega)_{PZT}$

ESCALAS: HORIZONTAL - 1cm = 10 KHz  
 VERTICAL - 1cm = 1u. de ampl.

fig4-2a





GRÁFICOS DE  $H(\omega)_{ACEL.} / H(\omega)_{PZT}$

ESCALAS: HORIZONTAL - 1 cm = 10 KHz  
 VERTICAL - 1 cm = 1 u. de ampl.

fig 4-2 b

B I B L I O G R A F I A

- [1] - Hardy Jr., H.R. - "APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUES TO ROCK MECHANICS RESEARCH"; ACOUSTIC EMISSION, ASTM STP 505, 1972, pgs. 41/83.
- [2] - Kaiser, J. - "UNTERSUCHUNGEN UBER DAS AUFRETEN GERAUSHEN BEIN ZUGVERSUCH"; Tese de doutorado, TECNISCHE HOSCHULE, Munique, 1950.
- [3] - Stephens, R.W.B.E Hill, R. - "SONIC EMISSION DURING DEFORMATION OF SOLIDS"; ARCHIVUM AKUSTYKI, 1971.
- [4] - Schofield B.H. - "ACOUSTIC EMISSION UNDER APPLIED STRESS"; REPORT ARL - 150, OFFICE OF TECHNICAL SERVICES, UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE, 1961.
- [5] - Gillis, P.P. - "DISLOCATION MOTIONS AND ACOUSTIC EMISSION"; ACOUSTIC EMISSION, ASTM STP 505, 1972, pgs. 20/29.
- [6] - Mason, W.P., Mc Skimin, H.J., Shockley, W., "ULTRASONIC OBSERVATION OF TWINNING IN TIN", BELL TELEPHONE LABORATORIES, 25 de março, 1948.
- [7] - Pollock, A.A.; "STRESS WAVE EMISSION - A NEW TOOL FOR INDUSTRY", ULTRASONICS, abril, 1968, pgs. 88/92.
- [8] - Sankar, N.G., Frederick, J.R., Feldbeck, D.K.; "ACOUSTIC EMISSION FROM METALS DURING UNLOADING AND ITS RELATION TO THE BAUSCHINGER EFFECT", METALLURGICAL TRANSACTIONS, Vol. 1, outubro, 1970, pgs. 2979/2980.
- [9] - Nakamura, Y., Veach, C.L., Mcaulay, B.O.; "AMPLITUDE DISTRIBUTION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS", ACOUSTIC EMISSION, ASTM STP 505, 1972, pgs. 164/185.
- [10] - Dunegan, H.L., Tatro, C.A., Harris, D.O.; "FRACTURE ANALYSIS BY USE OF ACOUSTIC EMISSION", ENGINEERING FRACTURE

MECHANICS, Vol.1, 1968, pgs 105/122.

[11] - Gerbereich, W.W., Hartbower, G.E.; "SOME OBSERVATIONS ON STRESS WAVE EMISSION AS A MEASURE OF CRACK GROWTH", INTERNATIONAL JOURNAL OF FRACTURE MECHANICS, Vol.3, nº3, setembro, 1967, pgs. 185/192.

[12] - Green, A.T., Lockman, C.S., Steele, R.K. - "ACOUSTIC VERIFICATION OF STRUCTURAL INTEGRITY OF POLARIS CHAMBERS", MODERN PLASTICS, julho, 1964.

[13] - Pany, D.L.; "NONDESTRUCTIVE FLAW DETECTION ON NUCLEAR POWER INSTALLATIONS", TRANSACTIONS OF AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, vol.10, nº1, 1967.

[14] - Jolly, W.D.; "THE APPLICATIONS OF ACOUSTIC EMISSION TO IN-PROCESS INSPECTION OF WELDS", MATERIALS EVALUATION, junho, 1970, pgs. 135/144.

[15] - Wells, D.; "AN ACOUSTIC APPARATUS TO RECORD EMISSION FROM CONCRETE UNDER STRAIN", NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN, dezembro, 1970, pgs. 80/88.

[16] - Cross, N.D., Loushin, L.L., Thompson, J.L.; "ACOUSTIC EMISSION TESTING OF PRESSURE VESSELS FOR PETROLEUM REFINERIES", ACOUSTIC EMISSION, ASTM STP 505, maio, 1972, pgs. 270/295.

[17] - Balderston, H.L.; "THE BROAD RANGE DETECTION OF INCIPIENT FAILURE USING ACOUSTIC EMISSION", ACOUSTIC EMISSION, ASTM STP 505. pgs. 297/317.

[18] - Liptai, R.G., Harris, D.O.; "ACOUSTIC EMISSION - AN INTRODUCTORY REVIEW", MATERIALS RESEARCH AND STANDARDS, março, 1971, pgs. 8/10.

[19] - Harris, D.S., Tetelman, A.S., Darwish, F.A.I.;  
"DETECTION OF FIBER CRACKING BY ACOUSTIC EMISSION", ACOUSTIC EMISSION, ASTM  
STP 505, maio, 1972, pgs. 238/249.

[20] - Tatro, C.A.; "DESIGN CRITERIA FOR ACOUSTIC  
EMISSION INSTRUMENTATION"; ACOUSTIC EMISSION, ASTM STP 505, maio, 1972, pgs.  
84/89.

[21] - Hirth, J.P., Lothe J.; "THEORY OF DISLOCATIONS",  
Mc GRAW HILL, 1968.

[22] - Hueter, T.F., Bolt, R.H.; "SONICS", John Wiley,  
1965.

[23] - Bradfield, G.; "ULTRASONIC TRANSDUCERS - 1.  
INTRODUCTION TO ULTRASONIC TRANSDUCERS - PART B", ULTRASONICS, julho, 1970,  
pgs. 177/189.

[24] - Meirovitch, L.; "ANALYTICAL METHODS IN VIBRATIONS",  
John Wiley, 1970.

[25] - Lyon, R.H., Eicher, E.; "RANDOM VIBRATION OF  
CONNECTED STRUCTURES", JOURNAL OF THE AMERICAN SOCIETY OF ACOUSTICS, Vol. 36,  
nº 7, 1964.

A P Ê N D I C EC Á L C U L O D A S C Á R A C T E R Í S T I C A S D O S T R A N S D U T O R E S

## 1 - TEORIA:

Diz-se que um material, mais especificamente, um cristal, possui propriedades piezoelétricas quando êle produz uma diferença de potencial elétrico entre duas de suas faces ao ser deformado. Inversamente, a aplicação de tensão elétrica nas faces produz deformação.

Se aplicarmos a um cristal a deformação

$$\chi = \zeta / \ell \quad (A-1)$$

sendo  $\ell$  a espessura entre duas placas e  $\zeta$  a variação de  $\ell$  causada pela deformação, quando estas placas forem ligadas em curto-circuito, fluirá entre elas uma corrente igual a

$$i = e_{ik} (\zeta/s) \quad (A-2)$$

A constante  $e_{ik}$  é denominada de "constante piezoelétrica do material e  $s$  é a área das placas, ou faces.

Inversamente, quando se aplica um campo elétrico  $E$  a um cristal rigidamente engastado, será produzida uma tensão mecânica entre as faces igual a

$$T = e_{hj} E \quad (A-3)$$

A constante  $e_{hj}$  é também "constante piezoelétrica" do material. As duas constantes piezoelétricas representam aspectos inversos do mesmo fenômeno, sendo a primeira indicadora da deformação por campo elétrico e a segunda, da geração de potencial elétrico por aplicação de tensão mecânica.

Se considerarmos o caso de um transdutor rigidamente engastado, irradiando para um certo meio ambiente, teremos uma situação de equilíbrio dinâmico, com

$$F_p = F_i + F_e \quad (A-4)$$

$F_p$  é a força gerada por efeito piezoelétrico,  $F_i$  a resistência elástica do material do transdutor e  $F_e$  a resistência do meio para onde ele está irradiando.

Denominando de  $C_{hk}$  o módulo elástico do material, a força de resistência interna é

$$F_i = C_{hk} (S \zeta / \ell) \quad (A-5)$$

Sendo  $\rho_0$  o peso específico do meio,  $C$  a velocidade do som neste meio e  $u$  a velocidade da face do transdutor, a resistência externa é definida por

$$F_e = Z_e u \quad (A-6)$$

$$Z_e = \rho_0 C \quad (A-7)$$

$Z_e$  é a "impedância acústica" do meio.

Da equação (A-3) deduz-se que

$$F_p = C_{hj} S(V/\ell); \quad (A-8)$$

Chamando de  $w$  a frequência de vibração do transdutor, a velocidade da face não-engastada será expressa por

$$u = j w \zeta \quad (A-9)$$

Aplicando (A-5), (A-6), (A-7) e (A-8) em (A-4), teremos:

$$e_{hj} S(V/\ell) = C_{hk} S(\zeta/\ell) + (\rho_0 c) u \quad (A-10)$$

Substituindo  $u$  por sua expressão em (A-9) e tirando a expressão de  $\zeta$ ,

$$\zeta = \frac{e_{hj} V}{[C_{hk}^2 + (w\rho_0 C\ell)^2]} (C_{hk} - j w \rho_0 C \ell) \quad (A-11)$$

Esta aproximação só é válida, segundo a ref. [22], para os casos em que  $\lambda \gg \ell$ , sendo  $\lambda$  o comprimento de onda no material do transdutor,



nesta frequência, e  $\ell$  a espessura do transdutor

No caso em que  $\ell = \lambda/2$ , temos [22]

$$P = F/S = e_{hj}(2V/\ell) \quad (A-12)$$

Para o caso de transdutores receptores, quando estão operando abaixo da frequência de ressonância, a sensibilidade dinâmica é definida como

$$V/F = (1/\alpha) (K_c^2/1 + K_c^2) \quad (A-13)$$

$V$  é a voltagem entre os eletrodos das faces e  $F$  é a força que atua em uma das faces, normalmente a ela.

O coeficiente  $\alpha$  é a "taxa de transformação" e  $K_c$  é denominado "coeficiente de acoplamento", sendo dados pelas equações

$$\alpha = e_{ik}(S/\ell) \quad (A-14)$$

e

$$K_c = e_{ik}/(C_{hk} \cdot e \cdot e_0)^{1/2} \quad (A-15)$$

onde  $e_0$  é a constante dielétrica do material do transdutor.

## 2 - APLICAÇÃO DA TEORIA

a) Transdutor emissor do 1º corpo de prova:

No caso do método fotoelástico, tínhamos a situação de  $\ell = \lambda/2$ , aplicando-se neste caso a eq.(A-12).

A constante piezoelétrica do PZT-4 [23] é  $e_{hj} = 15,1$  Coulombs/m<sup>2</sup> e suas dimensões são: raio da face=espessura=6,25 mm

Substituindo na equação, temos

$$V/P = 21 \times 10^{-5} \text{ Volts/Newtons/m}^2$$

Para um material fotoelástico com sensibilidade de  $20\text{Kg/cm}^2$  para a 1.<sup>a</sup> ordem de franjas, que é uma boa sensibilidade para o "epoxy", teremos, para obter esta pressão, de utilizar uma tensão de 411,6 Volts.

(As informações sobre a sensibilidade fotoelástica do "epoxy" foram obtidas graças à colaboração do Prof. Hener Gomide, do Laboratório de Foto\_mecânica da PUC-RJ)

b) Transdutor emissor das simulações

Neste caso, tivemos  $\lambda \gg \ell$  para toda a faixa de frequência, e usa-se então a eq.(A-8)

$$P/V = \frac{2 e_{hj}}{\ell}$$

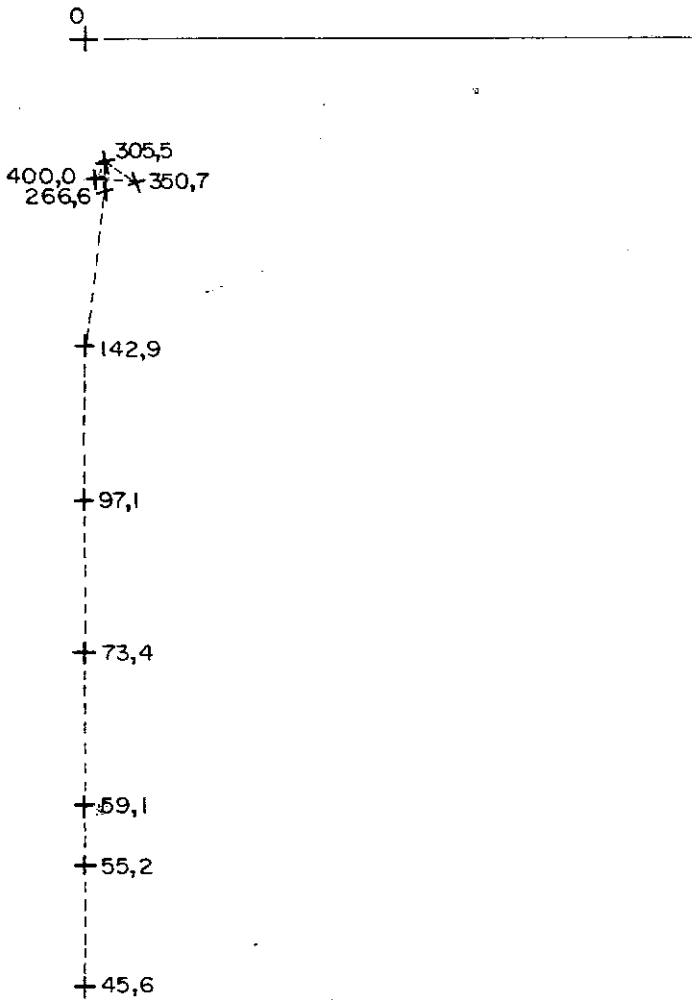
Utilizando-se novamente a ref. [23] para obtenção das constantes, temos

$$P/V = 27,5 \times 10^{-3} \text{ Newtons/m}^2/\text{Volts}$$

c) Receptor PZT das simulações

Mais uma vez, utilizando os dados da ref. [23], desta vez na eq.(A-13), obtemos

$$F/V = 13,7 \text{ Newtons/Volt}$$

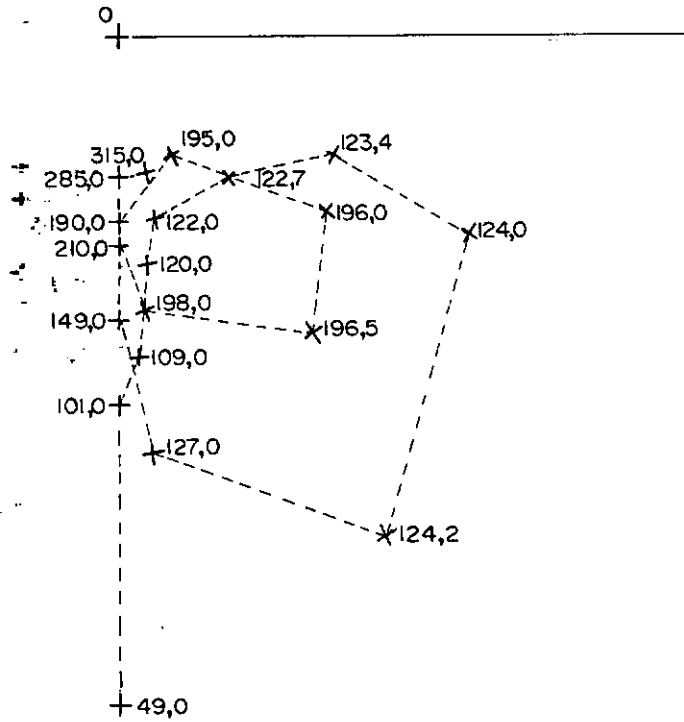


CONDIÇÃO:  
NO CORPO DE PROVA

**GRÁFICO DE IMPEDANCIA**  
TRANSDUTOR EMISSOR DA SIMULAÇÃO

RAIO VETOR -  $1cm = 0,5 K\Omega$   
ESCALAS:  
FREQUENCIA EM KHz.

fig A - 1



47.

CONDIÇÃO:  
DESCARREGADO

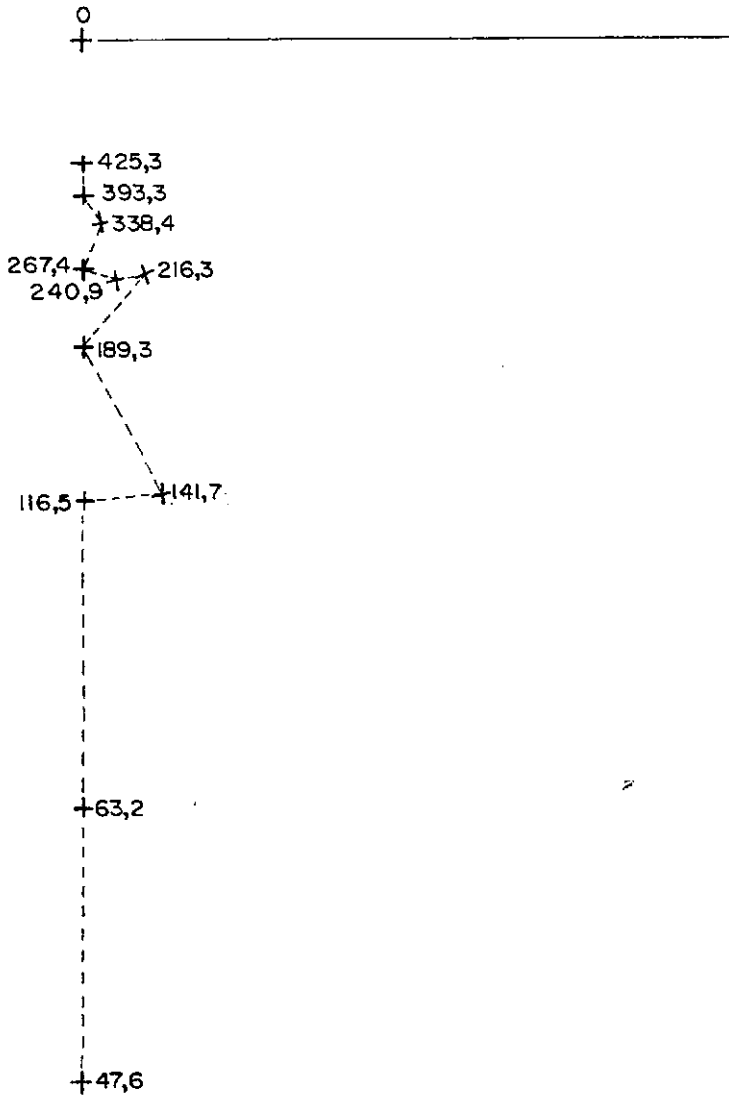
G. GRÁFICO DE IMPEDANCIA  
ACELEROMETRO RECEPTOR

RAIO VETOR - 1cm = 0,3KΩ

ESCALAS:

FREQUENCIAS EM KHz

fig A-2

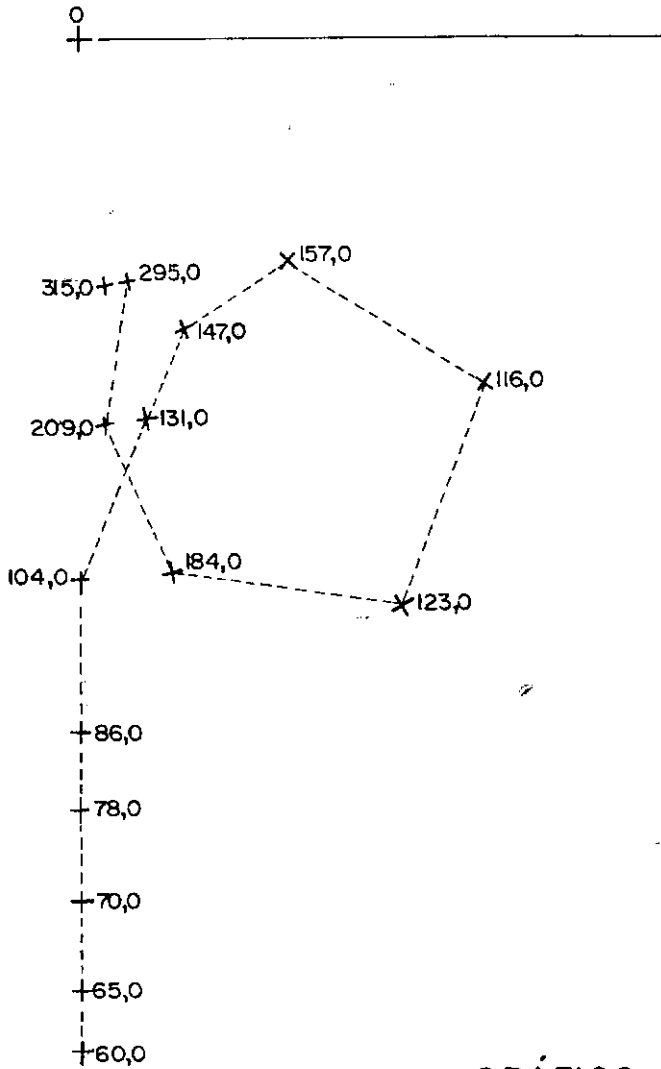


CONDIÇÃO:  
DESCARREGADO

GRÁFICO DE IMPEDANCIA  
TRANSDUTOR RECEPTOR PZT

RAIO VETOR -  $I_{cm} = 0,5 K\Omega$   
ESCALAS:  
FREQUENCIA EM KHz

Fig A-3



CONDIÇÃO:  
NO CORPO DE PROVA

GRÁFICO DE IMPEDANCIA  
TRANSDUTOR EMISSOR DO  
MÉTODO FOTOELÁSTICO

RAIO VETOR -  $1cm = 0,5 K\Omega$   
ESCALAS:  
FREQUENCIA EM KHz

fig A - 4