

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

USO DE MATERIAIS GRANULARES PARA AMORTECIMENTO
DE ESTRUTURAS DE MÁQUINAS INDUSTRIAIS E
COMPARAÇÃO COM OUTROS MATERIAIS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PA
RA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

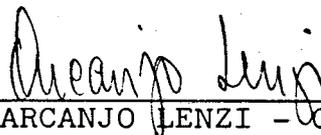
ROBERTO CALDAS BRANDÃO

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO - 1984

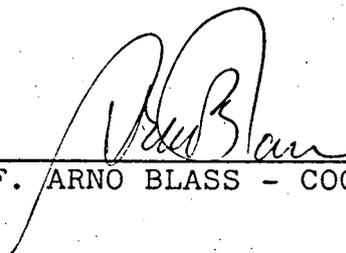
USO DE MATERIAIS GRANULARES PARA AMORTECIMENTO
DE ESTRUTURAS DE MÁQUINAS INDUSTRIAIS E
COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS

ROBERTO CALDAS BRANDÃO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM
SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

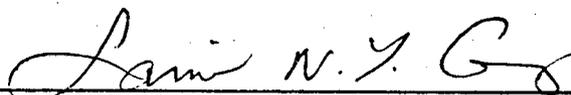


PROF. ARCANJO LENZI - ORIENTADOR

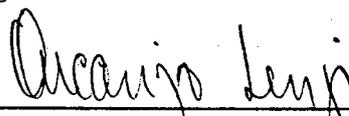


PROF. ARNO BLASS - COORDENADOR

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES



PROF. SAMIR NAGI YOUSRI GESGES, Ph.D.
PRESIDENTE DA BANCA



PROF. ARCANJO LENZI, M.Sc.



PROF. NELSON DIOGENES DO VALLE, Dr-Ing

Aos meus pais Elza e Alcy,
A minha esposa Marisa
Ao meu filho Fabrício

AGRADECIMENTOS

A Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. - ELETROSUL pela liberação para execução deste trabalho;

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Vibrações e Acústica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, pela oportunidade de realização do Curso e deste trabalho;

Ao meu orientador, Prof. Arcanjo Lenzi, pela dedicação, amizade e ensinamentos recebidos, na elaboração desta dissertação;

A UFSC, seus Professores e Funcionários, pelo apoio recebido;

Ao Departamento de Geração Hidráulica-DHG da ELETROSUL pela oportunidade concedida, pelo apoio e incentivo prestados durante o Curso e na elaboração da Dissertação;

Ao Departamento de Recursos Humanos-DRH e em particular a Divisão de Desenvolvimento de Pessoal-DIDP, da ELETROSUL, pela colaboração nos trabalhos de datilografia, desenhos e revisão;

A minha esposa, Marisa, e Filho, Fabrício, pelo carinho, incentivo e compreensão pelas horas de convívio familiar que lhes foram subtraídas;

Aos familiares e amigos, pelo incentivo recebido;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

Simbologia	i
Resumo	viii
Abstract	ix
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 - AMORTECIMENTO DA VIBRAÇÃO EM BARRAS CHEIAS COM MATERIAL GRANULAR	4
2.1 - Introdução	4
2.2 - Revisão de Trabalhos Prévios	5
2.3 - Revisão dos Métodos Convencionais para Medição do Amortecimento	7
2.3.1 - Método da Taxa de Decaimento ...	7
2.3.2 - Método da Banda de Meia Potência	8
2.3.3 - Método da Medição da Potência de Entrada	9
2.4 - Objetivo do Presente Capítulo	10
2.5 - Escolha do Método de Medição do Amortecimento	10
2.6 - Escolha das Estruturas	11
2.7 - Escolha do Material Granular	12
2.8 - Escolha da Suspensão da Barra e do Excitador	13
2.9 - Descrição do Método usado na Medição do Amortecimento	14
2.10- Instrumentação Utilizada	15
2.11- Resultados e Discussão do Experimento ...	15
2.11.1- Quantidade de Areia	16
2.11.2- Efeito do Tamanho do Grão	17
2.11.3- Efeito da Dimensão da Cavidade .	18
2.11.4- Efeito da Forma da Cavidade	19

2.12-	Análise Teórica	20
2.12.1-	Expressão da Impedância para uma Coluna de Material Granular	20
2.12.2-	Expressão da Impedância Incluindo do Amortecimento Interno	22
2.12,3-	Amortecimento para a Expressão da Impedância	23
2.12.4-	Comparação com os Resultados Experimentais	24
2.13-	Conclusões	26
Capítulo 3 -	RESPOSTA DINÂMICA DE UMA COLUNA DE MATERIAL GRANULAR	46
3.1 -	Introdução	46
3.2 -	Descrição do Experimento	46
3.2.1 -	Ensaio com Excitação Harmônica.	48
3.2.2 -	Ensaio com Excitação por Impacto	49
3.3 -	Resultados e Discussão	49
3.3.1 -	Efeito da Massa Adicionada sobre a Coluna	50
3.3.2 -	Altura da Coluna	51
3.3.3 -	Amplitude de Vibração da Base da Coluna	51
3.3.4 -	Efeito do Tamanho do Grão	53
3.3.5 -	Efeito do Teor de Umidade	53
3.3.6 -	Resposta ao Impacto	54
3.3.7 -	Rigidez da Coluna de Material Granular	55
3.4 -	Análise Teórica dos Parâmetros Associa- dos à Dissipação da Energia no Material Granular	56

3.4.1 - Predição do Comportamento Dinâmico do Sistema Assumindo Propagação de Ondas na Coluna de Material Granular	57
3.4.2 - Modelo Representando o Sistema com um Grau de Liberdade	60
3.5 - Conclusões	64
Capítulo 4 - COMPARAÇÃO COM OUTROS MECANISMOS DE AMORTECIMENTO	80
4.1 - Introdução	80
4.2 - Amortecimento por uso de Material Viscoelástico	82
4.2.1 - Escolha de Materiais Apropriados	83
4.2.2 - Medição das Propriedades de Amortecimento dos Materiais	85
4.2.3 - Resultados e Escolha dos Melhores Materiais	88
4.2.4 - Predição do Fator de Perda da Barra Sanduíche	89
4.2.5 - Medição do Fator de Perda da Barra Sanduíche	94
4.3 - Medição do Amortecimento por Bombeamento de ar	97
4.4 - Comparação dos Resultados	99
4.5 - Conclusões	100
Capítulo 5 - CONCLUSÕES	118
Referências Bibliográficas	120
Apêndice A	122

SIMBOLOGIACONSTANTES DE INTEGRAÇÃO

A , B

LETRAS USUAIS A_n , área da secção reta da n-ésima subestrutura A' , $(f_s/f_n)^2 (2 + D'T) (B'/2)$

b , largura da estrutura 2, [m]

 B' , $1/6 (1 + T')^2$ $B_n = A_n \cdot I_n$, rigidez à flexão da n-ésima subestrutura [m]

C , amortecimento da coluna de material granular

 $C_{\text{crítico}}$, amortecimento crítico C_n , coeficiente para o modo n da barra de OBERST engastada em um lado e livre no outro [06]

onde:

$$C_1 = 0,55959$$

$$C_2 = 3,5069$$

$$C_3 = 9,1894$$

$$C_4 = 19,243$$

$$C_n = (\pi/2) (n - 0,5)^2 \text{ para } n > 3$$

 $D' = \rho_1/\rho$, razão de densidade [adimensional]

e = 2,71828

- E , módulo de YOUNG, módulo de elasticidade $[N/m^2]$
- E_n , módulo de elasticidade do material da n-ésima subestrutura $[N/m^2]$
- E_{diss} , energia dissipada
- E_{vib} , energia vibratória da estrutura
- f , frequência [HZ]
- f_n , frequência de ressonância para o modo n da barra de OBERST, frequência de ressonância, [HZ]
- f_s , frequência de ressonância para o modo s da barra composta [HZ]
- F , força aplicada [N]
- F_o , força inicial [N]
- g , aceleração da gravidade $[m/s^2]$
- G_n , módulo de rigidez ou módulo de elasticidade transversal da n-ésima subestrutura $[N/m^2]$
- H , espessura da barra de OBERST [m]
- H_2 , espessura do material de amortecimento [m]
- H_n , espessura da camada da n-ésima subestrutura [m]
- H_{nm} , distância transversal (na direção y) entre as linhas neutras da m-ésima e n-ésima subestruturas [m]

I , momento de inércia

I_n , momento de inércia da n-ésima subestrutura

j , unidade imaginária

$J = G_2 b / k^2 H_2$, parâmetro relacionado à energia de deformação por cisalhamento armazenada na subestrutura 2

$k = 2\pi / \lambda$, número da onda de flexão [m^{-1}]

K , rigidez da coluna de material granular

$K_n = A_n \cdot E_n$, rigidez ao estiramento longitudinal da unidade de comprimento da n-ésima subestrutura [N]

$K_s = K/A$, coeficiente de compressão

l , comprimento da coluna de material granular, largura da barra na direção da excitação [m]

M , massa total [kg]

$M_{ad.}$, massa adicionada à coluna de material granular [kg]

$M_{col.}$, massa da coluna [kg]

$M_{eq.}$, massa equivalente da coluna de material granular [kg]

$M_{tot.}$, massa total da coluna de material granular, inclui massa adicionada mais massa equivalente [kg]

n , índice da subestrutura

- \bar{P}_n , constante que relaciona a deformação de cisalhamento ($\bar{\gamma}_n$) com o ângulo de flexão [adimensional]
- r_n , raio de geração de A_n
- \bar{R}_n , quantidade que relaciona o deslocamento axial com o ângulo de flexão [m]
- s , número de indexação do modo de vibração: 1,2,3,...(s=n)
- S , área da superfície [m²]
- t , tempo [s]
- T_{60} , tempo de reverberação [s]
- T' , H_2/H , razão de espessuras [adimensional]
- U , parâmetro relacionado à energia de deformação longitudinal ou por flexão [adimensional]
- $\langle \bar{V}^2 \rangle$, velocidade quadrática média espacial e temporal
- $V_{r.m.s.}$, valor RMS da velocidade
- V_x , velocidade na direção x, componente tangencial de velocidade
- V_y , velocidade na direção y, componente normal de velocidade
- w , energia de deformação por unidade de comprimento em estiramento longitudinal, flexão ou cisalhamento como indicado pela subscrição [N]

W , energia por unidade de comprimento; em estiramento longitudinal, flexão ou cisalhamento como indicado pela subscrição [N]

$W_{diss.}$, potência dissipada

x , coordenada de medição ao longo da barra [m]

X , parâmetro de cisalhamento, veja equação (4.10) [adimensional]

X_1 , deslocamento da massa adicionada sobre a coluna de material granular [m]

X_0 , deslocamento da base da coluna de material granular [m]

\dot{X} , velocidade [m/s]

\ddot{X} , aceleração [m/s²]

\bar{X} , velocidade média quadrática espacial e temporal [m/s]

X^* , parâmetros de cisalhamento complexo

y , coordenada de medição normal ao comprimento da barra, deflexão na direção y [m]

Y , parâmetro geométrico, veja equação (4.19) [adimensional]

Z , impedância

\bar{Z}_{mg} , impedância média do material granular

LETRAS GREGAS

- $\alpha = \ddot{x}/g$, máxima aceleração vibratória relativa à aceleração da gravidade [adimensional]
- α_n , fator de perda por tração da n-ésima subestrutura [adimensional]
- β_2 , fator de perda por cisalhamento do material de amortecimento [adimensional]
- β_n , fator de perda por cisalhamento da n-ésima subestrutura [adimensional]
- $\bar{\gamma}_n$, ângulo de deformação por cisalhamento da n-ésima subestrutura [adimensional]
- δ , deslocamento axial (na direção x) do centro de gravidade da n-ésima subestrutura [adimensional]
- Δ , parâmetro, veja a equação (4.14d)
- Δf , banda de frequência [HZ]
- $\bar{\epsilon}$, ângulo de deformação média da n-ésima subestrutura [adimensional]
- η , fator de perda da barra composta [adimensional]
- η_{mg} , fator de perda interno do material granular [adimensional]
- η_{total} , fator de perda total [adimensional]
- $\bar{\theta}$, ângulo de flexão da estrutura composta [adimensional]

- λ , comprimento da onda de flexão [m]
- Λ , parâmetro estrutural, veja equação (4.17b)
- ν , razão de POISSON do material da subestrutura 2
[adimensional]
- ξ , deslocamento da partícula
- ρ , densidade do material, densidade da barra de OBERST
[kg/m³]
- ρ_1 , densidade do material viscoelástico [kg/m³]
- ϕ , ângulo de fase
- ω , frequência angular [rad/s]
- $\chi = \chi' (1 - i\beta_2) = \chi^* = (1 - i\beta)$, parâmetro de cisalhamento
complexo,
veja equação (4.17a)

RESUMO

Um dos métodos empregados para aumentar o amortecimento de estruturas pesadas consiste no enchimento de suas cavidades com material granular, como por exemplo, areia.

Experimentos básicos foram conduzidos em vigas ocas de várias formas e dimensões de seção transversal, visando determinar a importância relativa dos parâmetros relacionados ao mecanismo de amortecimento. Os parâmetros analisados foram: dimensão de cavidade, forma da cavidade, amplitude de vibração e tamanho dos grãos. Em todos os casos, observa-se sempre uma região de máximo amortecimento, a qual pode ser ajustada através da escolha adequada da dimensão da cavidade.

Resultados experimentais indicam que a região de máximo amortecimento ocorre quando a dimensão da cavidade corresponde a um quarto do comprimento de onda longitudinal no material granular. Os fatores de perda ótimos chegam a 0,1 - 0,2 na região de frequência em torno de 1000 HZ.

Dois outros métodos de amortecimento, uso de materiais viscoelásticos e bombeamento de ar, foram também testados. Várias amostras de materiais viscoelásticos disponíveis no mercado foram analisadas objetivando selecionar as de maior fator de perda interno e maior módulo de rigidez ao cisalhamento. Duas de melhores características foram testadas na forma sanduíche, onde os fatores de perda da barra chegaram, em média, a 0,03.

O método de amortecimento por bombeamento de ar tem a vantagem de atuar em temperaturas maiores. Para verificar a eficiência de tal método, uma chapa metálica mais fina foi fixada à barra, mantendo-se espaçamentos que variaram de 0 a 1mm. Os fatores de perda obtidos variaram entre 0,01 - 0,02.

A comparação entre estes três métodos revela a vantagem do uso de materiais granulares, principalmente devido à flexibilidade no ajuste da frequência ótima.

ABSTRACT

One of the techniques used for the addition of structural damping of machines consists in the filling of their cavities with granular materials, such as sand.

A series of experiments was carried out on hollow beams of several cross section shapes and dimensions, seeking determination of the relative influence on the damping mechanism of the related parameters. The following parameters were analyzed: cavity dimension and shape, amplitude of vibration and grain size.

All experimental results indicate a region of maximum damping whose optimum frequency can be tuned by a proper selection of the cavity internal dimension. Such maximum damping is attributed to the longitudinal standing waves formation in the cavity, and that occurs when the cavity accommodates one quarter of longitudinal wave in the granular material. Optimum measured loss factors reach values as high as 0.1 - 0.2.

Two other damping mechanisms were also tested, i.e., use of viscoelastic materials and air pumping. Several samples of viscoelastic materials available in the market were tested. Those with higher internal loss factor and shear modulus were applied to the beams in constrained form, which resulted in an average loss factor of about 0.03.

The efficiency of the air pumping mechanism was also investigated. It has the advantage of producing high loss factors at high temperatures. A thin metallic plate was bolted to a beam. Spacers whose thickness varied from 0 to 1mm were used. Best loss factors attained laid between 0.01 - 0.02.

A comparison between the three methods shows the high damping levels attainable by use of granular materials in hollow beams, particularly at the middle frequencies region, which are almost one full order of magnitude higher compared to the other mechanisms.

C A P Í T U L O 1INTRODUÇÃO

A técnica de dissipação da energia vibratória por aplicação de amortecimento estrutural é utilizada, não só com o objetivo de prolongar a vida útil e reduzir o nível de ruído gerado, bem como evitar transmissão de energia vibratória para outros componentes e/ou equipamentos.

Normalmente a energia sonora irradiada de máquinas está concentrada na região de baixas e médias frequências audíveis. Os parâmetros de controle de ruído na fonte são: forças aplicadas, impedância da estrutura, eficiência de irradiação e amortecimento estrutural.

A adição de amortecimento estrutural é o método usualmente empregado para promover a dissipação da energia vibratória em calor. A forma usual de apresentação do amortecimento é através do fator de perda, que é definido por:

$$\eta = \frac{\text{Energia Dissipada por Radiano de Oscilação}}{\text{Energia Vibratória Total do Componente}}$$

O fator de perda é um parâmetro conveniente pois representa uma razão de energias e pode ser empregado tanto em estruturas simples quanto em complexas.

Cada problema de controle de ruído na fonte necessita da melhora de todos os parâmetros acima citados. Alguns entretanto sempre demonstram maior eficiência. A força de excitação é talvez o parâmetro mais importante já que o ruído irradiado é proporcional ao quadrado da mesma.

Nem sempre, porém, é possível reduzir a força de excitação a níveis desejáveis, pois, poderia afetar a eficiência mecânica da máquina ou do processo. Outros parâmetros, portanto, devem ser considerados. Este é o ponto onde o amortecimento se torna um dos parâmetros essenciais ao controle do ruído.

Este trabalho apresenta estudos teóricos e experimentais na determinação dos parâmetros relacionados aos mecanismos de dissipação de energia por materiais granulares.

A primeira parte consiste na descrição de uma série de experimentos com barras cheias de material granular objetivando-se conhecer a influência de parâmetros como amplitude de vibração, tamanho do grão, dimensão da cavidade, forma da cavidade e quantidade de material granular adicionada às barras ensaiadas. Uma análise teórica é também apresentada visando à predição dos resultados obtidos experimentalmente. Esta parte está descrita no Capítulo 2.

Tendo em vista a utilização de areia em fundações de máquinas, estudos experimentais foram conduzidos com o objetivo de investigar a influência da propagação de ondas elásticas através do colchão de areia. Diversos ensaios foram realizados visando a determinar a influência do efeito da massa adicionada sobre a areia, o efeito da camada de areia, a influência da amplitude de vibração sobre a camada de areia, o efeito do tamanho do grão na fundação e o efeito do teor de umidade.

Uma análise teórica dos parâmetros associados à resposta dinâmica do sistema foi também elaborada, e apresentada no Capítulo 3.

O Capítulo 4 descreve uma comparação entre a eficiência do amortecimento obtido com a aplicação de material granular e o amortecimento obtido através de outros mecanismos. Para tal, dois outros métodos de amortecimento foram selecionados: uso de materiais viscoelásticos e por bombeamento de ar.

Para tanto, foram conduzidos ensaios com diversas amostras de materiais viscoelásticos existentes no mercado, para seleção das melhores e aplicação à barra em forma de sanduíche. Ensaios foram também conduzidos referentes ao bombeamento de ar em interfaces, obtido pela adição de uma chapa fina de aço, com espa

çamento calibrado, à estrutura vibrante.

Uma análise teórica foi também apresentada para cada uma das condições estudadas, visando à predição do fator de perda.

C A P Í T U L O 2

AMORTECIMENTO DA VIBRAÇÃO EM BARRAS CHEIAS COM MATERIAL GRANULAR

2.1 Introdução

Muitos trabalhos têm sido apresentados referentes aos mecanismos de amortecimento existentes em estruturas de máquinas. A maioria deles conduzem à conclusão de que os fatores de perda exibem um decréscimo acentuado com a frequência.

Para efeitos de controle de ruído é importante a maximização do amortecimento, particularmente na faixa de médias frequências, onde a potência sonora irradiada de máquinas está principalmente concentrada.

Este capítulo apresenta um estudo da técnica de amortecimento por materiais granulares, capazes de produzir fatores de perda da ordem de 10^{-1} , especialmente na região de médias frequências.

A razão da escolha de material granular, e especificamente areia, para o estudo descrito neste capítulo, foi devido ao seu potencial como material dissipador de energia, já que possui uma elevada capacidade de amortecimento interno. Por exemplo, conforme dados publicados, o fator de perda interno da areia é de cerca de 0,1.

Outro fator importante, e talvez o mais convincente, foi o trabalho relatado por WOLF [12] no qual caixas de aço cheias de areia, fixas a uma grande viga "I" produziram um fator de perda de 10^{-2} a 10^{-1} , dependendo da amplitude de vibração.

Considerando que a areia é de baixo custo e pode ser aplicada em cavidades de componentes de máquinas sem alterar suas dimensões externas, além da sua resistência a altas temperaturas, a mesma pode ser usada como um efetivo material de amortecimento.

2.2 Revisão de Trabalhos Prévios

Apesar de poucos trabalhos terem sido publicados sobre este assunto, os resultados mostram importantes características com relação ao comportamento dinâmico da areia. WOLF [12] executou experimentos para determinar a capacidade de amortecimento da areia, particularmente em baixas frequências. Caixas de aço cheias com areia foram fixas a uma barra "I" (0,15 m de altura, 0,10m de largura e 3,0m de comprimento) e o amortecimento foi medido nas três primeiras frequências de ressonância da barra (40Hz, 110Hz e 220Hz) para vários níveis de aceleração entre 1 e 6g. Os fatores de perda tenderam a aumentar para os modos de ordem maior (0,05 para o primeiro e 0,1 para o segundo e terceiro modo). Barras posicionadas horizontalmente produziram fatores de perda maiores que as posicionadas na vertical.

Em um segundo experimento, WOLF mediu o amortecimento para um grande painel de concreto (1,23m² por 0,10m de espessura), suas cavidades (45 x 150 x 150 mm) foram preenchidas com areia. A relação entre a massa da areia e a massa do concreto foi 1:4. Fatores de perda variaram de 0,015 (em 170 Hz) a 0,78 (em 880 Hz), para medições em níveis de aceleração de 0,1 g. Quando a aceleração foi aumentada para 1 g, fatores de perda para baixas frequências aumentaram para 0,075.

A tendência constante observada nos trabalhos de WOLF é a dependência entre o amortecimento e a amplitude de vibração a qual ocorre especialmente em baixas frequências.

Tal dependências da amplitude foi observada para barras posicionadas tanto na vertical quanto horizontalmente.

Baseado nos resultados de WOLF, KERWIN [13] desenvolveu uma relação empírica entre o fator de perda e a amplitude de vibração, como segue:

$$\eta \approx 0,013 \alpha^{1,5} \quad (2.1)$$

onde $\alpha = \ddot{x}/g$, a máxima aceleração vibratória da barra relativa à aceleração da gravidade (g).

Este resultado é válido para a faixa $2 \leq \alpha \leq 6$, e para os três primeiros modos de vibração da barra na posição horizontal.

Uma dependência similar da amplitude de vibração foi relatada por KUHLE & KAISER [14] nos seus estudos em barras curtas de concreto e tubos de alumínio cheios de areia.

Vários tipos de areia com diferentes tamanhos de grão foram também testados. Os resultados mostram uma variação no nível de amortecimento da ordem de 2 dB.

Uma barra de concreto cheia de material granular e vibrando em modos de flexão apresentou uma região de máximo amortecimento em torno de 1.000 Hz (a dimensão da cavidade era 4cm). Diferentes tamanhos de grãos mostram pequena influência sobre o amortecimento.

KUHLE & KAISER também mostraram que a mistura de areia com outras substâncias granulares macias como serragem, por exemplo, resultaram em uma redução da velocidade de ondas e da frequência associada com o máximo amortecimento para o caso de cavidade de mesmo volume. A quantidade total de máximo amortecimento foi também reduzida.

CREMER & HECKLE [04] referem-se a este trabalho, e atribuem o máximo amortecimento como sendo devido à ressonância no material granular. Para cavidades cuja dimensão interna seja igual a dois terços do comprimento de onda longitudinal, a formação de ondas estacionárias no material granular produzem a maximização do amortecimento.

A dependência do amortecimento na direção das vibrações foram também investigadas por KUHLE & KAISER. Ondas de flexão produzem amortecimento dez vezes maior que vibrações longitudinais. A energia dissipada no material granular é, portanto, predominante

comparada com a energia dissipada nos contatos entre as superfícies da cavidade e os grãos.

O mecanismo preciso de dissipação da energia no material granular é ainda um tanto incerto. KERWIN [13] sumariza os três mais prováveis mecanismos como sendo fricção entre grãos, de formações plásticas localizadas em pontos de contatos agudos entre grãos e a ressonância no material granular.

HALL & RICHART [15] analisaram o decaimento logarítmico de colunas de material granular quando saturado com água, e constataram que o amortecimento é maior quando os grãos são secos. Foi observado também que η é proporcional a $x^{0,38}$ para grãos secos e η é proporcional a $x^{0,15}$ para grãos saturados, sendo x a amplitude de vibração.

Com base nos resultados dos trabalhos discutidos acima, nota-se a incerteza relativa aos mecanismos exatos de amortecimento de materiais granulares, os níveis de amortecimento estrutural capazes de serem produzidos, bem como as outras características dinâmicas, incluindo a velocidade de ondas. Um dos objetivos do presente capítulo é, portanto, investigar os fenômenos físicos envolvidos no amortecimento destes materiais.

2.3 Revisão dos Métodos Convencionais para Medição do Amortecimento

2.3.1 Método da Taxa de Decaimento

O método da taxa de decaimento do nível de vibração após a excitação ter sido interrompida é medida e expressa na forma do tempo de reverberação, que representa o tempo levado pela energia vibratória para decair 60 dB. O fator de perda é determinado pela relação: [04]

$$= \frac{2,2}{f \cdot T_{60}} \quad (2.2)$$

onde (f) é a frequência central da banda e (T_{60}) é o tempo de reverberação.

Este método possui algumas desvantagens. A primeira é relativa ao nível de amortecimento sobre o qual o método é aplicável. Uma estrutura cujo fator de perda é de 0,16, dissipa, quando em vibração livre, toda a sua energia vibratória em um período. A leitura da taxa de decaimento torna-se imprecisa e, consequentemente, a determinação do fator de perda torna-se, também, imprecisa. O método não é recomendado para estruturas onde o fator de perda seja maior que 0,1.

As medições são usualmente feitas em bandas em torno de ressonâncias distintas da estrutura. Componentes de máquinas tem ressonâncias distintas somente nas regiões de baixa e média frequências.

Picos e ressonâncias ocorrem muitas vezes próximas entre si e as amplitudes em uma banda de frequência podem influenciar as medições nas bandas vizinhas. Este método requer, portanto, filtros de boa qualidade. Em alguns casos, filtros de banda estreita são necessários e os resultados devem, sempre que possível, ser conferidos com outros métodos.

2.3.2 Método da Banda de Meia Potência

A determinação do fator de perda pelo método da banda de meia potência consiste em registrar a curva de resposta e o amortecimento obtido através da leitura da banda de frequência (Δf) 3 dB abaixo do pico da frequência de ressonância (f_n) . O fator de perda é calculado através da seguinte relação; [04]:

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_n} \quad (2.3)$$

como a densidade modal de barras vibrando por flexão é constante com a frequência, a curva de resposta para estruturas altamente

amortecidas apresentam superposição de ressonâncias que restringem a aplicação deste método. Em componentes típicos de máquinas seu uso é limitado, principalmente para baixas frequências.

Caso a estrutura seja pouco amortecida, as ressonâncias na curva de resposta são bastante estreitas, tal que os instrumentos devem possuir alta resolução de frequência.

2.3.3 Método da Medição da Potência de Entrada

Este método envolve a medição da potência dissipada (W_{diss}) e a energia da estrutura (E_{vib}). A potência dissipada pode ser considerada como sendo igual a potência de entrada. Para isto, assume-se que a energia transmitida para outras partes da estrutura seja desprezível. O fator de perda é determinado pela expressão:

$$\eta = \frac{W_{diss}}{2\pi f \cdot E_{vib}} \quad (2.4)$$

O método possui grande potencial já que a medição da potência dissipada após ser convertida em energia dissipada por ciclo, traz informações sobre o mecanismo de amortecimento e especialmente sua variação com a amplitude.

Fatores de perda podem ser medidos para diferentes amplitudes de vibração de maneira controlada. Este método é particularmente usado na pesquisa de novos mecanismos de amortecimento. O método também se aplica a estruturas altamente amortecidas.

Possui, entretanto, algumas desvantagens. O método requer tempo para executar todas as medições necessárias, além da necessidade de filtros de dois canais acasalados para minimizar o erro de fase entre os sinais de força e de resposta. A conexão do excitador à estrutura pode produzir ressonâncias de contato na região de 2 KHZ, o que são altamente indesejáveis.

2.4 Objetivo do Presente Capítulo

Este capítulo tem por objetivo estudar o comportamento dinâmico de materiais granulares, especialmente areia, conhecer os efeitos de vários parâmetros sobre a dissipação de energia. Tais parâmetros são: amplitude de vibração, pressão, tamanho dos grãos, dimensão das cavidades, forma geométrica da cavidade e frequência de excitação.

Modelos matemáticos serão também analisados e comparados com os resultados experimentais.

2.5 Escolha do Método de Medição do Amortecimento

O método utilizado para a medição do amortecimento das barras foi o método da medição da potência de entrada. Este método foi escolhido por saber-se previamente que a areia possui um fator de perda interno relativamente alto, e também, por proporcionar altos níveis de amortecimento quando usada como material de amortecimento.

Estruturas com cavidades cheias de areia podem apresentar fatores de perda da ordem de 0,1 ou mais. Como um alto nível de amortecimento causa um rápido decaimento de vibrações livres, a leitura da inclinação pelo método da taxa de decaimento torna-se impreciso.

Um fato observado nos resultados dos experimentos de WOLF foi o consistente menor valor de amortecimento obtido pelo método do decaimento, comparado com o obtido pela medição de potência de entrada. O primeiro método resultou sempre em valores inferiores a 0,1.

Outra desvantagem no uso do método da taxa de decaimento é a dependência do amortecimento sobre a amplitude de vibração que produz um decaimento de inclinação variável. Estes efeitos

foram também observados por KUHL & KAISER [14].

O método da banda de meia potência é aplicável somente para curvas de resposta que apresentem picos bem definidos e separados entre si. Seu uso é, portanto, limitado para as primeiras frequências de ressonância.

A determinação do amortecimento pela medição do decaimento da amplitude das ondas ao longo da barra, tem sido também considerada inadequada, porque isto necessitaria de barras excessivamente longas, especialmente para medições em baixas frequências.

O método da potência de entrada foi considerado o mais adequado devido, principalmente, aos altos níveis de amortecimento que as barras podem ter e pelo fácil controle da amplitude de vibração.

2.6 Escolha das Estruturas

As estruturas escolhidas para os ensaios foram barras comerciais ocas de diversas seções transversais: retangular 50 x 25mm; retangular 76 x 38mm; circular de diâmetro 76mm e quadrada de 50 x 50mm, todas com a espessura de 3mm e comprimento de 1,70 metros.

As seções das barras foram escolhidas objetivando-se conhecer e comparar o amortecimento produzido pelo material granular, quando submetido a excitação nas diferentes direções da seção transversal. Em particular as barras retangulares, permitem uma comparação do amortecimento produzido nas suas duas diferentes direções. A de seção circular e a quadrada permitiram a análise do efeito da forma da cavidade.

O comprimento das barras foi definido de forma a permitir que as primeiras frequências de ressonância ocorram em torno de 100 HZ. Barras curtas aumentariam a sua frequência natural e informações sobre o comportamento da areia nestas regiões de bai

xa frequência não seriam obtidas.

A força de excitação foi aplicada em uma das extremidades da barra que é sempre um anti-nó para qualquer frequência de ressonância, já que a mesma é considerada livre-livre. Na extremidade de aplicação da força, tornou-se necessária a soldagem de uma chapa de 10mm de espessura pelo fato das barras terem paredes finas, o que impedia a aplicação da força diretamente nelas, veja figura (2.1).

2.7 Escolha do Material Granular

A areia foi escolhida por ser um material granular facilmente encontrado, de baixo custo e de grande potencial como dissipador de energia vibratória, e principalmente devido à sua razoável capacidade de amortecimento interno. Quatro tipos com diferentes granulometrias foram selecionados: 0,3 a 0,6mm; 0,6 a 1,2mm; 1,2 a 2,4mm e 2,4 a 4,8mm. A areia, após selecionada, foi lavada e seca em estufa, para retirar impurezas e umidade.

A forma e o tamanho dos grãos podem estar relacionados à eficiência de dissipação de energia. Na figura (2.2), a, b, c e d, estão mostrados os quatro tipos de grãos ensaiados, com a mesma ampliação, o que nos permite comparar a diferença relativa dos grãos, e a concentração por unidade de volume.

A figura (2.3), a, b, c e d permite a comparação das formas geométricas de cada tamanho de grão selecionado. Cada tipo selecionado teve ampliações diferentes na revelação fotográfica, objetivando obter mesmas dimensões (diâmetro) dos grãos após a revelação. Este procedimento permite maior facilidade de observação da forma geométrica dos tamanhos de grãos selecionados.

2.8 Escolha da Suspensão da Barra e do Excitador

A suspensão das barras foi feita com fio fino de aço, de forma a minimizar a fuga de energia pela sustentação, fig. (2.4). O excitador foi inicialmente fixado em uma base de concreto, figuras (2.5) e (2.6) e posteriormente foi fixado em um cavalete, suspenso por um arame flexível, objetivando, também, minimizar a impedância mecânica da sustentação. Veja figura (2.7)

Para estimar a quantidade de energia dissipada pela sustentação, medições de fator de perda foram conduzidas em barras vazias. Os resultados indicaram valores sempre menores que 10^{-3} .

A energia que escapa pelo suporte é, portanto, sempre 10dB inferior em relação a energia dissipada no material granular, já que todos os fatores de perda, medidos com a barra cheia eram superiores a 10^{-2} . Isto permitiu considerar as suspensões adequadas ao experimento.

Foram executados, ainda, alguns testes, objetivando determinar o melhor método de montagem do excitador: se suspenso por fios, figura (2.7), ou se fixo rigidamente em uma base de concreto, figura (2.6).

Testes com excitador suspenso resultaram em fatores de perda mais consistentes. Isto deve-se, provavelmente, à existência de ressonâncias no conjunto de montagem do excitador.

Dois excitadores com capacidade de força aplicada diferentes foram também comparados. O menor deles (B&K-4809) propiciou resultados mais coerentes com os esperados.

A causa para tal diferença é possivelmente o efeito produzido pela massa do núcleo do excitador que é rigidamente conectado à extremidade da barra. Isto certamente modifica o comportamento dinâmico da mesma.

Este trabalho de testes preliminares permitiu concluir que o excitador menor (B&K-4809) suspenso por fios finos, era a montagem mais adequada para os ensaios.

2.9 Descrição do Método Usado na Medição do Amortecimento

O ensaio consistiu na aplicação de uma força harmônica através de um excitador eletrodinâmico em barras cheias de areia. O excitador foi conectado em uma das extremidades livres da barra. A força RMS ($F_{r.m.s.}$) e a Velocidade ($\sqrt{\langle \dot{x}^2 \rangle}$) foram medidos no ponto de excitação por um transdutor de força (B&K-8200), e um acelerômetro (B&K-4366), respectivamente.

A fase, ϕ , entre a força e a velocidade, foi medida com precisão de um grau, por um fasímetro digital (B&K-2971). Um filtro passa banda de dois canais acasalados (B&K-5716) foi usado para eliminar sinais espúrios da força e da resposta. A potência de entrada foi determinada pela expressão:

$$W_{diss.} = F_{r.m.s.} \sqrt{\langle \dot{x}^2 \rangle} \cos \phi \quad (2.5)$$

A velocidade média quadrática, $\langle \dot{x}^2 \rangle$, foi determinada pela média do quadrado das acelerações medidas em pontos uniformemente espaçados ao longo da barra dividido por $(2\pi f)^2$ onde f é a frequência da excitação. O espaçamento entre pontos de medição consistiu na divisão da barra em 3 pontos equidistantes para a medição do primeiro modo de vibração, 6 para o segundo e terceiro, 9 para o quarto e quinto, 12 para o sexto e sétimo e 15 para o oitavo e nono. Esta divisão foi assim executada já que um comprimento de onda requer três pontos equidistantes e distanciados em um terço do comprimento de onda, para que o valor da resposta da barra seja determinada de forma precisa.

$$\langle \dot{x}^2 \rangle = \frac{\sum \dot{x}^2}{n^{\circ} \text{ de Pontos Medidos}} \quad (2.6)$$

A distância entre pontos foi escolhida como sendo um terço do comprimento de onda de flexão da barra.

O fator de perda foi então determinado pela relação

$$\eta = \frac{F_{r.m.s.} \sqrt{\langle \dot{x}^2 \rangle} \cos \phi}{2\pi f \cdot M \cdot \langle \dot{x}^2 \rangle} \quad (2.7)$$

onde M é a massa total (massa da barra e massa de areia).

O erro de fase entre os sinais da força e da velocidade foi também testado preliminarmente, com o objetivo de verificar a precisão das leituras das diferenças de fase dos sinais acima. Tal erro era sempre inferior a 2%.

2.10 Instrumentação Utilizada

A instrumentação utilizada para realização destes ensaios foi composta de um acelerômetro e um transdutor de força instalados na barra. O transdutor de força (B&K-8200) instalado na barra foi conectado ao excitador eletrodinâmico. Um esquema dos equipamentos utilizados está mostrado no diagrama de blocos da figura (2.8).

O sinal harmônico obtido no gerador de sinais (B&K-1027) era amplificado no (B&K-2706), o qual alimentava o excitador. Os sinais da força e da resposta eram pré-amplificados por dois amplificadores de medição (B&K-2619), filtrados (B&K-7516) e monitorados por um osciloscópio (TEKTRONIX-T922). As leituras de $F_{r.m.s.}$ e $V_{r.m.s.}$ eram feitas diretamente nos amplificadores de medição.

2.11 Resultados e Discussão dos Experimentos

As medições foram feitas em frequências discretas, correspondentes às frequências de ressonâncias da barra. Como o amortecimento é dependente da amplitude, principalmente nos primeiros modos de vibração, as medições foram feitas em três diferentes níveis de vibração, nos quatro primeiros modos, e cada ponto da curva representa o valor médio do amortecimento.

O Apêndice A mostra a variação dos fatores de perda obtidos em 3 medições.

2.11.1 Quantidade de Areia

O primeiro parâmetro analisado foi a quantidade de areia no interior da Barra. Para tal selecionou-se a barra de secção quadrada e areia com dimensões de grãos compreendidos entre 0,6 e 1,2mm. A quantidade de areia era variada.

A barra totalmente cheia, 1,70m, apresentou valores de (η) da ordem de 3 a 5 dB maiores que a barra até a metade, e a barra com 1/4 da quantidade, apresentou valores ainda menores.

Observou-se uma grande variação do amortecimento com a frequência para a barra na metade e em 1/4, a qual resultou em fatores de perda que variam bastante com a frequência. Em média, porém, nota-se que a barra com menos areia possui menor amortecimento, veja figura (2.9).

Tal variação fez com que uma análise da influência da localização do material granular em relação aos nós e anti-nós da barra se tornasse necessária. A figura (2.10) mostra um esquema dos três primeiros modos de vibração da barra e os níveis de enchimento com areia.

Pode-se observar através do esquema que a localização do material granular para as diversas quantidades, não ocorre distintamente em regiões de nós ou anti-nós apenas. Todas as quantidades testadas cobrem uma extensão da barra onde existem sempre pelo menos um nó e um anti-nó.

É, portanto, esperado que a distribuição do material granular ao longo da barra, não cause a variação observada do fator de perda.

Considerando, entretanto, que a precisão do método empregado depende da precisão das leituras da força, resposta e principalmente ângulo de fase, o método é mais suscetível a erro quando aplicado a estruturas pouco amortecidas. Esta é provavelmente a razão da variação de η com a frequência.

Para a barra vazia (sem material granular), os fatores de perda foram medidos em várias frequências e comparados com os fatores de perda obtidos em vigas cheias (fig.2.9), os quais são pelo menos uma ordem de grandeza superiores. Isto leva à conclusão que a energia dissipada no material da barra, nos contatos entre barra/transdutor/conexões e a energia que escapa através dos cabos de suspensão da barra é insignificante comparada a que é dissipada no material granular.

Os amortecimentos assim obtidos permitem tirar conclusões futuras sobre o comportamento do material granular.

Medições conduzidas em barras vazias também resultam em grande variação com a frequência.

A seguir serão testadas barras totalmente cheias.

2.11.2 Efeito do Tamanho do Grão

Os resultados obtidos, para a barra quadrada, secção (50 x 50mm) utilizando-se grãos selecionados, 0,3 a 0,6mm; 0,6 a 1,2 mm; 1,2 a 2,4mm e 2,4 a 4,8mm, lavados e secados em estufa, estão apresentados na figura (2.11). Nota-se, através destes resultados, uma diferença de 2 a 3 dB para frequências até 1.500 HZ, o que inclui a região de máximo amortecimento. Nota-se, também, que grãos maiores proporcionam maior amortecimento. Nas baixas frequências a diferença é mínima.

Outros ensaios foram executados visando a determinar a consistência dos resultados obtidos com a barra de secção quadrada. Para tal, medições foram conduzidas nas barras de secções retangular e circular com areia de dois tamanhos de grãos: 0,6 a 1,2mm e 2,4 a 4,8 mm. Os resultados estão mostrados nas figuras (2.12) a (2.17).

Estas figuras comparativas mostram a tendência de grãos maiores produzirem mais amortecimento que os grãos menores.

É possível que o material granular constituído de grãos

maiores permita mais facilmente a propagação de ondas elásticas, o que implica num maior amortecimento na região de máximo. Isto é aceitável já que material granular de grãos menores possui um maior número de grãos por unidade de volume e conseqüentemente as forças envolvidas nos contatos são menores. Desta forma, grãos menores são mais suscetíveis à compactação e ondas elásticas propagando-se nestes materiais são mais rapidamente dissipadas.

Conclusões adicionais sobre este item específico, entre tanto, requerem estudos complementares.

2.11.3 Efeito da Dimensão da Cavidade

O efeito da dimensão da cavidade no amortecimento foi analisado através da comparação dos resultados de ensaios em bar ras de secções retangulares onde as vibrações eram excitadas sepa radamente em ambas as direções da secção transversal.

A figura (2.18) mostra a comparação dos fatores de perda da barra de secção retangular 50 x 25mm, com areia 0,3 a 0,6 mm. Idênticas comparações estão apresentadas nas figuras (2.19) a (2.21).

Pode-se observar, inicialmente, em todas as figuras a o corrência da região de máximo amortecimento, em torno da freqüên cia de 1.000 HZ. Quando a força é aplicada na direção da maior di mensão, a região de máximo amortecimento é deslocada em direção às baixas frequências, ao contrário do que ocorre quando a barra é excitada na direção de sua menor dimensão.

Tal comportamento também foi observado através de en saios com areia de grãos maiores. Observa-se neste caso, um pico mais nítido na região de máximo amortecimento.

Valores publicados para velocidade de ondas longitudi nais em areia variam consideravelmente. Kuhl & Kaiser [14], por exemplo, indicam valores entre 50 e 100 m/s e Cremer & Heckl [04]

150 m/s.

A ocorrência da região de máximo amortecimento, portanto, é creditada à propagação de ondas elásticas no material granular, e esta maximização deve certamente estar relacionada à impedância do material confinado na cavidade, o que varia com a frequência. Nos itens subsequentes, será apresentado um modelo matemático para este problema.

2.11.4 Efeito da Forma da Cavidade

O efeito da forma da cavidade foi analisado através de ensaios em barras cujas seções transversais eram de diferentes formas. Duas formas bastantes diversas são quadrada e circular. A barra de seção circular foi selecionada com um diâmetro tal que a área da seção fosse a mais próxima possível da seção quadrada. Isto implicava um diâmetro de 56mm, para permitir a comparação dos resultados aos de uma barra de seção quadrada de 50mm de lado.

Devido à dificuldades de aquisição destes materiais no mercado nacional, o diâmetro mais próximo encontrado foi de 76mm.

Esta seção transversal após transformada em uma seção quadrada equivalente, possui um lado de 67mm. Espera-se, com isto, que a barra de seção circular apresente a região de máximo amortecimento em uma frequência menor que a de seção quadrada, por um fator de 1,3 aproximadamente.

A figura (2.22) mostra a comparação de resultados obtidos com areia de tamanhos de grãos compreendidos entre 2,4mm a 4,8mm. Nota-se através da figura a boa concordância dos resultados, embora o desvio das frequências de máximo amortecimento não seja tão distinto quanto esperado.

Pode-se, entretanto, concluir deste experimento que o amortecimento não é muito sensível à forma geométrica da cavidade. O fator importante é a sua dimensão equivalente interna.

2.12 Análise Teórica

2.12.1 Expressão da Impedância para uma Coluna de Material Granular

Assumindo que o comprimento da onda de flexão é muito maior que a dimensão da cavidade, cheia com material granular, uma expressão para a impedância deste material pode ser determinada pela análise de uma secção da barra, com comprimento bastante inferior ao comprimento de onda de flexão na barra. Desta forma as forças de reação, que são exercidas sobre as paredes da barra, são consideradas constantes, veja a figura (2.23).

Assume-se também que o material dentro da cavidade está em contato permanente com as paredes durante o período de vibração, como a barra se deforma em modos de flexão, as forças que agem em ambos os lados da coluna são idênticas em direção e magnitude. Portanto, a expressão da impedância pode ser desenvolvida a partir da equação da onda longitudinal,

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

cuja solução é da forma:

$$\xi(y,t) = A e^{j(\omega t - \bar{k}y)} + B e^{j(\omega t + \bar{k}y)} \quad (2.9)$$

onde ξ é o deslocamento da partícula, A e B são constantes e \bar{k} é o número da onda longitudinal na forma complexa, já que considera o amortecimento interno do material granular.

Pelas condições de contorno, sabemos que:

$$\text{Força} = F_0 e^{j\omega t} = -ES \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad (2.10)$$

derivando a equação (2.9), e substituindo em (2.10), para $y = 0$, temos:

$$F_0 = jkES [A - B] \quad (2.11)$$

e para $y = \ell$, veja figura (2.24), temos:

$$F(\ell, t) = -j\bar{k}ES [A e^{-j\bar{k}\ell} - B e^{j\bar{k}\ell}] e^{j\omega t} = 0 \quad (2.12)$$

onde,

$$A e^{-j\bar{k}\ell} = B e^{j\bar{k}\ell} \quad (2.13)$$

com as equações (2.11) e (2.12), obtém-se A e B.

$$A = \frac{F_0}{j\bar{k}ES} \left[\frac{e^{j\bar{k}\ell}}{e^{j\bar{k}\ell} - e^{-j\bar{k}\ell}} \right] \quad (2.14)$$

$$B = \frac{F_0}{j\bar{k}ES} \left[\frac{e^{-j\bar{k}\ell}}{e^{j\bar{k}\ell} - e^{-j\bar{k}\ell}} \right] \quad (2.15)$$

substituindo as expressões de A e B em (2.9) temos,

$$\xi(y, t) = \frac{F_0}{j\bar{k}ES} \left[\left(\frac{e^{j\bar{k}\ell}}{e^{j\bar{k}\ell} - e^{-j\bar{k}\ell}} \right) e^{-j\bar{k}y} + \left(\frac{e^{-j\bar{k}\ell}}{e^{j\bar{k}\ell} - e^{-j\bar{k}\ell}} \right) e^{j\bar{k}y} \right] e^{j\omega t} \quad (2.16)$$

Em $y = 0$

$$\xi(o, t) = \frac{F_o}{jkES} \left| \frac{e^{jk\ell} + e^{-jk\ell}}{e^{jk\ell} - e^{-jk\ell}} \right| e^{j\omega t} \quad (2.17)$$

a qual pode ser escrita na forma,

$$\xi(o, t) = \frac{-F_o}{kES} \left| \frac{\cos \bar{k} \ell}{\operatorname{sen} \bar{k} \ell} \right| e^{j\omega t} \quad (2.18)$$

a impedância é definida como:

$$\bar{Z} = \frac{\text{força}}{\text{velocidade}} = \frac{F_o e^{j\omega t}}{\frac{\partial \xi(\ell, t)}{\partial t}} \quad (2.19)$$

e, portanto,

$$\bar{Z}_{y=0} = \frac{-\bar{k}ES}{j\omega} \operatorname{tang} \bar{k} \ell \quad (2.20)$$

como a força está sendo considerada nula em $y = \ell$, a impedância também é nula neste valor de y ($Z_{(y=\ell)} = 0$).

2.12.2 Expressão da Impedância Incluindo Amortecimento Interno

Se o amortecimento interno do material granular (η_{mg}) for considerado, o número de onda complexo (\bar{k}), para ondas longitudinais, pode ser expresso na seguinte forma; [04]

$$\bar{k} \approx k (1 - j \eta_{mg} / 2) \quad (2.21)$$

esta aproximação diverge do valor exato em somente cerca de 4%, quando $\eta_{mg} = 0,5$

Substituindo a equação (2.21) na expressão da impedância, equação (2.20), temos:

$$\bar{z}_{(y=0)} = -k \left(1 - j \frac{\eta_{mg}}{2} \right) \frac{ES}{j\omega} \operatorname{tang} k \left(1 - j \frac{\eta_{mg}}{2} \right) \ell \quad (2.22)$$

como o amortecimento interno do material granular é sempre menor que 1,0, a equação acima pode ser simplificada para a seguinte forma:

$$\bar{z}_{y=0} = \frac{-kES}{(j\omega)} \operatorname{tang} k \left(1 - j \frac{\eta_{mg}}{2} \right) \ell \quad (2.23)$$

expandindo a função trigonométrica, temos:

$$\bar{z}_{y=0} = \frac{kES}{\omega} \left[\frac{\operatorname{senh} k\ell \eta_{mg} + j \operatorname{sen} 2k\ell}{\cos 2k\ell + \operatorname{cosh} k\ell \eta_{mg}} \right] \quad (2.24)$$

2.12.3 Expressão do Amortecimento da Barra

Será considerado neste desenvolvimento que a estrutura (barra) tenha forças de inércia superiores as de reação do material granular, de forma que não tenha suas características dinâmicas grandemente influenciadas pela presença do material granular.

A predição, portanto, do amortecimento será desenvolvida através da definição do fator de perda. Para tal, a expressão da energia dissipada por ciclo de oscilação será obtida da impedância do material granular confinado na cavidade.

Assumindo que toda a energia transferida para o material granular seja dissipada no próprio material granular, então pode-se escrever:

$$E_{\text{diss./ciclo}} = \left\langle \sqrt{V}_{\text{barra}}^2 \right\rangle \frac{\operatorname{Re}}{\omega} \left[\bar{z}_{mg} \right], \text{ por unidade de comprimento da barra.} \quad (2.25)$$

E a energia vibratória da barra é dada por:

$$E_{\text{vib}} = (\rho S)_{\text{barra}} \langle \bar{v}_{\text{barra}}^2 \rangle \quad (2.26)$$

e o fator de perda é expresso por:

$$\eta = \frac{\text{Re} [\bar{Z}_{\text{mg}}]}{\omega (\rho S)_{\text{barra}}} \quad (2.27)$$

substituindo na equação (2.27) a equação (2.24), temos:

$$\eta = \frac{kES}{\omega^2 M} \left[\frac{\text{senh}(k\ell\eta_{\text{mg}})}{\cos(2k\ell) + \cosh(k\ell\eta_{\text{mg}})} \right] \quad (2.28)$$

sendo $M = (\rho S)_{\text{barra}}$, a massa total da viga por unidade de comprimento.

2.12.4 Comparação com Resultados Experimentais

A equação (2.28) é comparada aos resultados experimentais, conforme mostrado nas figuras (2.25) a (2.28). Nestas figuras, a equação (2.28) está plotada para quatro valores de amortecimento interno do material granular, isto é, $\eta_{\text{mg}} = 0,05$; $\eta_{\text{mg}} = 0,1$; $\eta_{\text{mg}} = 0,2$ e $\eta_{\text{mg}} = 1,0$, e aplicada a várias barras.

Nota-se, através das curvas comparativas que nas baixas frequências, os resultados experimentais concordam com a predição teórica assumindo o fator de perda interno de 0,1 - 0,4. Isto é atribuído à pequena dimensão da cavidade, comparada ao comprimento de onda do material granular. Nesta região de frequência, os grãos de areia movem-se todos com pequena diferença de fase, em relação ao deslocamento da barra.

Nas médias e altas frequências, resultados teóricos concordam melhor com os experimentais quando assumido que a areia

possue um fator de perda interno da ordem de 1,0.

O comportamento apresentado pela areia nas médias e altas frequências pode ser explicado em termos de dificuldade que materiais granulares possuem em formar ondas estacionárias. Tais materiais admitem tensões de compressão, não resistindo, entretanto, às tensões de tração devidas à característica de grãos soltos que possuem. Isto faz com que ondas harmônicas elásticas que se transmitem através deles, percam a característica harmônica.

A parte comprimida continua com a forma de meia senoide, enquanto que as tensões de tração não se comportam de forma idêntica. Por este motivo, ondas estacionárias no material tem dificuldade de formação e o fator de perda resultante da barra não apresenta um pico bem definido, conforme predito pela teoria com fator de perda interno da areia da ordem de 0,1 - 0,2.

Outro fator seria a variação da velocidade das ondas longitudinais com a pressão a qual o material granular está submetido na cavidade, devido ao peso próprio. No topo da barra, a pressão é nula e atinge um valor máximo na extremidade inferior. Isto faz com que a velocidade de ondas varie de um ponto para outro ao longo da barra, enquanto que a equação (2.28) assume velocidade constante.

Além disso, a influência da amplitude de vibração sobre a velocidade pode ser significativa, já que, nas baixas frequências, o deslocamento da superfície da barra é da ordem de 10.000 vezes superior ao deslocamento observado nas altas frequências.

A equação (2.28) também mostra que o fator de perda depende da densidade do material granular, indicando que o amortecimento por este mecanismo está associado a forças de reação provenientes do material granular.

A densidade dos quatro tamanhos de grão de areia ensaiados foram:

Grãos	0,3 a 0,6 mm	1.491,789 kg/m ³
Grãos	0,6 a 1,2 mm	1.483,473 kg/m ³
Grãos	1,2 a 2,4 mm	1.475,158 kg/m ³
Grãos	2,4 a 4,8 mm	1.466,842 kg/m ³

Com estes resultados observa-se uma maior densidade para os grãos menores, contribuindo portanto com o fato observado experimentalmente de que grãos menores produzem menor amortecimento. Pois a massa da barra cheia de material granular é inversamente proporcional ao fator de perda.

2.13 Conclusões

Os experimentos realizados neste capítulo indicam os altos níveis de amortecimento capazes de serem obtidos com o preenchimento de cavidades com materiais granulares tipo areia. Observa-se em todos os resultados, uma região de máximo amortecimento que surge em uma frequência na qual a dimensão da cavidade é igual a um quarto do comprimento da onda longitudinal na areia. A formação de ondas estacionárias no material granular é o fator responsável pela maximização do amortecimento.

Um modelo matemático simulando tal comportamento da areia, mostra a sua eficiência principalmente na predição da frequência de máximo amortecimento. Nas baixas frequências, é possível observar a boa concordância entre resultados teóricos e experimentais. Nas médias e altas frequências, resultados experimentais indicam que a areia comporta-se como se tivesse um fator de perda interno efetivo, da ordem de 1,00, o que pode ser explicado pela ineficiência que materiais granulares possuem de formar ondas estacionárias.

A natureza solta dos grãos permite que sejam comprimidos transmitindo assim, tensões de compressão. No entanto, não resis-

tem à tração. Além disso, a enorme variação de parâmetros, como amplitude de vibração com a frequência, e pressão à qual o material granular está submetido na cavidade, fazem com que a velocidade de ondas e o amortecimento interno variem bastante.

Uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com os apresentados na referência [09] indica que o comportamento dinâmico de materiais granulares, e mais especificamente a areia, é idêntico nos dois trabalhos. Observa-se, entretanto, algumas variações, principalmente nos níveis de amortecimento na região de máximo onde Lenzi [09] obteve valores da ordem de 2 a 3 vezes maiores, bem como picos mais bem definidos.

As curvas de amortecimento apresentadas por Lenzi, quando é analisada a quantidade de material granular adicionada à viga possuem também variações mais suaves com a frequência. A tendência geral das curvas, no entanto, é idêntica quando comparada à deste trabalho. As pequenas diferenças observadas são atribuídas às variações nos sistemas de medição, formas de suspensão do excitador e comprimento de barras ensaiadas.

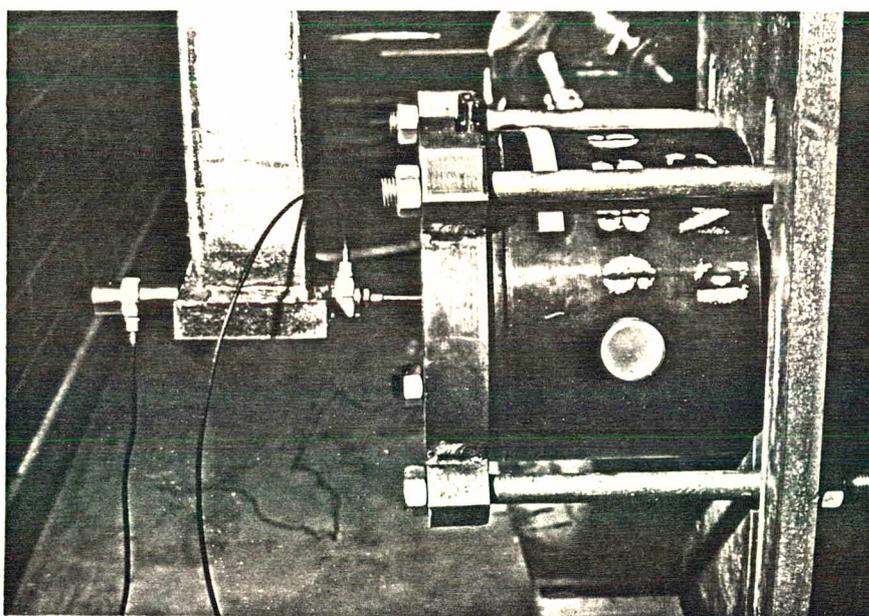
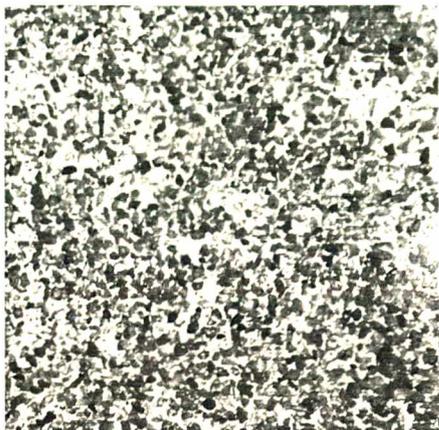
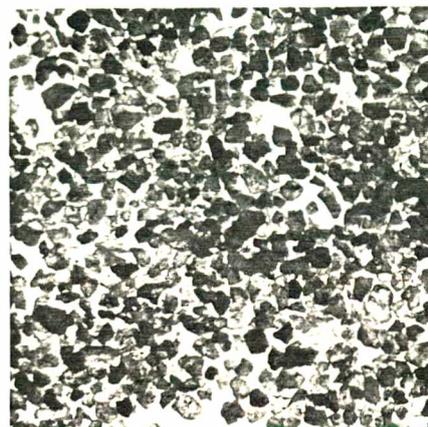


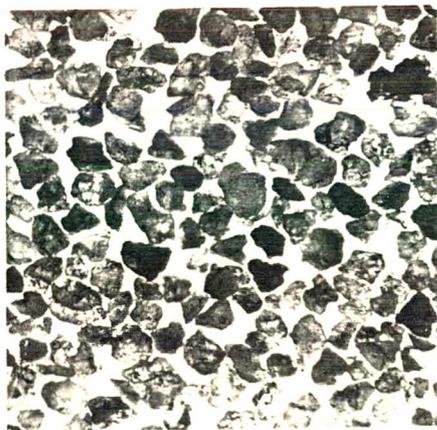
FIGURA (2.1) - Detalhe da chapa soldada na extremidade da barra para fixação do transdutor de força e do excitador



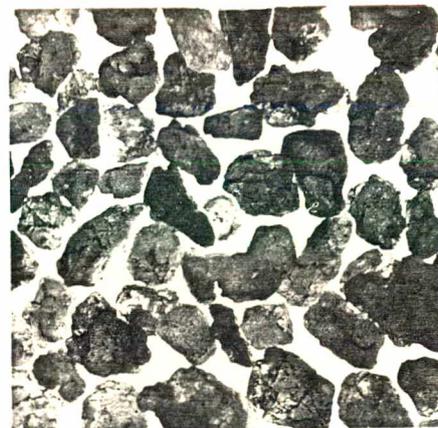
a) Areia - grão 0,3 a 0,6mm



b) Areia - grão 0,6 a 1,2mm



c) Areia - grão 1,2 a 2,4mm



d) Areia - grão 2,4 a 4,8mm

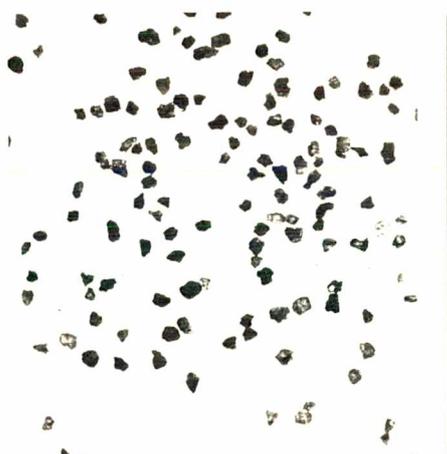
Figura (2.2) - Quatro tamanhos de grãos ensaiados,
fotografados na mesma escala



a) Areia - grão 0,3 a 0,6mm
ampliado oito vezes



b) Areia - grão 0,6 a 1,2mm
ampliado quatro vezes



c) Areia - grão 1,2 a 2,4mm
ampliado duas vezes



d) Areia - grão 2,4 a 4,8mm
sem ampliação

FIGURA (2.3) - Quatro tamanhos de grãos ensaiados,
ampliados em diferentes escalas

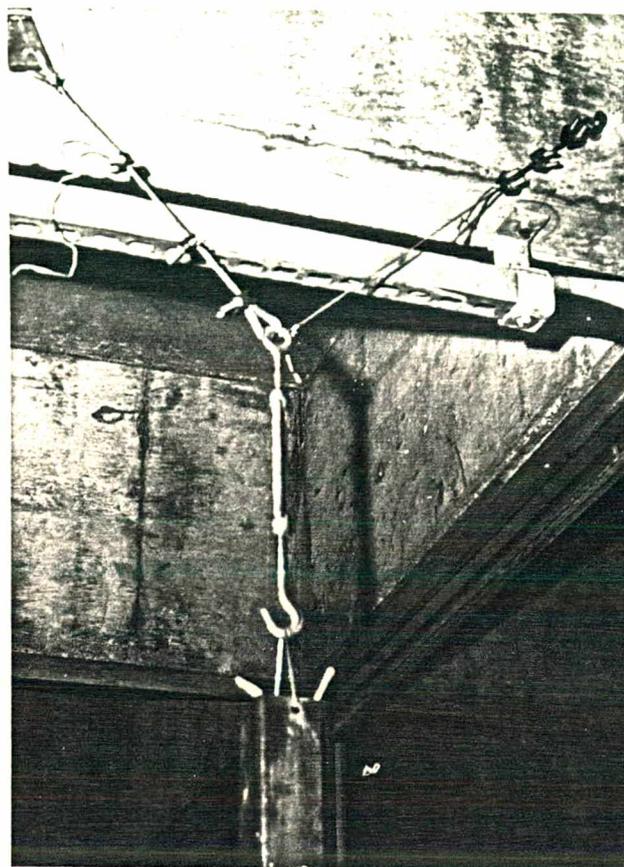


FIGURA (2.4) - Detalhe do sistema de suspensão da barra cheia de material granular

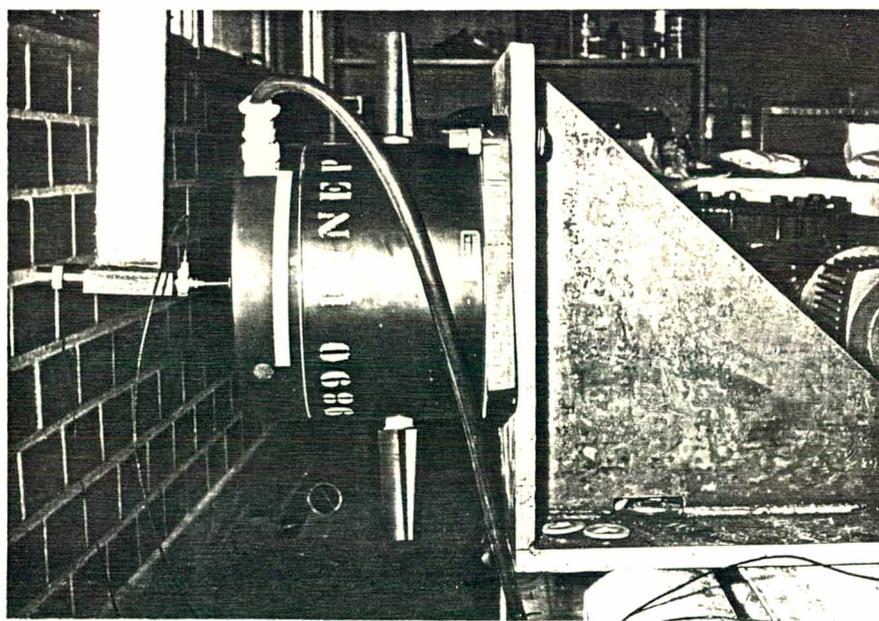


FIGURA (2.5) - Detalhe da fixação do excitador B&K-4808 na base de concreto

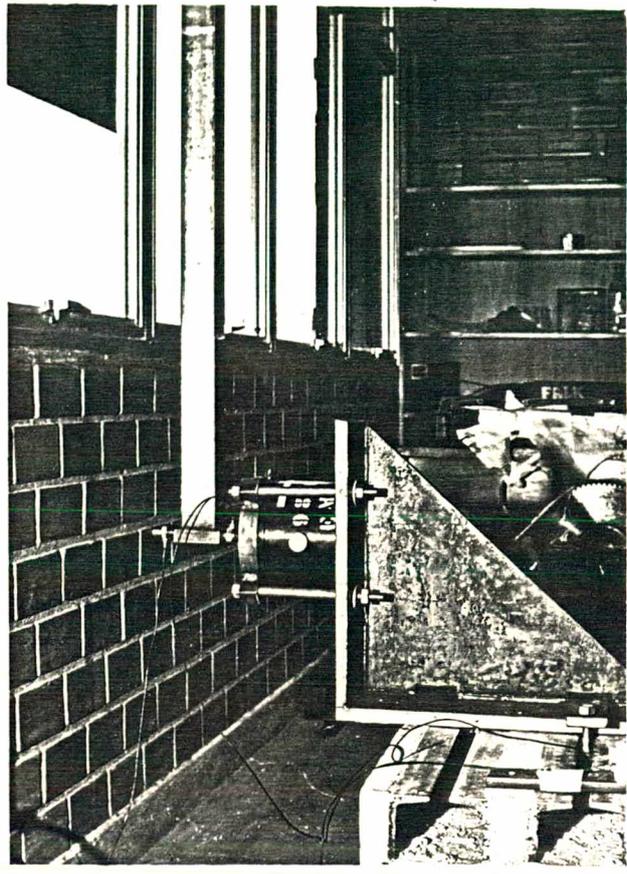


FIGURA (2.6) - Detalhe da fixação do excitador B&K-4809 na base de concreto

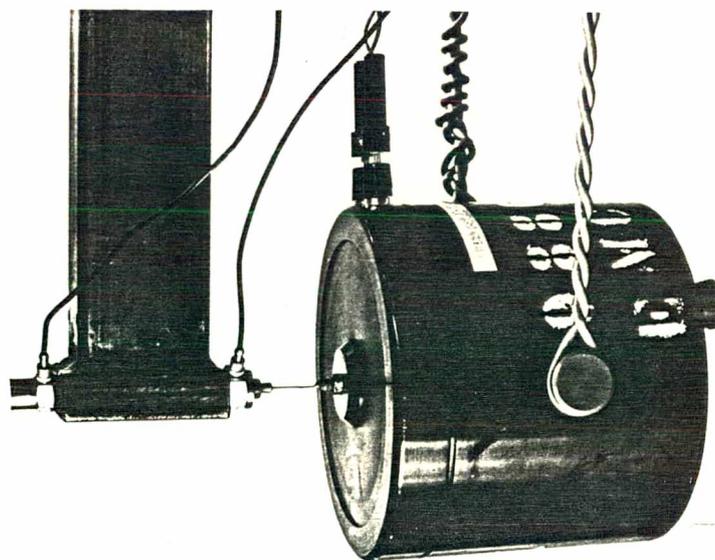


FIGURA (2.7) - Detalhe da suspensão do excitador B&K-4809

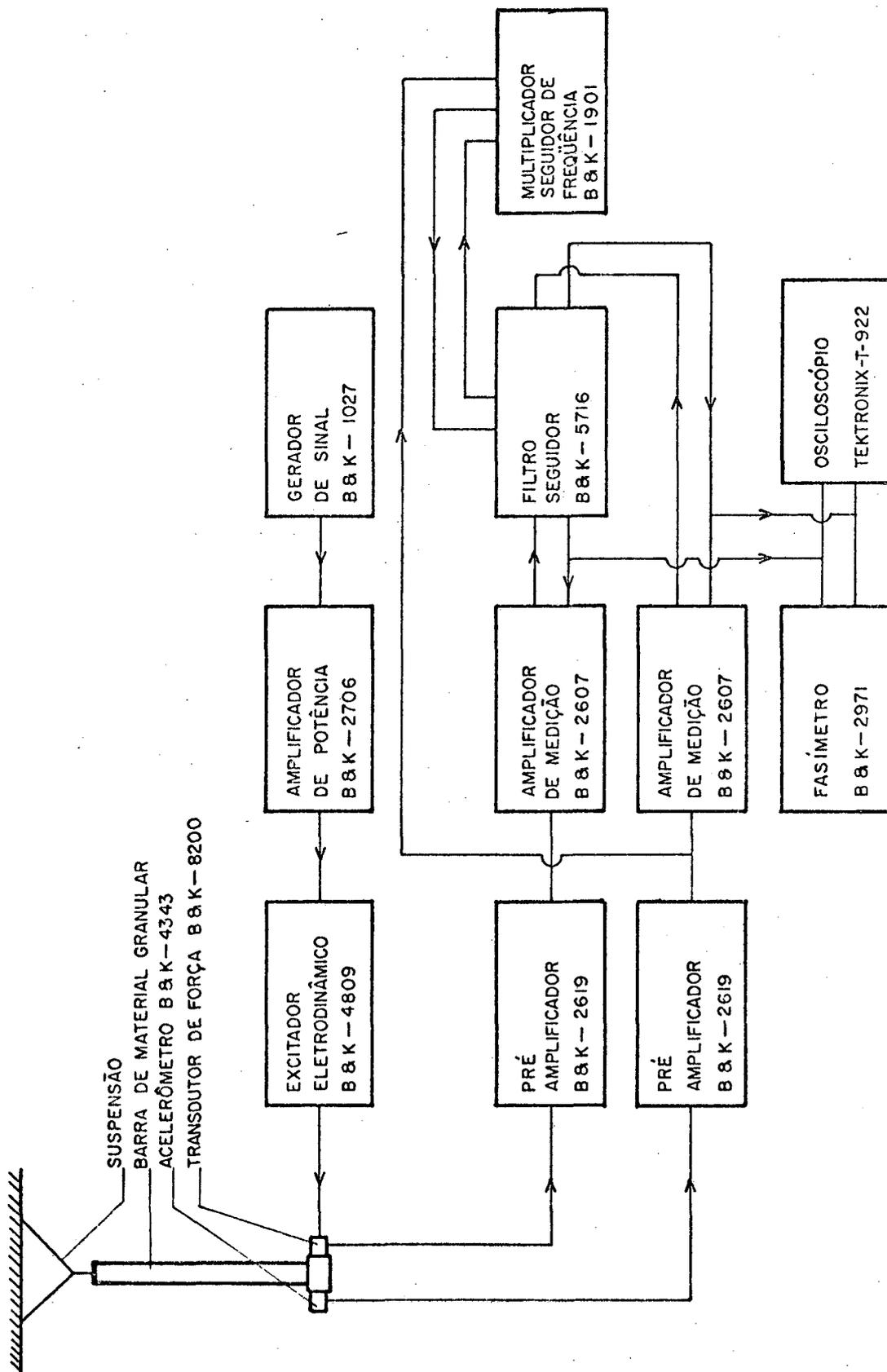


FIGURA (2.8) - Diagrama de blocos dos instrumentos utilizados na medição do amortecimento da vibração em barras cheias com material granular

10 log η η

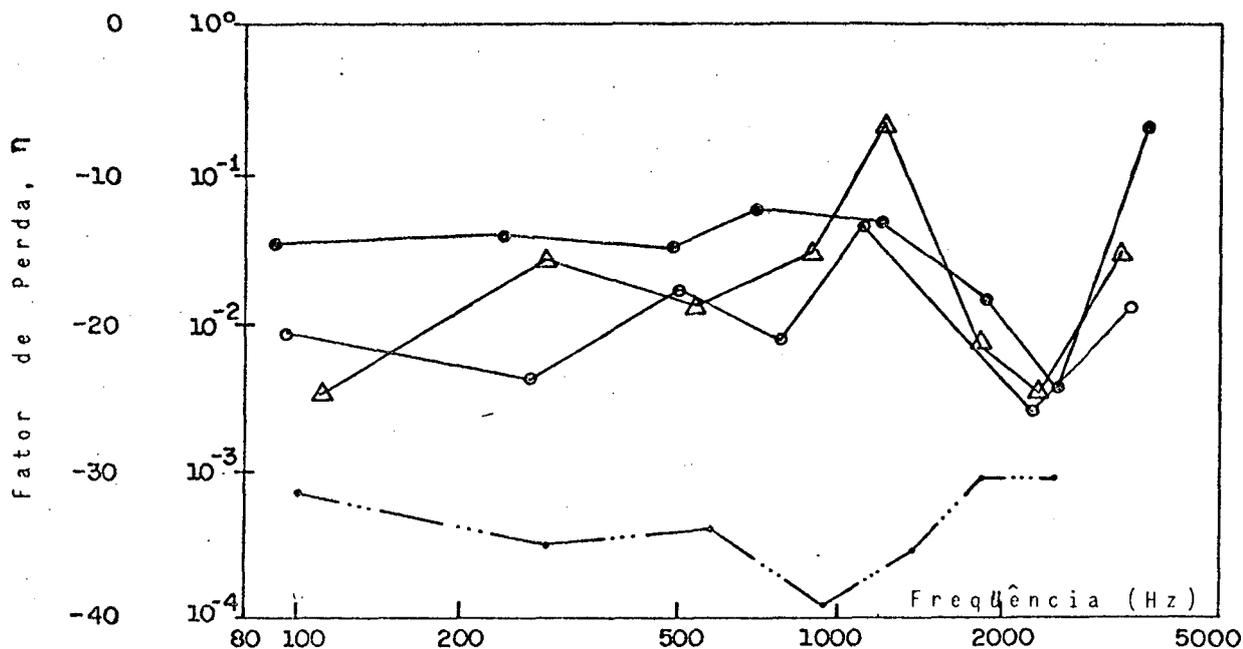


FIGURA (2.9) - Comparação do fator de perda da barra de seção quadrada 50x50mm, comprimento 1,70m, grãos areia 0,6 a 1,2 nas seguintes condições:

Totalmente Cheia ●—● 1/4 Cheia ○—○
 1/2 Cheia △—△ Vazia ---

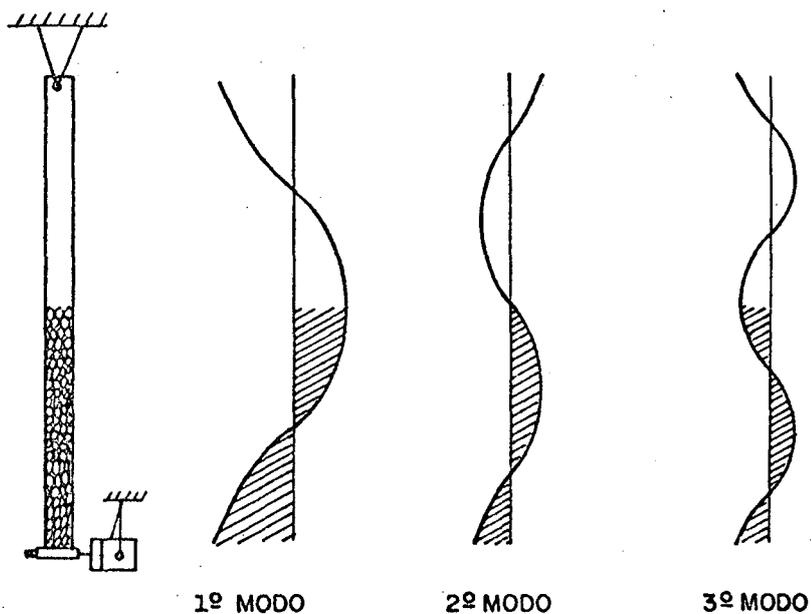


FIGURA (2.10) - Representação dos três primeiros modos de vibração da barra.

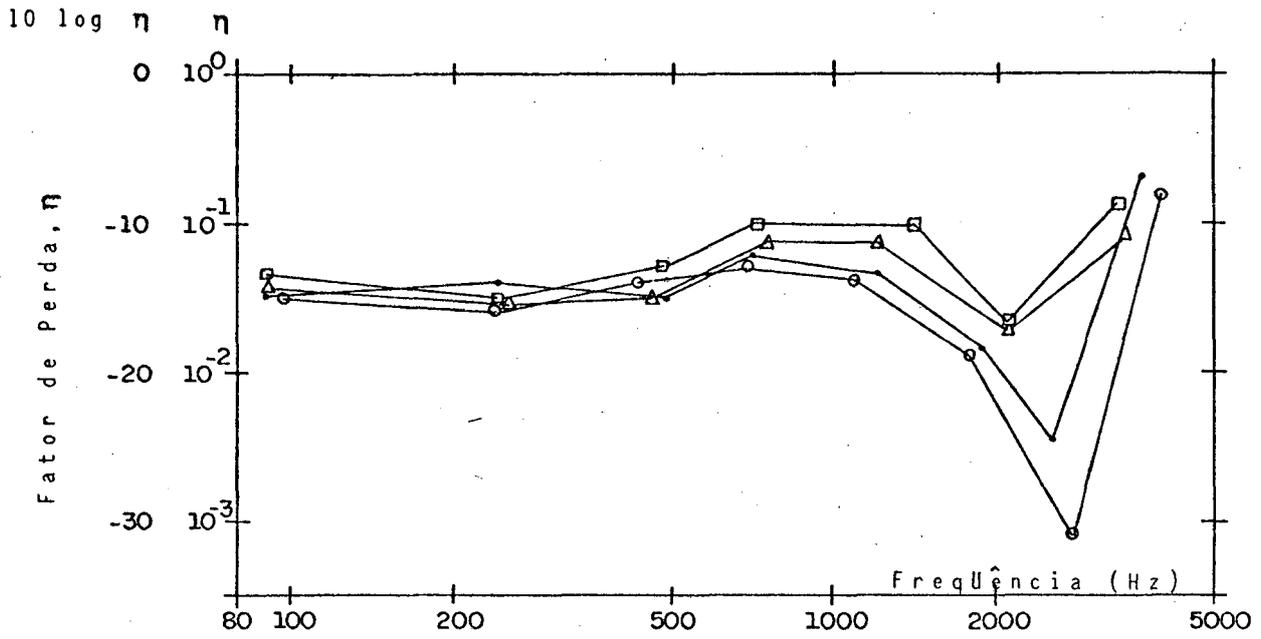


FIGURA (2.11) - Comparação do fator de perda da barra de seção quadrada 50x50mm com grãos de tamanhos diferentes.

↑ □
○ — ○
△ — △
—
□ — □

Areia 0,3 a 0,6mm Areia 1,2 a 2,4mm
 Areia 0,6 a 1,2mm Areia 2,4 a 4,8mm

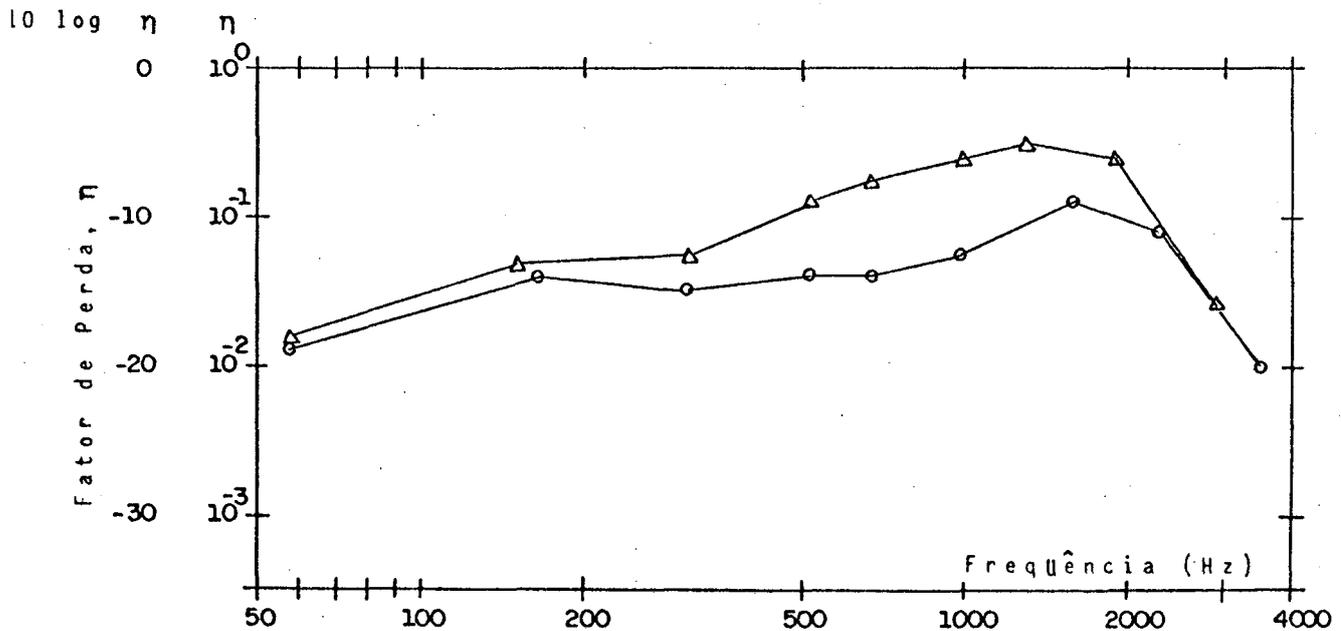


FIGURA (2.12) - comparação do fator de perda da barra retangular 50x25mm, excitada no lado de 50mm, pêso do conjunto barra areia 8,25kg.

↑ □
○ — ○
△ — △

Cheia de areia 0,3 a 0,6mm
 Cheia de areia 2,4 a 4,8mm

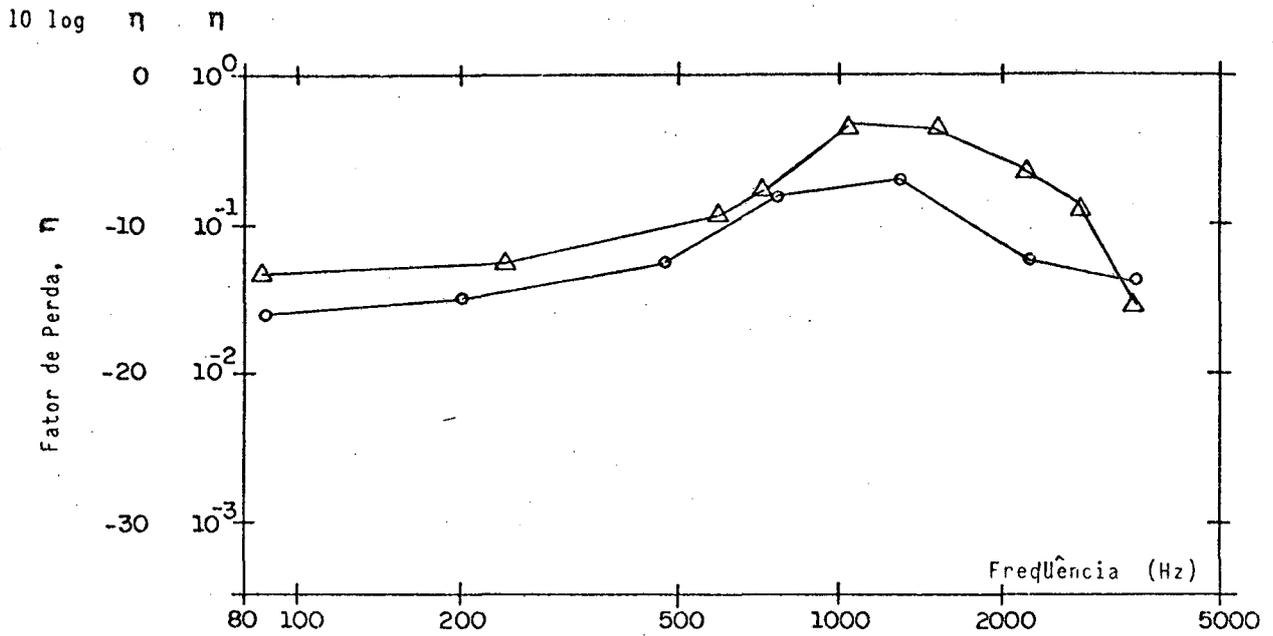


FIGURA (2.13) - Comparação do fator da barra retangular 50x25mm, excitada no lado de 25mm, Pêso do conjunto barra areia 8,85kg.



Cheia de Areia 0,3 a 0,6mm ○—○
 Cheia de areia 2,4 a 4,8mm △—△

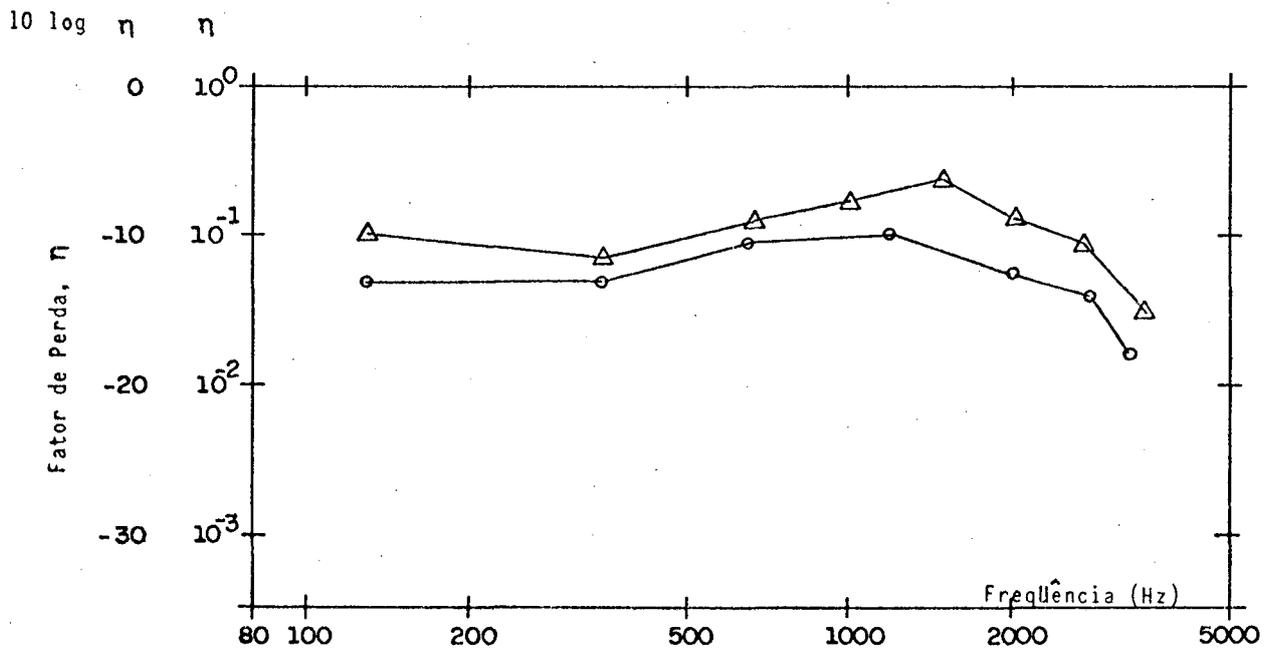


FIGURA (2.14) - Comparação do fator de perda da barra retangular 76x38mm, excitada no lado de 38mm, pêso do conjunto, barra areia 16,5kg.



Cheia da areia 0,3 a 0,6mm ○—○
 Cheia da areia 2,4 a 4,8mm △—△

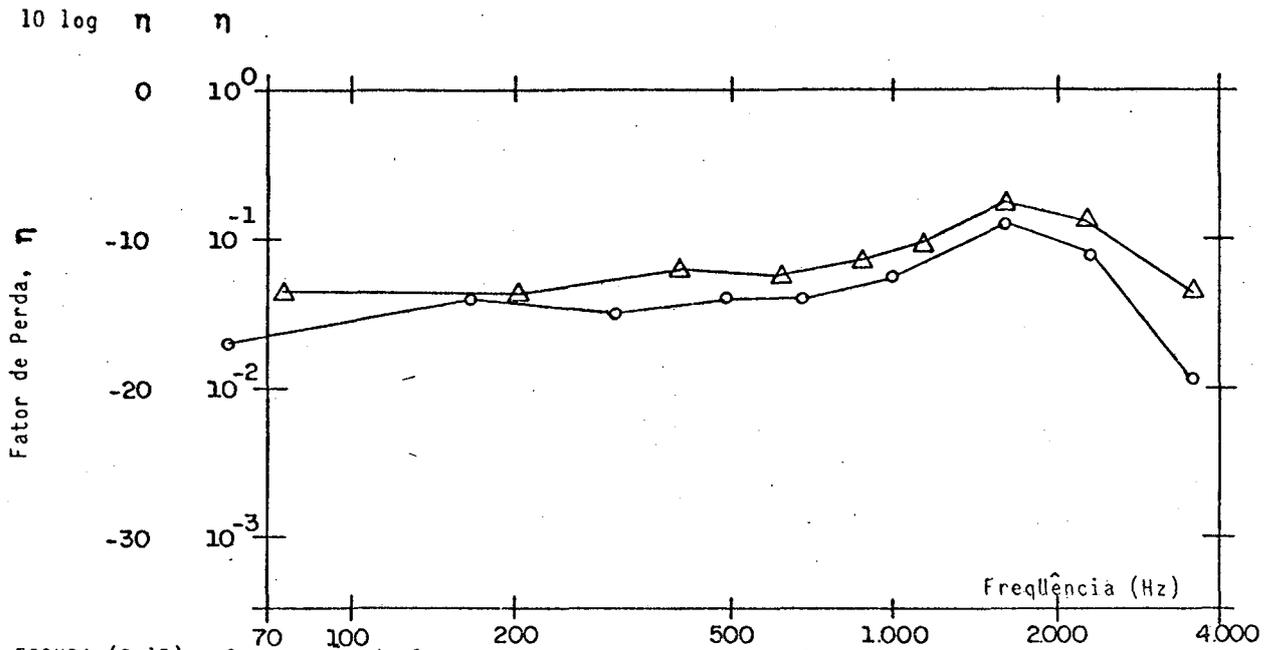


FIGURA (2.15) - Comparação do fator de perda da barra retangular 76x38mm, excitada no lado de 76mm, pêsô do conjunto barra areia 16,5kg.

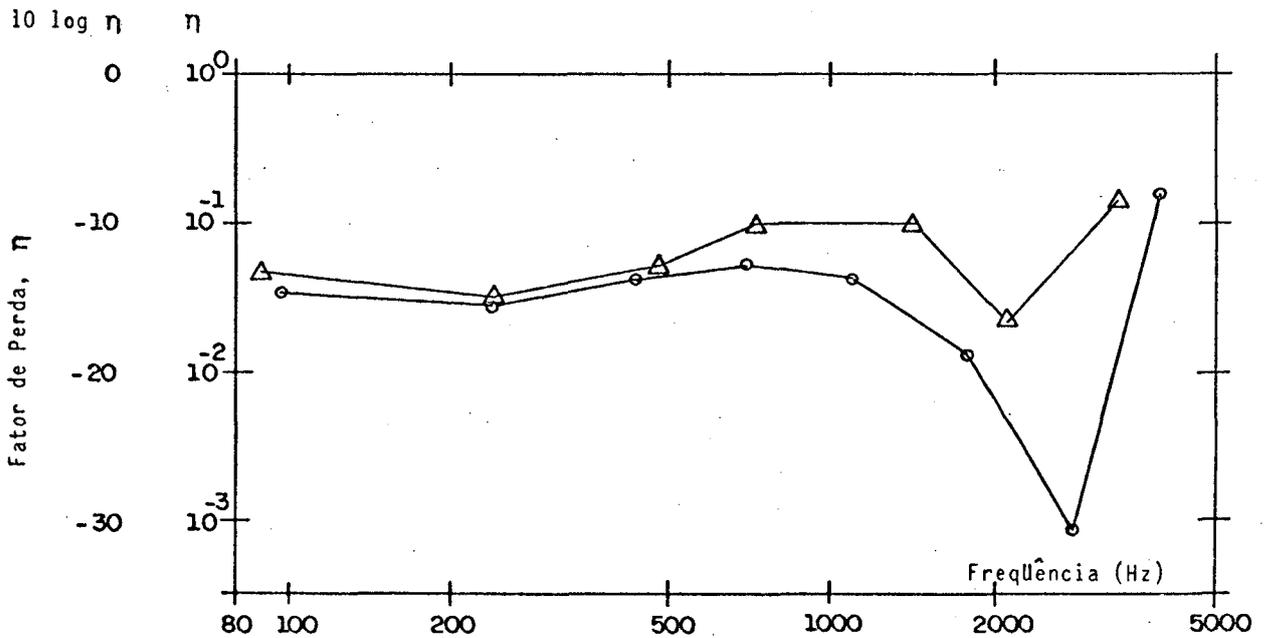
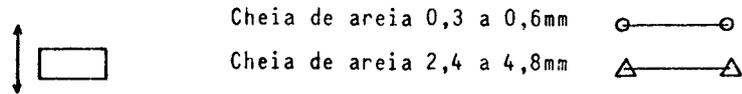
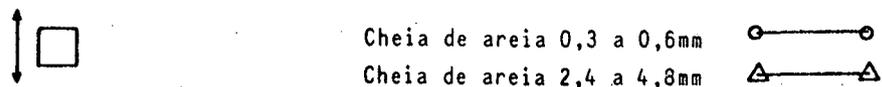


FIGURA (2.16) - Comparação do fator de perda da barra de secção quadrada 50x50mm comprimento 1,70m, pêsô do conjunto barra areia 12,5 kg.



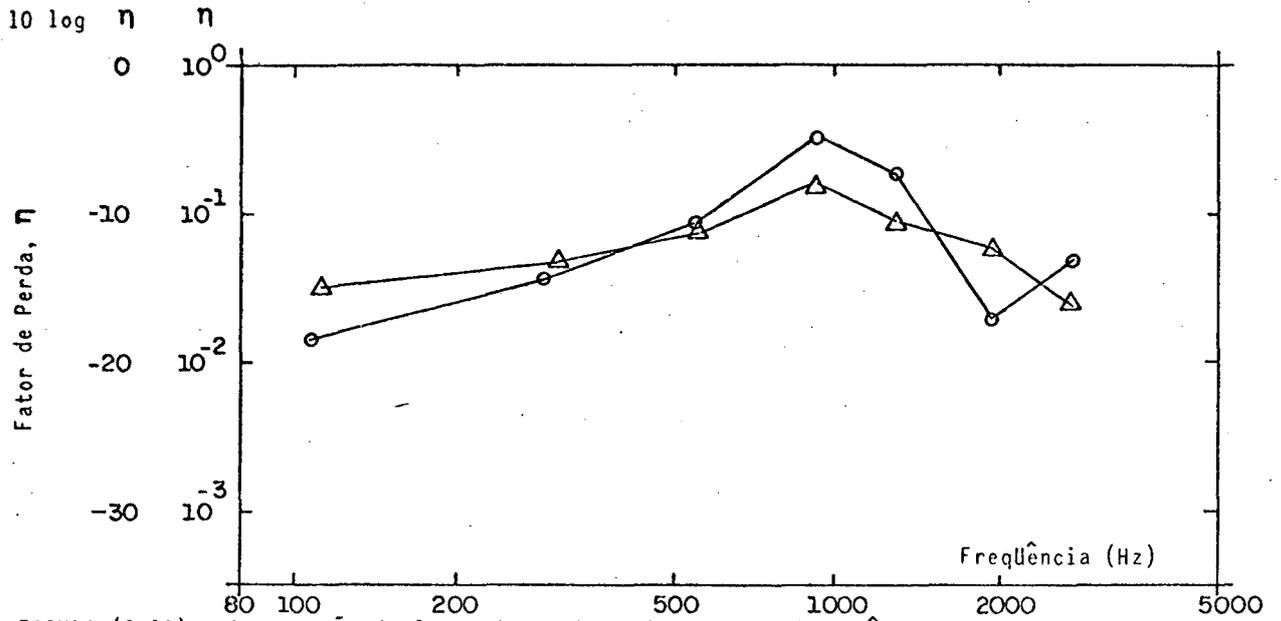


FIGURA (2.17) - Comparação do fator de perda da barra redonda, diâmetro 76mm, comprimento 1,70m, peso do conjunto barra areia, 20,5kg.

Cheia de areia 0,3 a 0,6mm

 Cheia de areia 2,4 a 1,8mm

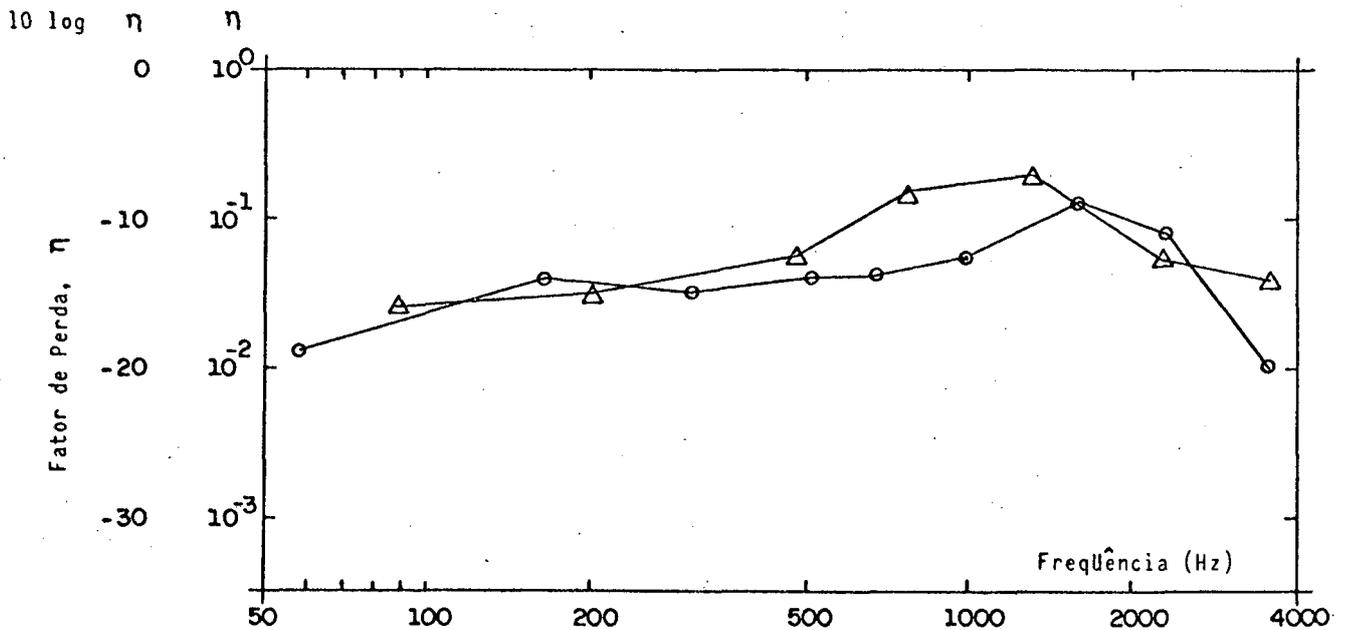


FIGURA (2.18) - Comparação do fator de perda de uma barra de secção retangular, 50x25mm de um lado em relação ao outro, areia 0,3 a 0,6mm.

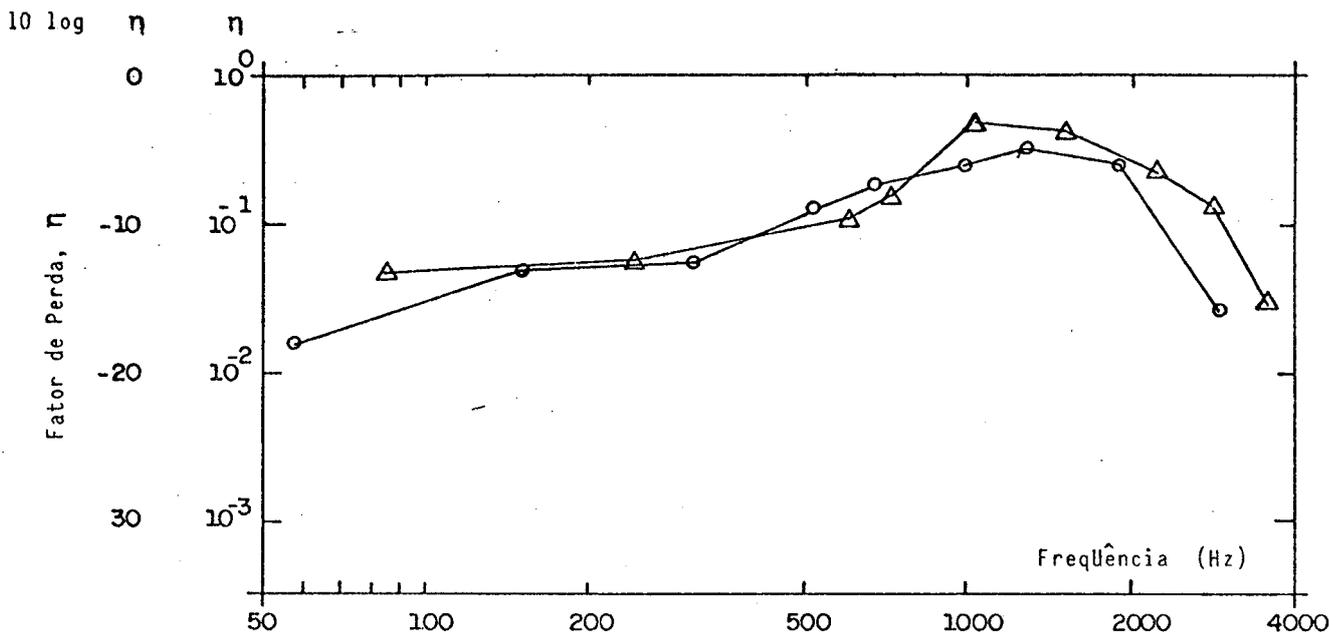


FIGURA (2.19) - Comparação do fator de perda de uma barra de secção retangular, 50x25mm, de um lado em relação ao outro, areia 2,4 a 4,8mm.

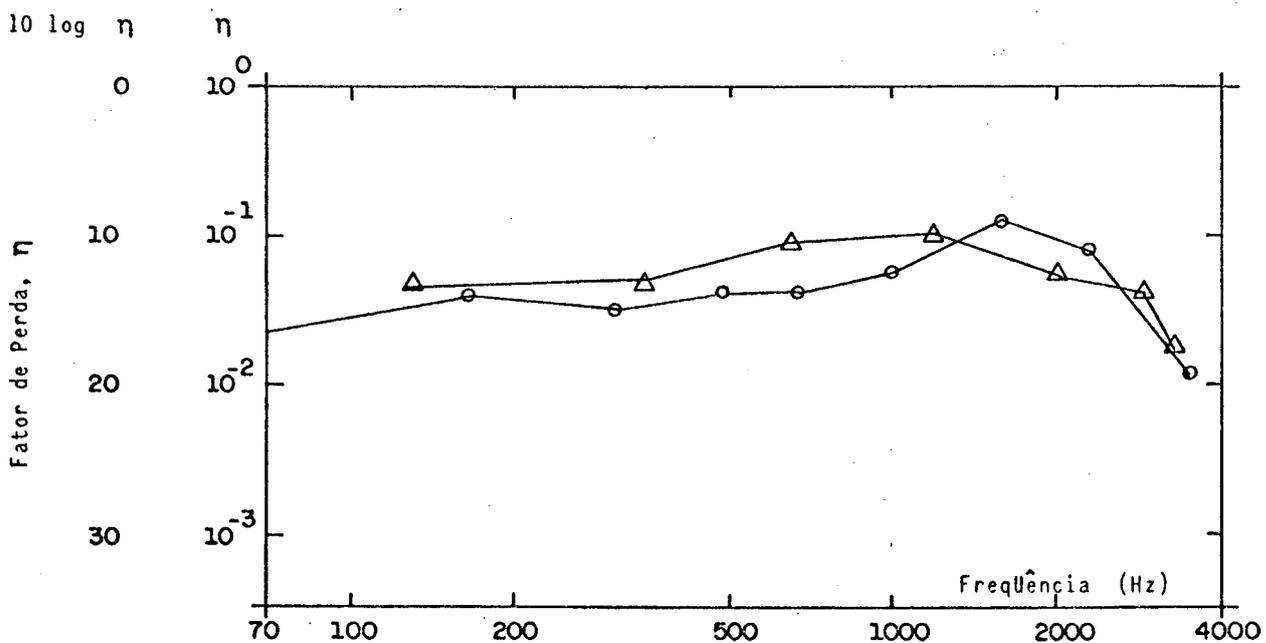


FIGURA (2.20) - Comparação do fator de perda de uma barra de secção retangular, 76x38mm, de um lado em relação ao outro, areia 0,3 a 0,6 mm.



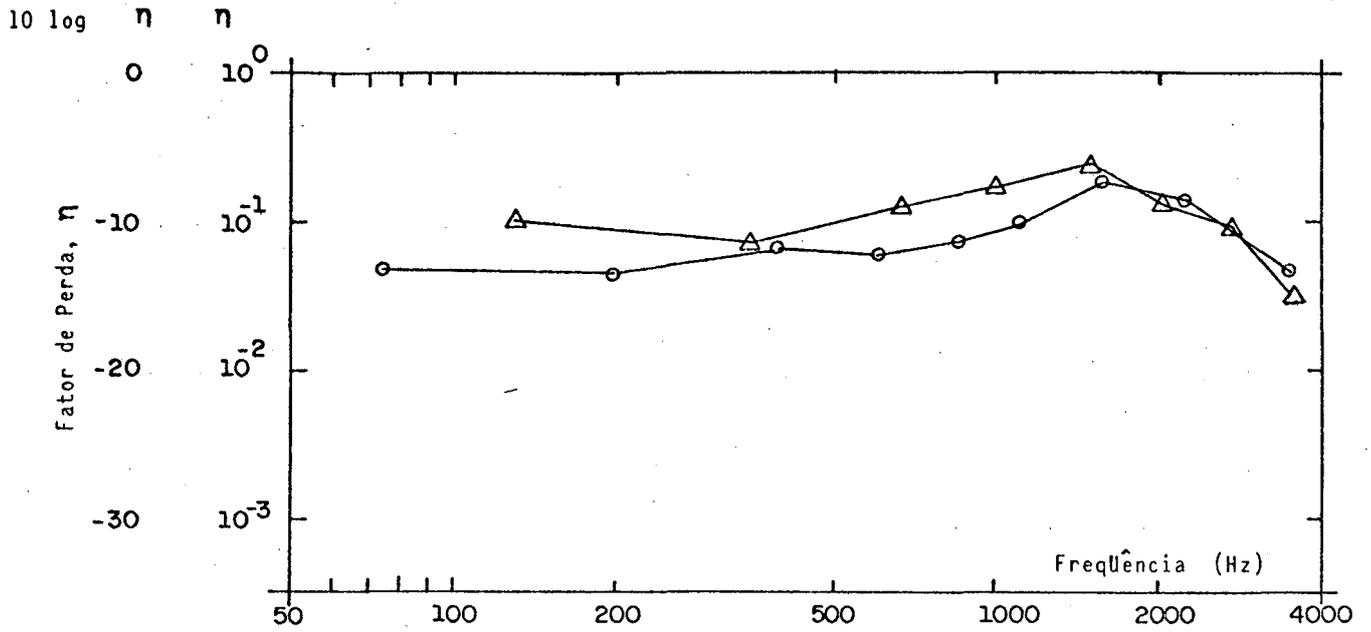


FIGURA (2.21) - Comparação do fator de perda de uma barra de secção retangular 76x38mm, de um lado em relação a outro, areia 2,4 a 4,8mm

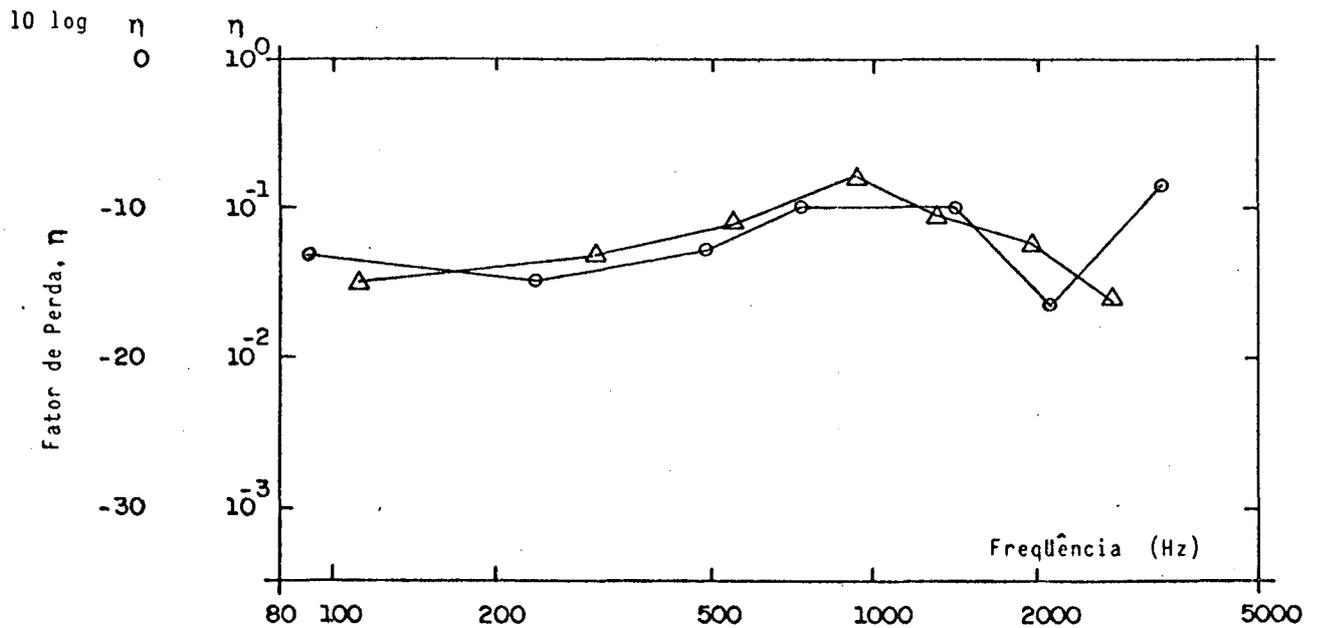
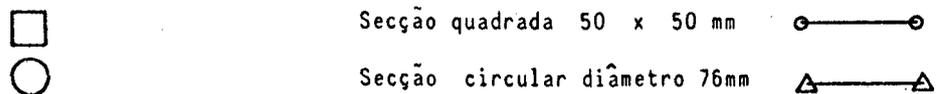


FIGURA (2.22) - Comparação do fator de perda entre uma barra quadrada 50x50mm e uma redonda diâmetro 75mm, cheia de areia 2,4 a 4,8mm.



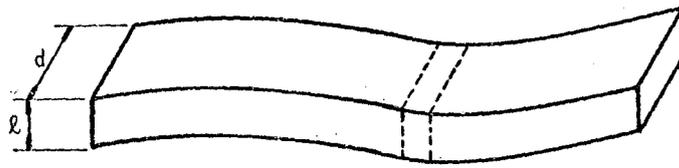


FIGURA (2.23) - Seguimento da barra considerado na análise teórica

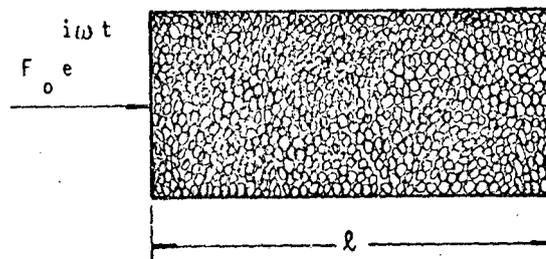


FIGURA (2.24) - Secção da viga onde, está representada a força exercida pela barra sobre o material granular.

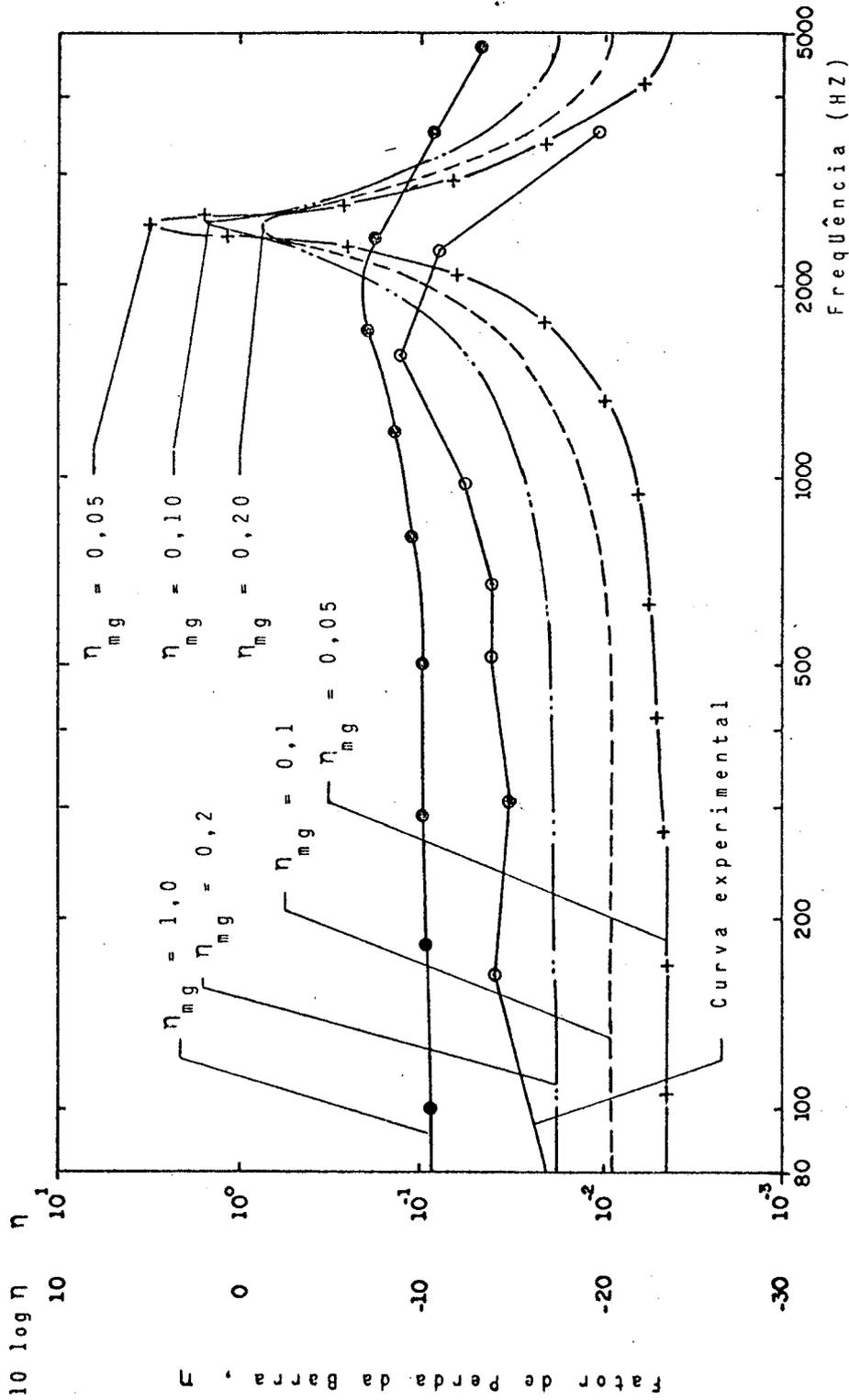


FIGURA (2.25) - Comparação entre o fator de perda experimental e o teórico, para uma barra de seção retangular 50 x 25mm, excitada no lado de 50mm ($\beta = 0,025m$), (foram considerados no cálculo das curvas teóricas, densidade da areia 1480 kg/m³ e velocidade da onda longitudinal 250m/s, no experimento areia grãos de 0,3 a 0,6mm)



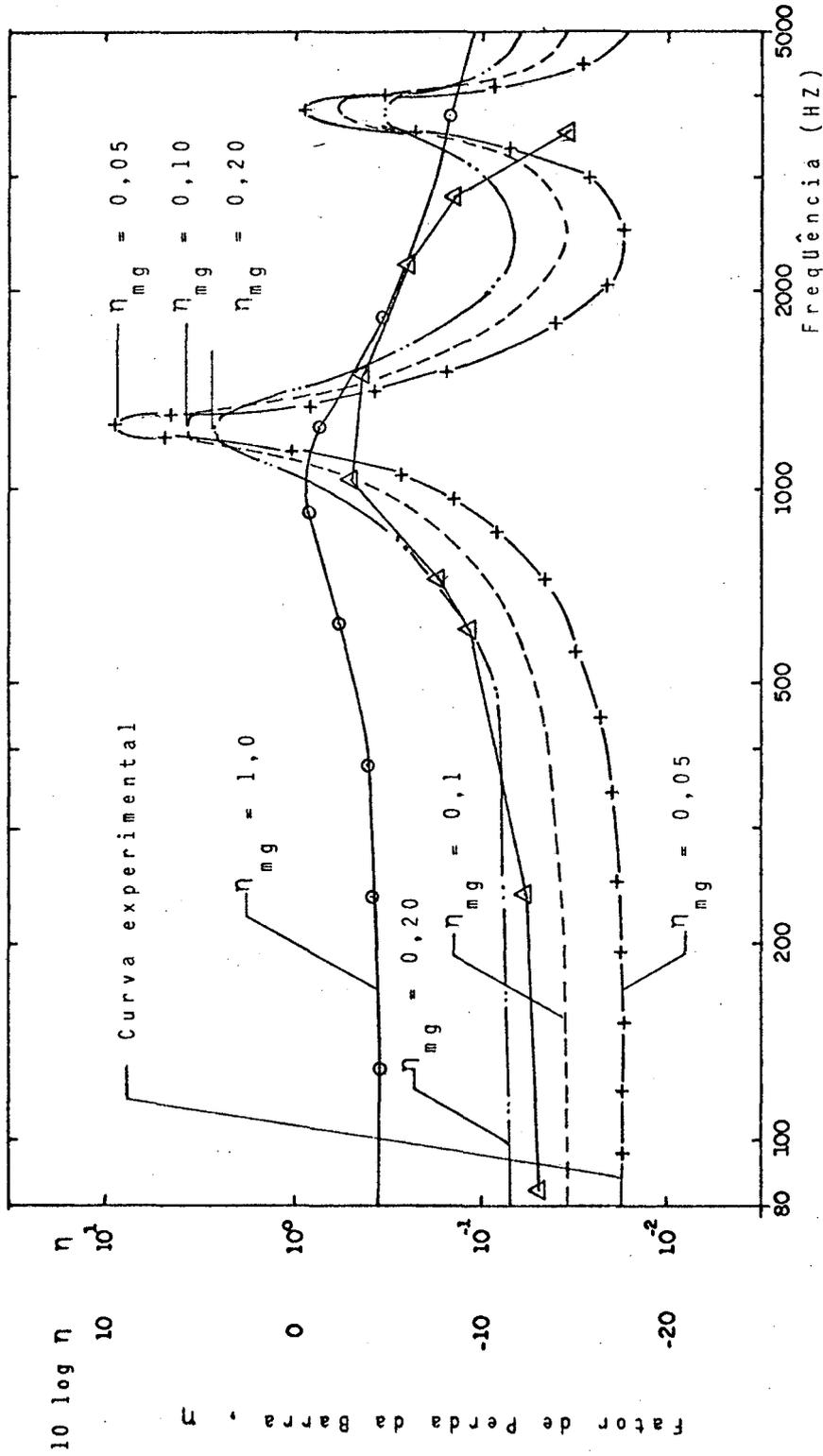


FIGURA (2.26) - Comparação entre o fator de perda experimental e o teórico para uma barra de seção retangular 50 x 25mm, excitada no lado de 25mm ($\lambda = 0,05m$), (foram considerados no cálculo das curvas teóricas, densidade da areia 1480 kg/m³ e velocidade da onda longitudinal 250m/s, no experimento areia grãos de 2,4 a 4,8mm)



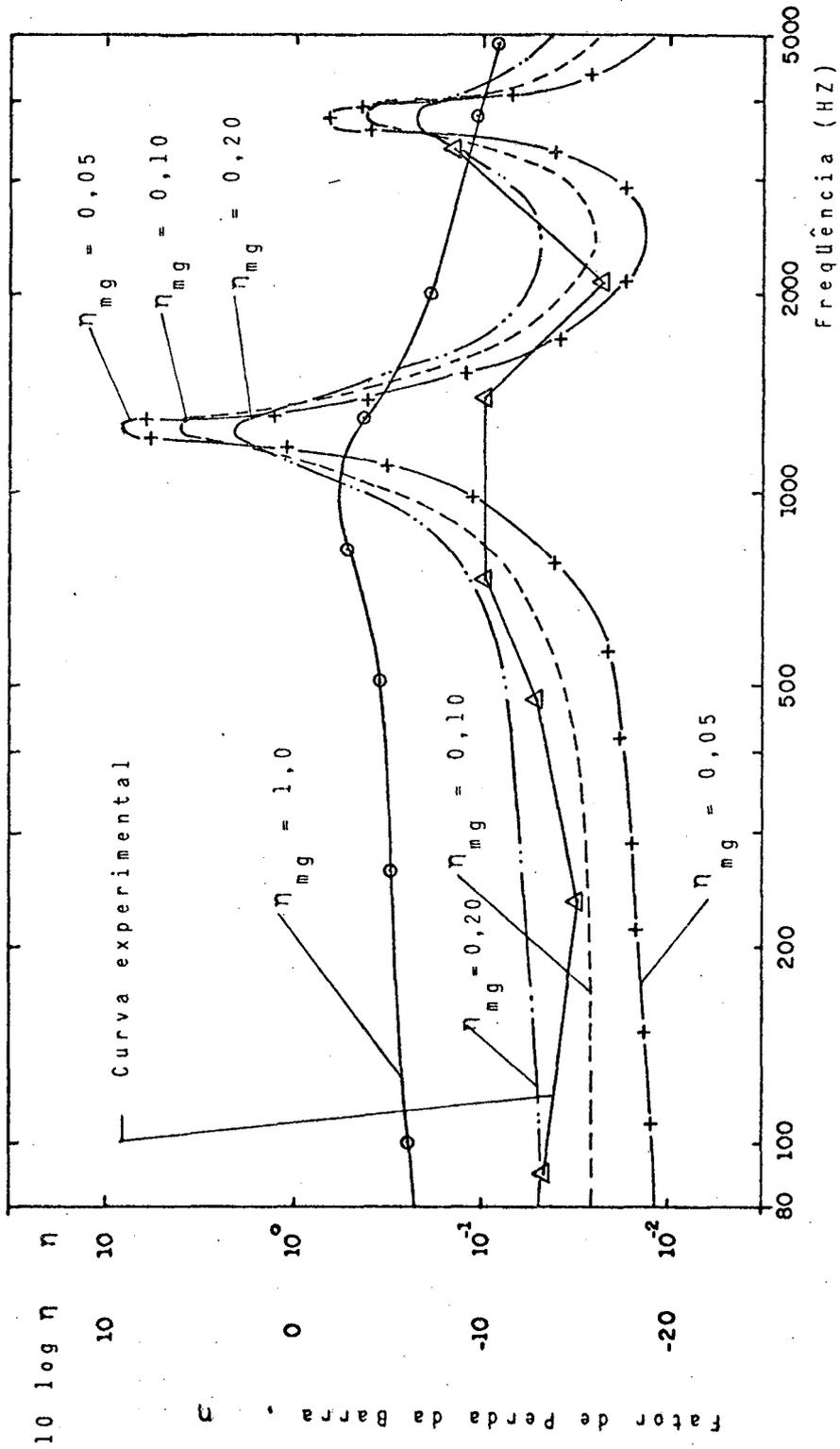


FIGURA (2.27) - Comparação entre o fator de perda experimental e o teórico para uma barra de seção quadrada 50 x 50mm (foram considerados no cálculo das curvas experimentais, densidade da areia 1480 kg/m³ e a velocidade das ondas longitudinais 250m/s no experimento areia grãos de 2,4 a 4,8m)



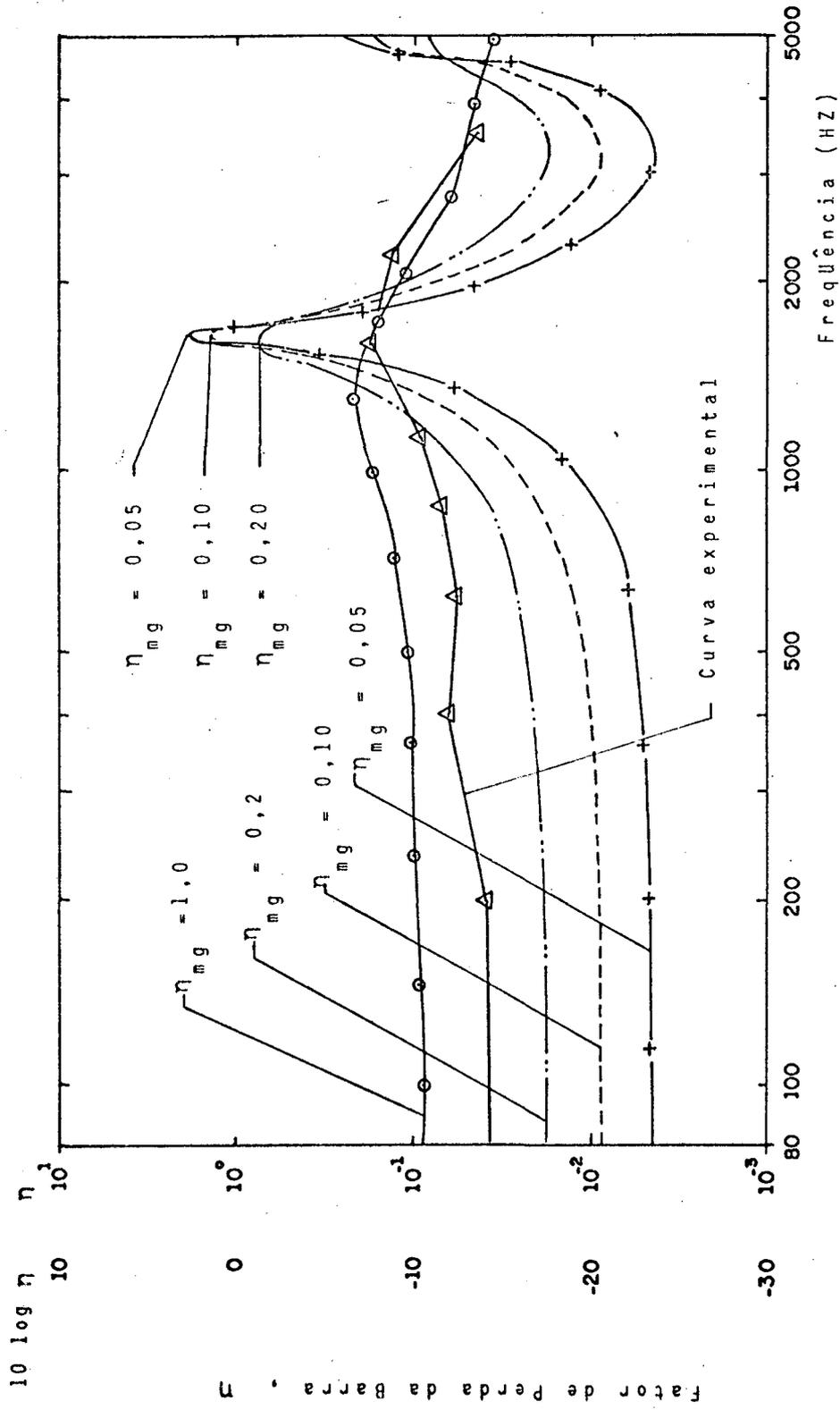


FIGURA (2.28) - Comparação entre o fator de perda experimental e o teórico para uma barra de seção retangular 76 x 38mm, excitada no lado de 76mm ($\lambda = 0,038$), (foram considerados no cálculo das curvas teóricas, densidade da areia 1480 kg/m³ e velocidade da onda longitudinal 250m/s, no experimento areia grãos de 2,4 a 4,8mm)

C A P Í T U L O 3

RESPOSTA DINÂMICA DE UMA COLUNA DE MATERIAL GRANULAR

3.1 Introdução

Máquinas e equipamentos instalados sobre fundações , transmitem energia vibratória a estas. Parte desta energia retorna à máquina, parte é transmitida pelo solo e parte é dissipada na fundação. A fundação aqui analisada consiste de um colchão de areia, técnica esta, às vezes, empregada na instalação de máquinas.

O objetivo deste trabalho consiste em estudar o comportamento dinâmico de tal tipo de fundação. Para isto, uma coluna de material granular confinada em um tubo e tendo em seu topo uma massa concentrada simulando a instalação de uma máquina, foi ensaiada.

Desta maneira, a forma geométrica do dispositivo de testes foi mantida o mais simples possível, evitando a interferência de outros parâmetros, como, por exemplo, a geometria da fundação.

A massa apoiada sobre a coluna tinha a forma de um cilindro maciço de aço escolhido para que suas frequências de ressonância fossem as mais altas possíveis.

Assim, a complexidade da constante troca de energia entre massa e coluna foi minimizada.

3.2 Descrição do Experimento

Para execução do experimento foi construído um dispositivo de ensaio o qual permitia a simulação de uma coluna de material granular, submetida a uma carga no topo e a uma excitação dinâmica na sua base.

Tal dispositivo foi projetado com o objetivo de simular o comportamento de colchões de areia que servem como fundações de máquinas.

Este foi construído a partir de um tubo de aço usinado internamente, com diâmetro interno de 86mm e espessura de 4mm. O mesmo tinha uma de suas extremidades soldadas a uma chapa de 10mm de espessura, que servia como elemento de apoio e fixação na mesa do excitador, conforme mostrado na figura (3.3).

A altura do tubo era de 350mm, o que permitia simular uma faixa bastante ampla de alturas de camadas de areia. Foram também construídos com aço, três massas com 86mm de diâmetro e alturas diferentes: 30mm; 60mm e 120mm, os quais eram utilizados individualmente sobre a camada de areia simulando, cada uma desta, uma carga cujas características estão indicadas no Quadro 1.

MASSA	PRESSÃO POR UNIDADES DE ÁREA
kg	N/m ²
1,43	2,46 x 10 ³
2,86	4,93 x 10 ³
5,72	9,86 x 10 ³

QUADRO 1

Características das Massas Usadas
nos Ensaios da Coluna de Material Granular

Estas massas foram aplicadas sobre alturas distintas de coluna, ensaiadas representando camadas de 100mm, 200mm e 300mm.

Com este dispositivo foram executados ensaios de excitação harmônica nas diversas condições de altura da coluna, massa adicionada, amplitude de vibração, tamanho do grão e teor de umidade. Foram também executados ensaios com excitação por impacto, os quais estão descritos no item 3.2.2.

3.2.1 Ensaaios com Excitação Harmônica

O ensaio consistiu na aplicação de uma força harmônica à base da coluna, com auxílio de um excitador eletrodinâmico (B&K-4812). Sobre a coluna encontrava-se o cilindro de aço onde foi fixado um acelerômetro (B&K-4366). Outro acelerômetro idêntico foi fixado à base da coluna, para permitir a leitura da amplitude de vibração naquele ponto.

A aceleração RMS foi medida individualmente em ambos os pontos. Cada sinal era amplificado pelo conjunto de pré-amplificador/amplificador de medição (B&K-2619 e B&K-2607). Os sinais eram ainda filtrados pelo B&K-1621, após o que monitorado por um osciloscópio e a leitura RMS feita em um voltímetro eletrônico (B&K-2425). O conjunto filtro/osciloscópio/voltímetro foi operado com auxílio de uma chave seletora para possibilitar a medição de ambos os sinais com os mesmos instrumentos.

Para excitação, foram utilizados um gerador de sinal (B&K-1027) e um amplificador de potência (B&K-2707) que alimentavam o excitador eletrodinâmico.

O diagrama de blocos da instrumentação usada no experimento pode ser visto na figura (3.1).

As medições foram conduzidas em frequências discretas (tons puros) sendo os sinais filtrados em bandas de 1/3 de oitava, as quais eram centradas nas frequências de teste. A faixa de frequência analisada foi entre 10Hz e 5KHz.

Leituras em pontos intermediários aos especificados pelas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava eram conduzidas quando leituras nestas bandas variavam bruscamente. Este procedimento tinha por objetivo obter uma melhor configuração da forma da curva que estava sendo obtida experimentalmente.

3.2.2 Ensaio com Excitação por Impacto

Como os ensaios até então executados consideravam forças harmônicas de frequências discretas, decidiu-se analisar o comportamento do sistema quando submetido à forças impulsivas. Executaram-se, então, ensaios que consistiram da excitação por um impacto na massa alojada sobre a coluna de material granular, onde foram medidos simultaneamente força e resposta em função do tempo.

Para isto instalou-se sobre a massa adicionada, um acelerômetro (B&K-4366) e um transdutor de força (B&K-8200), montado na ponta de um martelo especialmente construído para este fim. O sinal do transdutor de força era conduzido pelo amplificador de carga (B&K-2651) e analisado no analisador de Fourier. O sinal do acelerômetro passava pelo medidor de vibração (B&K-2511) e também era analisado no analisador de Fourier. Veja o diagrama de blocos da instrumentação utilizada na Figura (3.2).

Através do analisador de Fourier (HP-5451-C) foi obtida uma relação entre a transformada de Fourier da resposta do material granular e a da força aplicada sobre a massa apoiada na coluna de areia. Os resultados obtidos, para maior precisão, consistiram da média de 50 impactos e uma resolução de 2,5HZ aproximadamente, aplicados em cada uma das colunas ensaiadas. Estes resultados encontram-se apresentados e comentados no item 3.3.6 deste Capítulo.

3.3 Resultados e Discussão

Os ensaios de excitação harmônica permitiram a obtenção da razão-resposta da massa pela resposta da base, a qual foi plotada para vários valores de frequência testados. Esta razão foi plotada também, para as diversas condições ensaiadas, e serão comentadas a seguir.

Os ensaios de resposta por impacto levaram à obtenção dos espectros de frequência, os quais também estão representados em um dos itens abaixo.

3.3.1 Efeito da Massa Apoiada Sobre a Coluna

Nos ensaios realizados com o objetivo de conhecer os efeitos da massa adicionada sobre a coluna de material granular, utilizou-se areia com grãos selecionados entre 0,6 e 1,2mm, coluna com altura de 300mm e diâmetro de 86mm, e a amplitude de vibração da base ajustada em $1,75\text{m/s}^2$.

Foram executados ensaios com 3 massas diferentes, respectivamente 1,43kg, 2,86kg e 5,72kg. Cada massa, representada por um cilindro do mesmo diâmetro da coluna de material granular, foi testada individualmente sobre a coluna.

A área de ação era de 58cm^2 , o que representa, respectivamente para cada massa, uma pressão de $2,46 \times 10^3 \text{ N/m}^2$; $4,93 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ e $9,86 \times 10^3 \text{ N/m}^2$.

Os resultados obtidos nestes ensaios foram plotados em função da frequência e podem ser vistos na figura (3.4).

Pode-se observar, através destas figuras, oscilações provavelmente devidas à formação de ondas estacionárias na coluna, e um pico bem nítido em todos os três casos.

Este pico é atribuído à ressonância da massa sobre a coluna, e com efeito predominante sobre as ondas estacionárias.

Observa-se também que a massa maior produz maior pico na ressonância, o qual decresce com o peso aplicado. A frequência natural aumenta em 1/3 de oitava com o decréscimo da massa para 1/4 do seu valor. Esta mesma relação não foi verificada para a massa intermediária, talvez por existir um ponto de máximo entre 160 e 200 HZ.

A frequência natural para as três massas ensaiadas fica

ram entre 160 e 200 HZ, uma faixa estreita de variação, indicando pouca influência da massa adicionada. Observa-se, contudo, que a frequência natural diminui com o aumento da massa.

3.3.2 Altura da Coluna

Estes ensaios foram realizados para três alturas de coluna, respectivamente 100mm, 200mm e 300mm. Nestas três colunas de material granular utilizou-se o peso médio, com massa de 2,86kg (pressão de $4,95 \times 10^3 \text{ N/m}^2$), areia selecionada: grãos de 0,6 a 1,2mm, amplitude de vibração na base $1,75 \text{ m/s}^2$, diâmetro da coluna 86mm.

As curvas obtidas deste ensaio, podem ser vistas na figura (3,5), onde observam-se frequências naturais bem nítidas entre 160 e 200 HZ, na mesma região observada nas curvas comparativas da massa adicionada. O que indica que as frequências naturais, tanto para massas diferentes, como para alturas de coluna diferentes ocorrem na mesma região.

Observa-se um crescimento do pico de ressonância com a diminuição da altura da coluna, e uma diminuição da frequência natural com o aumento da altura da coluna.

3.3.3 Amplitude da Vibração na Base da Coluna

Este ensaio foi realizado com o objetivo de se conhecer o efeito da variação da amplitude de vibração na resposta da coluna de material granular. Foram, então, executados ensaios com amplitudes distintas de vibração da base da coluna: $0,40 \text{ m/s}^2$; $0,85 \text{ m/s}^2$ e $1,75 \text{ m/s}^2$.

Durante cada ensaio, a amplitude foi mantida aproximadamente constante. A massa utilizada foi de 5,72kg, correspondendo a uma pressão de $9,86 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ sobre a coluna. A areia empre

gada possuía grãos selecionados de 0,6 a 1,2mm, a altura da coluna foi de 300mm e o diâmetro 86mm.

Os resultados estão plotados na figura (3.6) onde se pode comparar o comportamento da coluna quando excitada nas diferentes amplitudes de vibração ensaiadas.

Observa-se na figura que a freqüência natural diminui em 1/3 de oitava para um aumento da amplitude de duas vezes. Isto é esperado, pois, para pequenas amplitudes os grãos permanecem em contato e a rigidez não varia de forma significativa com a amplitude. Porém, para grandes amplitudes, os grãos são obrigados a se deslizarem uns em relação aos outros, e conseqüentemente, diminuindo a rigidez.

Para baixas amplitudes, o comportamento deixou a forma observada até então, um grau de liberdade, e apresenta um novo comportamento, o qual ressalta a variação dos resultados com a freqüência. Isto pode ser atribuído à formação de ondas estacionárias. O pico, porém, manteve-se na mesma região de freqüência observada em todos os ensaios.

Como nestes ensaios a massa (M) foi mantida constante, e sabendo-se que:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3.1)$$

então:

$$f_n \propto \sqrt{K} \quad (3.2)$$

Espera-se, portanto, que para pequenas amplitudes a freqüência natural seja independente da amplitude. Para grandes amplitudes, entretanto, observa-se que a freqüência natural diminui.

3.3.4 Efeito do Tamanho do Grão

Com o intuito de se conhecer a influência do tamanho do grão na resposta da coluna de material granular excitada na base por uma força harmônica, foram executados ensaios em quatro colunas de diferentes tamanhos de grãos, que são: 0,3 a 0,6mm; 0,6 a 1,2mm; 1,2 a 2,4mm e 2,4 a 4,8mm.

Em todas estas quatro colunas foi mantida constante a massa aplicada sobre a coluna, 5,72kg (pressão de $9,86 \times 10^3 \text{ N/m}^2$). A amplitude de vibração na base, $1,75 \text{ m/s}^2$. A altura da coluna, 300mm e o diâmetro 86mm.

Os resultados estão plotados na figura (3.7) onde pode-se comparar o comportamento da coluna para todos os tamanhos de grãos ensaiados. Observa-se que as curvas tem a mesma forma típica, à de um sistema com um grau de liberdade.

Nota-se um comportamento bastante diferente do obtido nos ensaios de amortecimento de barras cheias com material granular. Desta forma, torna-se difícil extrair qualquer conclusão sobre a influência do tamanho do grão, antes de serem executados novos testes visando especificamente a análise deste parâmetro.

3.3.5 Efeito do Teor de Umidade

Com o objetivo de se conhecer o efeito do teor de umidade no material granular, foram ensaiadas duas colunas, uma totalmente seca e outra saturada com o teor de umidade da ordem de 15%.

Estes ensaios foram realizados utilizando-se grãos selecionados de 0,3 a 0,6mm, a massa no topo da coluna de 5,72kg (pressão de $9,86 \times 10^3 \text{ N/m}^2$), a altura da coluna de 300mm com o diâmetro de 86mm. Manteve-se constante em ambos os ensaios a amplitu

de de vibração da base em $1,75 \text{ m/s}^2$.

Na figura (3.8), foram plotadas as curvas cujos valores foram obtidos da média do resultado de três ensaios realizados com cada uma das colunas. Os valores máximos e mínimos obtidos nos ensaios não variaram mais que 3% dos seus valores médios.

Na comparação destas curvas é observado um deslocamento no pico de ressonância da coluna de areia úmida em mais $1/3$ de oitava em relação ao pico da coluna de areia seca. Observa-se também, que os valores máximos ocorrem na coluna úmida, onde quase dobram de valor.

Duas possíveis explicações para tal observação experimental referem-se à menor capacidade de dissipação da energia nos contatos, devido à formação de um filme de água o qual serve de lubrificante e a segunda, refere-se as forças de coesão provocadas pela umidade, as quais mantêm os grãos mais unidos.

3.3.6 Resposta ao Impacto

Para se conhecer através do espectro de Fourier, a resposta em frequência da coluna de material granular, de forma a serem obtidas informações sobre a do sistema (material granular, mas sa adicionada) e sua variação em função do tamanho do grão, foram ensaiados quatro tamanhos de grãos de areia.

Os grãos ensaiados foram: 0,3 a 0,6mm; 0,6 a 1,2mm; 1,2 a 2,4mm e 2,4 a 4,8mm, agrupados cada tamanho, em uma coluna de 300mm de altura e 86mm de diâmetro. Sobre a coluna era adicionada a massa de 5,72kg. Veja como exemplo os espectros das figuras (3.9) e (3.10). Os resultados com areias de tamanhos de grão intermediários não foram plotados devido a pequena diferença observada.

Observou-se, nesses espectros, o mesmo comportamento obtido nos ensaios realizados com frequências discretas, obtendo-se uma ressonância bem definida indicando um sistema de um grau de

liberdade, cuja frequência natural encontra-se na faixa de 100 a 140HZ, para os quatro tamanhos de grãos selecionados. Estes resultados levam a concluir que o amortecimento efetivo do material granular é bastante superior aos obtidos em ensaios de laboratório [09].

Isto mostra que o material granular permite a passagem de ondas elásticas de forma bastante irregular, fazendo com que a amplitude destas perturbações, propagando-se através dele, sofra uma grande atenuação com a distância. Este fato é possivelmente devido a inabilidade das forças se transmitirem integralmente nos contatos.

3.3.7 Rigidez da Coluna de Material Granular

É comum encontrar-se na prática, fundações de máquinas que consistem de blocos de concreto apoiados sobre colchões de areia. Valores práticos de rigidez deste tipo de fundação são encontrados na literatura, [11], apesar dos poucos trabalhos científicos publicados sobre o assunto.

Neste item, os valores de rigidez dinâmica de uma coluna de material granular são comparados aos encontrados na literatura

A rigidez K [N/m] da coluna de material granular pode ser expresso por, [15].

$$K = M_{tot.} (2\pi f_n)^2 \quad (3.3)$$

onde $M_{tot.}$ é a massa total a qual inclui a massa adicionada e a massa equivalente da coluna, e f_n a frequência de ressonância do sistema.

A massa equivalente da coluna é considerada como sendo 1/3 da mesma [10].

O coeficiente de compressão é definido como sendo a rigidez por unidade de área.

$$K_s = \frac{K}{A} \quad (3.4)$$

onde A é a área da secção reta da coluna. No quadro 2, encontram-se os valores do coeficiente de compressão da coluna de material granular, para várias massas adicionadas e alturas de coluna estudadas neste capítulo.

MASSA ADICIONADA	ALTURA DE COLUNA	MASSA EQUIVALENTE	f_n	K	K_s
kg	m	kg	Hz	N/m	N/m ³
1,43	0,3	2,30	160	23×10^5	$4,00 \times 10^8$
2,86	0,1	3,15	180	40×10^5	$6,93 \times 10^8$
2,86	0,2	3,44	180	44×10^5	$7,57 \times 10^8$
2,86	0,3	3,73	160	37×10^5	$6,48 \times 10^8$
5,72	0,3	6,59	200	104×10^5	$17,91 \times 10^8$

QUADRO 2
COEFICIENTE DE COMPRESSÃO
DAS COLUNAS ENSAIADAS

As poucas referências sobre o assunto, por exemplo [11], indicam valores de K_s da ordem de $4,1 \times 10^7$ N/m³ para areia com grãos tamanho médio, que são uma ordem de grandeza inferiores aos valores obtidos nesta dissertação.

Estes valores de rigidez de fundações permitem calcular aproximadamente as frequências de ressonância vertical das máquinas assim instaladas.

3.4 Análise Teórica dos Parâmetros Associados à Dissipação da Energia do Material Granular.

Dois modelos matemáticos são analisados nesta sessão. Um

considerando que as forças exercidas por ondas longitudinais que se propagam através do material granular e outro considerando que a massa posicionada no topo da coluna comporta-se como um sistema de um grau de liberdade.

O resultado de ambos os modelos são comparados com os resultados experimentais e comentados a seguir.

3.4.1 Predição do Comportamento Dinâmico do Sistema Assumindo Propagação de Ondas na Coluna de Material Granular

Este modelo assume que a resposta da massa posicionada no topo da coluna seja devida às forças exercidas por ondas longitudinais que se propagam através da coluna de material granular.

O eixo x de referência tem origem na base da coluna. A base por sua vez, possui um deslocamento $\xi(x,t)$.

Um esquema do sistema a ser modelado nesta seção está mostrado na figura (3.11).

O deslocamento da partícula de material granular é expresso por:

$$\xi(x,t) = (A e^{-j\bar{k}x} + B e^{j\bar{k}x}) e^{j\omega t} \quad (3.5)$$

e as condições de contorno são:

$$\text{em } x = 0, \quad \xi(0,t) = X_0 e^{j\omega t}$$

a qual, uma vez substituída na equação (3.5), leva à seguinte expressão:

$$A + B = X_0 \quad (3.6)$$

em $x = l$,

$$M \left[\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2} \right]_{x=l} = -ES \left[\frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x} \right]_{x=l}$$

o que leva à expressão

$$-M\omega^2 \left[A e^{-j\bar{k}l} + B e^{j\bar{k}l} \right] = jES\bar{k} \left[A e^{-j\bar{k}l} - B e^{j\bar{k}l} \right] \quad (3.7)$$

através de (3.6) e (3.7), pode-se determinar as constantes A e B, então,

$$A = X_0 \left[\frac{2 \frac{\bar{k}ES}{M\omega^2} \cos \bar{k}l - 2 \operatorname{sen} \bar{k}l - \left[-j + \frac{\bar{k}ES}{M\omega^2} \right] e^{-j\bar{k}l}}{2 \frac{\bar{k}ES}{M\omega^2} \cos \bar{k}l - 2 \operatorname{sen} \bar{k}l} \right] \quad (3.8)$$

$$B = \frac{X_0 \left[-j + \frac{\bar{k}ES}{M\omega^2} \right] e^{-j\bar{k}l}}{2 \frac{\bar{k}ES}{M\omega^2} \cos \bar{k}l - 2 \operatorname{sen} \bar{k}l} \quad (3.9)$$

os deslocamentos da base e da massa M, podem ser obtidos pelas expressões,

$$\xi(0, t) = (A + B) e^{j\omega t} \quad (3.10)$$

e

$$\xi(l, t) = (A e^{-j\bar{k}l} + B e^{j\bar{k}l}) e^{j\omega t} \quad (3.11)$$

onde os valores A e B são determinados pelas equações (3.8) e (3.9), respectivamente.

O experimento descrito neste Capítulo consistiu em determinar a razão das amplitudes de resposta, isto é:

$$\frac{\|\xi(\ell, t)\|}{\|\xi(0, t)\|} \quad (3.12)$$

a qual pode ser também expressa por:

$$\frac{\| A e^{-j\bar{k}\ell} + B e^{j\bar{k}\ell} \|}{\| A + B \|} \quad (3.13)$$

o termo que representa a variação temporal foi suprimido no cálculo do quociente acima.

O amortecimento interno do material granular foi considerado expressando a constante de onda longitudinal da forma complexa,

$$\bar{k} = k(1 - j\eta_{mg}/2) \quad (3.14)$$

onde η_{mg} é o fator de perda interno do material granular.

O modelo apresentado pela equação (3.13) foi comparado aos resultados de uma coluna de 300mm de altura, 86mm de diâmetro, com areia seca (grãos 0,6 a 1,2mm) e tendo uma massa adicionada no topo de 5,72kg.

A velocidade de ondas longitudinais no material granular foi considerada como sendo 250 m/s, [09].

O experimento foi conduzido mantendo-se uma amplitude de vibração na base constante e igual a 0,85 m/s². A comparação está mostrada na figura (3.13).

Dois valores de amortecimento interno foram utilizados na predição pela equação (3.13), $\eta = 0,05$ e $\eta = 1,0$.

Nota-se que para fatores de perda da ordem de 1,0, a cur

va predita tem forma bastante semelhante à experimental, porém a discrepância entre frequências de máxima resposta, é nítida. Idênticas discrepâncias foram observadas em outros exemplos, onde a altura da coluna ou a massa adicionada no topo da mesma, eram variadas.

Isto leva à conclusão que a influência da propagação de ondas no material granular não descreve de maneira correta a resposta da massa relativa a resposta da base.

Tendo em vista tal discrepância, um segundo modelo será discutido na seção seguinte, o qual assume o sistema, comportando-se como o de um grau de liberdade.

3.4.2 Modelo Representando o Sistema com um Grau de Liberdade

O modelo discutido nesta seção assume que a coluna e a massa posicionada no topo podem ser representados como um sistema de um grau de liberdade, Veja figura (3.12). Será assumido nesta análise que a coluna possui rigidez e dissipação interna.

A equação geral do movimento da massa $|X(t)|$ em relação a da base $|X_b(t)|$ pode ser expressa na forma.

$$M_{ad}(\ddot{X}(t)) + C(\dot{X} - \dot{X}_b) + K(X - X_b) = 0$$

ou,

$$M_{ad}\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = C\dot{X}_b(t) + KX_b(t) \quad (3.15)$$

supondo,

$$X(t) = X_1 e^{j\omega t} \quad (3.16)$$

e

$$x_b(t) = x_o e^{j\omega t} \quad (3.17)$$

substituindo (3.16) e (3.17) em (3.15), tem-se:

$$\frac{x_1}{x_o} = \frac{j\omega C + K}{-M_{ad.}\omega^2 + j\omega C + K} \quad (3.18)$$

onde,

K - é a rigidez da coluna

M_{ad.} - a massa colocada no topo da coluna

C - o amortecimento interno da coluna

A rigidez (K) da coluna foi obtida a partir da frequência de ressonância obtida experimentalmente. Esta frequência corresponde à máxima resposta da massa.

Considerando a massa da coluna de material granular, a expressão da frequência pode ser escrita da forma, [10].

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_{ad.} + 1/3 M_{col.}}} \quad (3.19)$$

onde obtém-se a rigidez K,

$$K = 4\pi^2 f_n^2 (M_{ad.} + 1/3 M_{col.}) \quad (3.20)$$

Sabendo que o amortecimento na coluna é a fração da energia máxima do sistema que é dissipada por radiano de oscilação, tem-se:

$$\eta_{total} = \frac{E_{diss} / \text{ciclo}}{2\pi M_{eq.} \langle \bar{V}^2 \rangle} \quad (3.21)$$

onde:

$$E_{\text{diss}}/\text{ciclo} = \eta_{\text{mg}} \cdot 2\pi \cdot M_{\text{col}} \cdot \frac{\langle v^2 \rangle}{2} \quad (3.22)$$

então,

$$\eta_{\text{total}} = \frac{M_{\text{col}} \cdot \eta_{\text{mg}} \cdot 1/2}{M_{\text{eq}}} \quad (3.23)$$

sendo:

$$M_{\text{eq}} = M_{\text{ad.}} + \frac{1}{2} M_{\text{col.}} \quad (3.24)$$

a equação (3.23) pode então ser escrita na forma:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{1}{2} \frac{M_{\text{col}}}{M_{\text{ad.}} + 1/2 M_{\text{col.}}} \cdot \eta_{\text{mg}} \quad (3.25)$$

sabendo que para um sistema de um grau de liberdade,

$$\eta_{\text{total}} = \frac{2C}{C_{\text{crítico}}} \quad (3.26)$$

então:

$$C = \eta_{\text{tot.}} \cdot M_{\text{eq.}} \cdot \omega_n \quad (3.27)$$

substituindo (3.24) e (3.25) em (3.27), tem-se:

$$C = \pi \cdot \eta_{\text{mg}} \cdot M_{\text{col.}} \cdot f_n \quad (3.28)$$

substituindo na equação (3.18) as equações (3.20) e (3.28)

tem-se:

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{[4\pi^2 f_n^2 (M_{ad.} + 1/2 M_{col.})] + j[\omega(\pi \eta_{mg} M_{col.} f_n)]}{[4\pi^2 f_n^2 (M + 1/2 M_{col.}) - M\omega^2] + j[\pi f_n M_{col.} \eta_{mg}]} \quad (3.29)$$

calculando o módulo ao quadrado da equação (3.29), tem-se:

$$\left[\frac{\|X_1\|}{\|X_0\|} \right]^2 = \frac{4 f_n^4 (M_{ad.} + 1/2 M_{col.})^2 + (f_n^2 f^2 M_{col.}^2 \eta_{mg}^2)}{4(M_{ad.} + 1/2 M_{col.})^2 (f_n^4 - 2f_n^2 f^2 + f^4) + (f_n^2 f^2 M_{col.}^2 \eta_{mg}^2)} \quad (3.30)$$

considerando que a frequência de máxima resposta observada experimentalmente ficou entre 160 e 200 HZ, foi considerado um valor médio de 180 HZ, o qual é utilizado nos cálculos da razão entre a resposta da massa pela resposta da coluna em função da frequência

Este modelo apresenta resultados bastante próximos dos experimentais, conforme pode ser visto pelas figuras (3.14) a (3.18). Cada figura representa uma determinada condição de teste, já que valores de massa adicionada, altura da coluna e amplitude de oscilação da base eram variados.

O amortecimento interno de uma coluna de areia seca varia de 0,02 a 0,1, dependendo da deformação causada pela amplitude de vibração [09].

Observa-se, novamente, que uma boa concordância é alcançada quando o fator de perda interno é da ordem de 1,0. A concordância na frequência era esperada porque na equação (3.30) foram usados os valores de frequência natural medidos.

3.5 Conclusões

O modelo matemático que melhor representa o comportamento dinâmico da coluna de areia é o que assume um sistema de um grau de liberdade.

Conclui-se destes resultados que os efeitos resultantes da propagação de ondas longitudinais através da coluna não são suficientes para produzirem o surgimento sucessivo de ressonâncias do sistema, conforme esperado de um isolador representado por um meio contínuo.

Valores de rigidez de colunas de material granular obtidos permitem uma estimativa da predição de ressonâncias de montagens de máquinas e equipamentos.

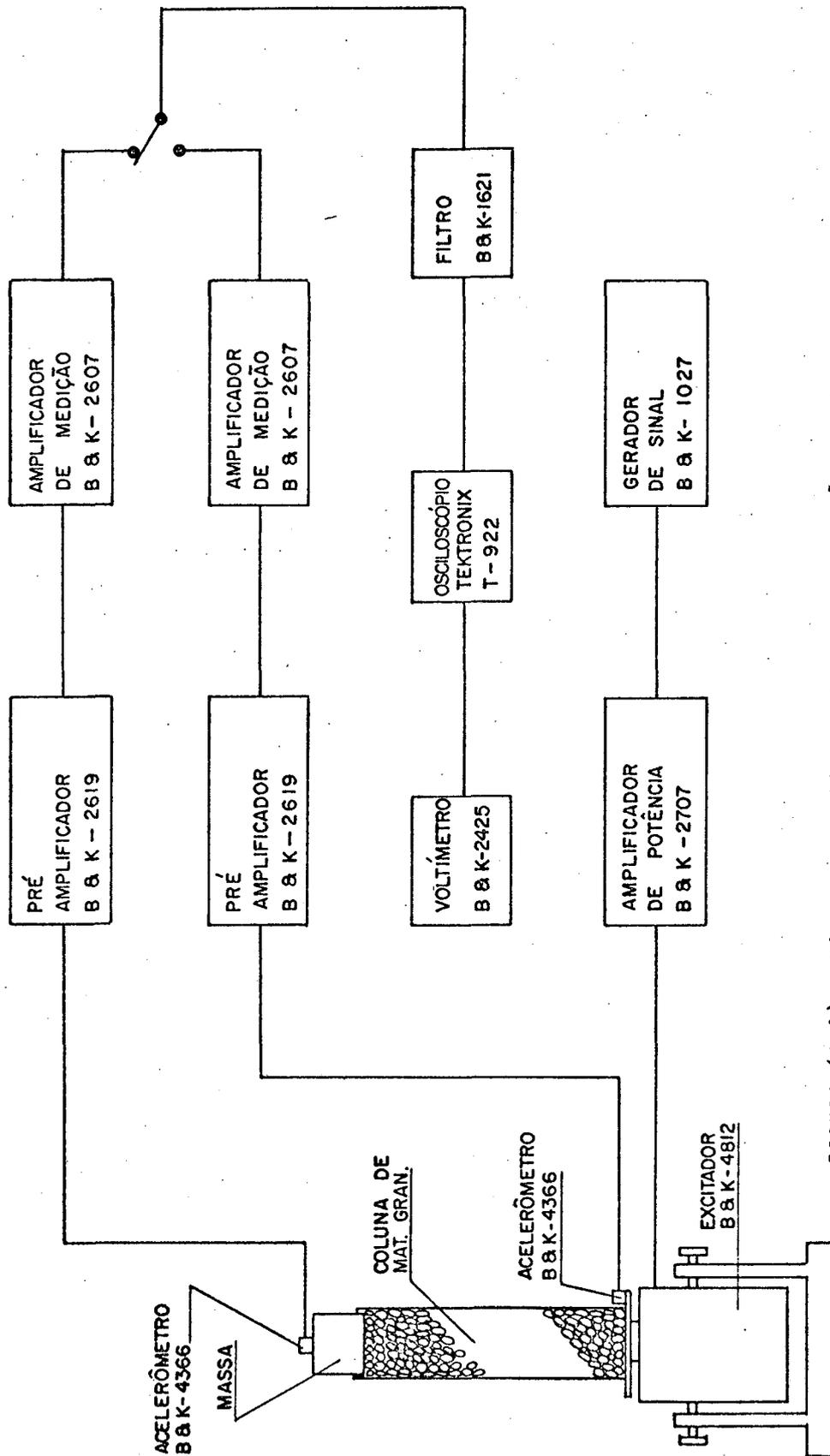


FIGURA (3.1) - Diagrama de blocos da instrumentação usada no experimento da excitação harmônica

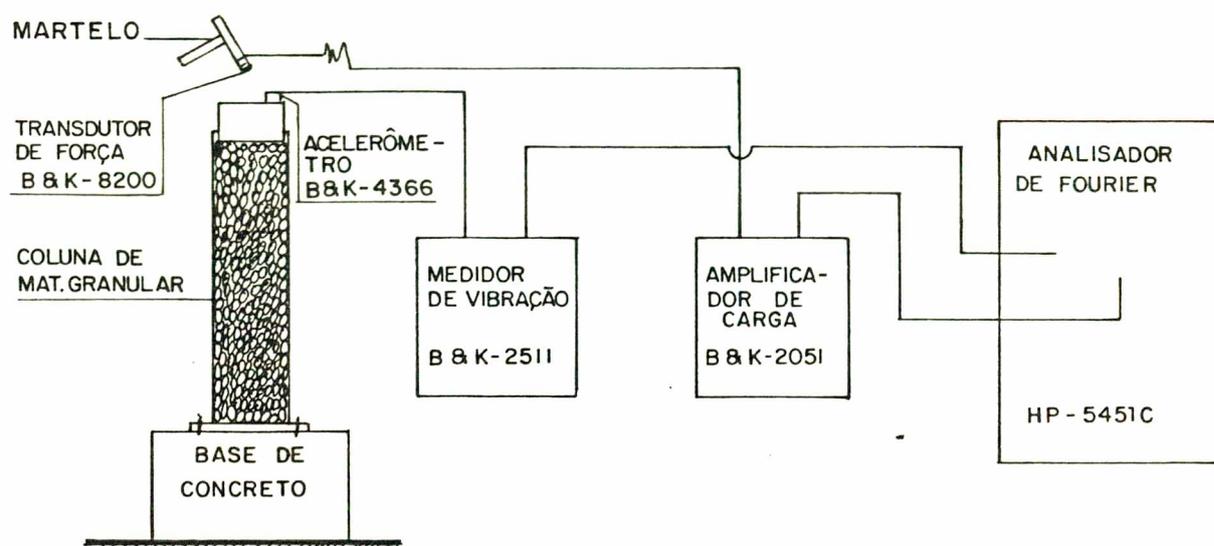


FIGURA (3.2) - Diagrama de blocos da instrumentação usada no ensaio com excitação por impacto

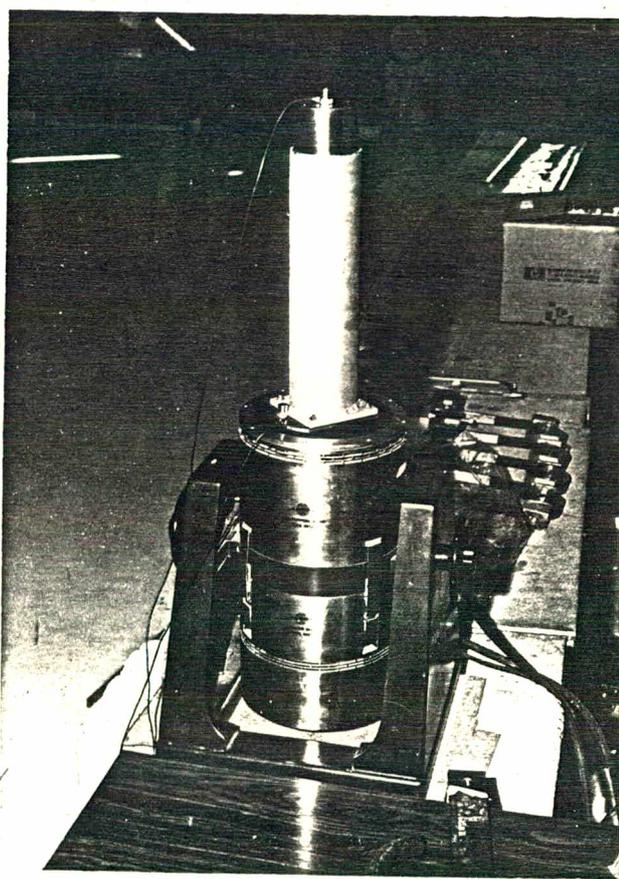


FIGURA (3.3) - Montagem da coluna de material granular sobre o excitador, com os respectivos acelerômetros instalados na base e na massa adicionada

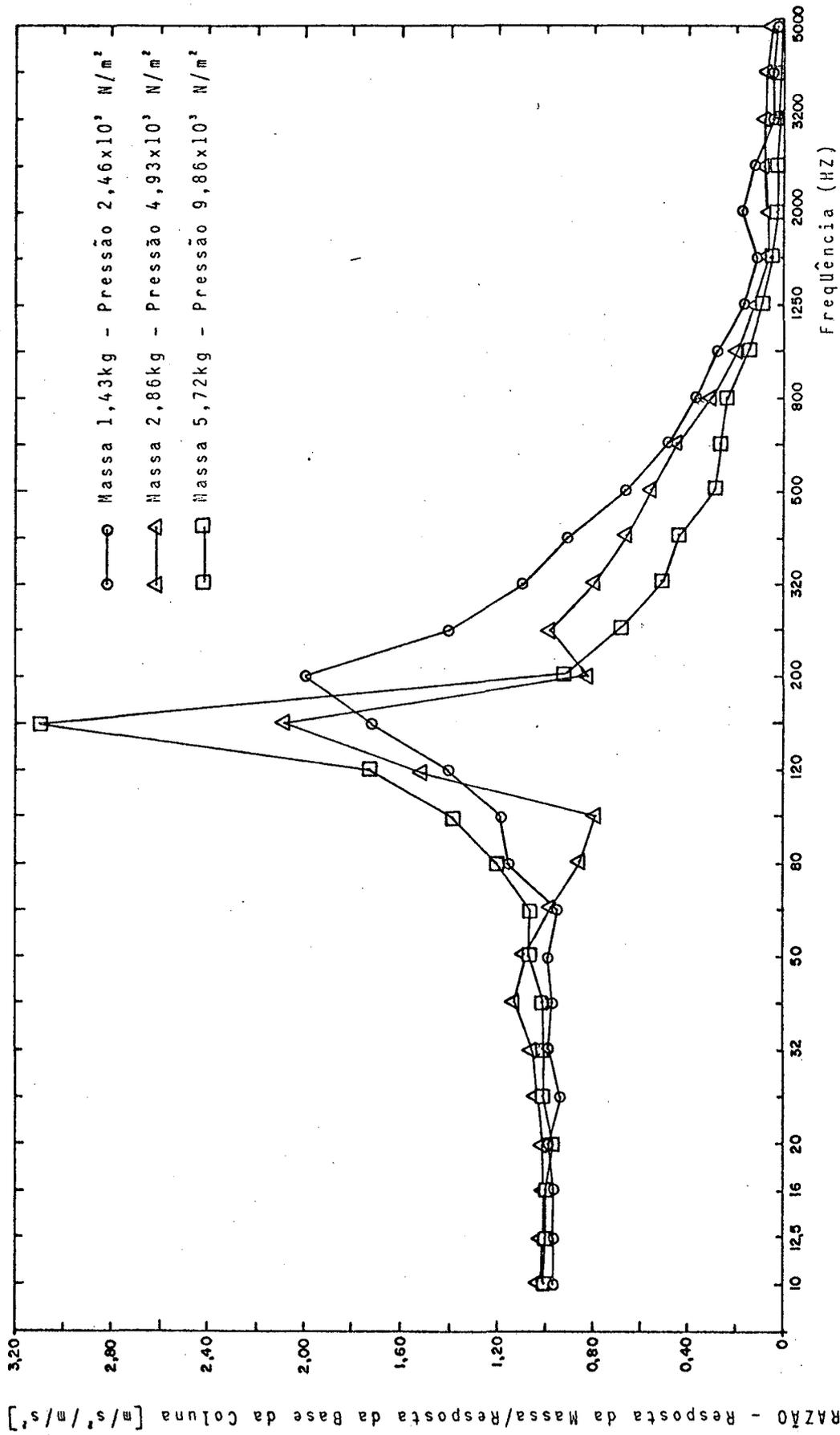


FIGURA (3.4) - Curvas comparativas dos efeitos da massa apoiada sobre uma coluna de material granular, areia selecionada: grãos de 0,6 a 1,2mm, altura da coluna de areia: 300mm, diâmetro da coluna: 86mm, amplitude de vibração na base: $1,75m/s^2$.

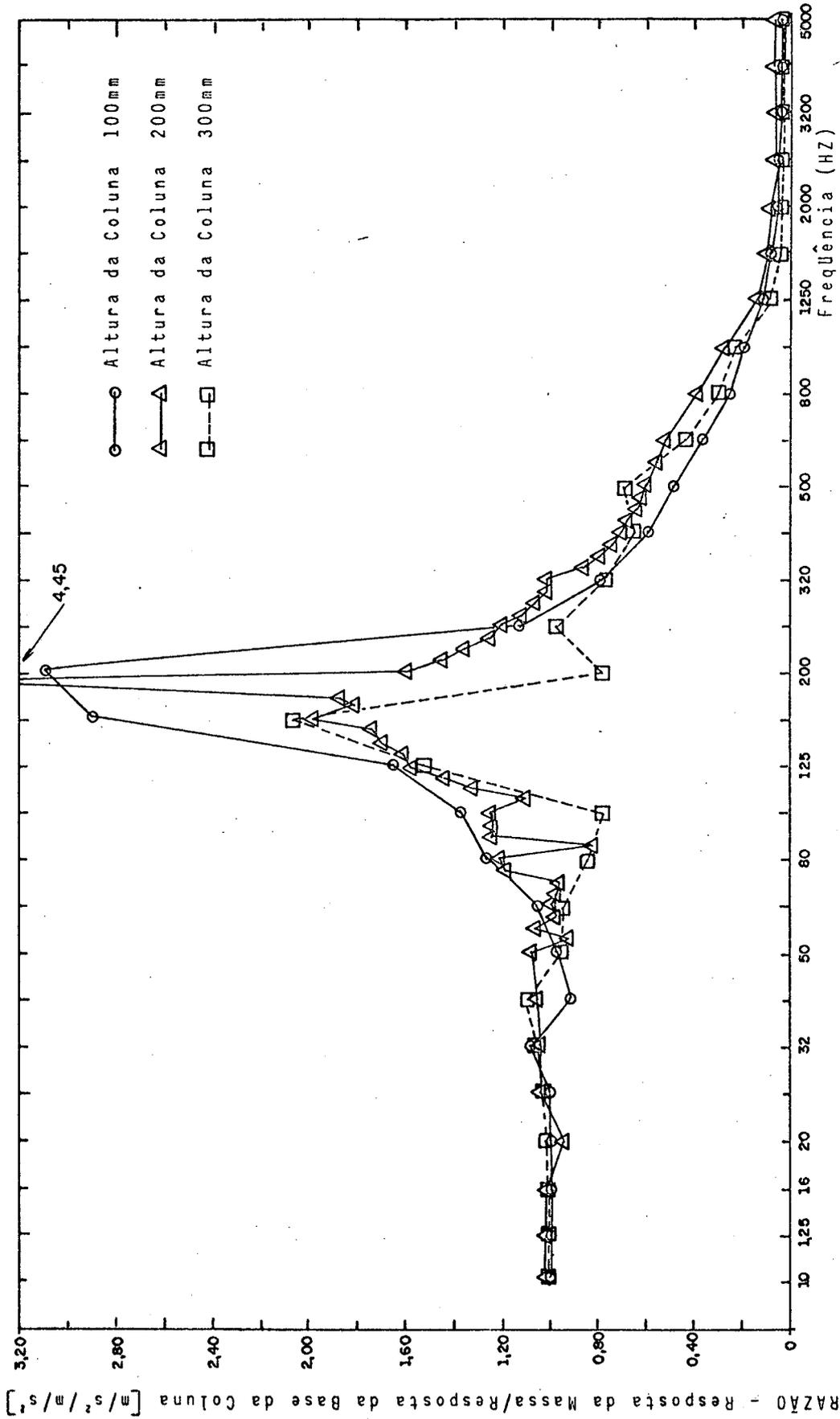


FIGURA (3.5) - Curvas comparativas dos efeitos da altura da coluna de material granular, usando a massa de 2,86kg (pressão $4,93 \times 10^3 \text{ N/m}^2$), areia selecionada: grãos de 0,6 a 1,2mm, amplitude de vibração na base: $1,75 \text{ m/s}^2$, diâmetro da coluna: 80mm

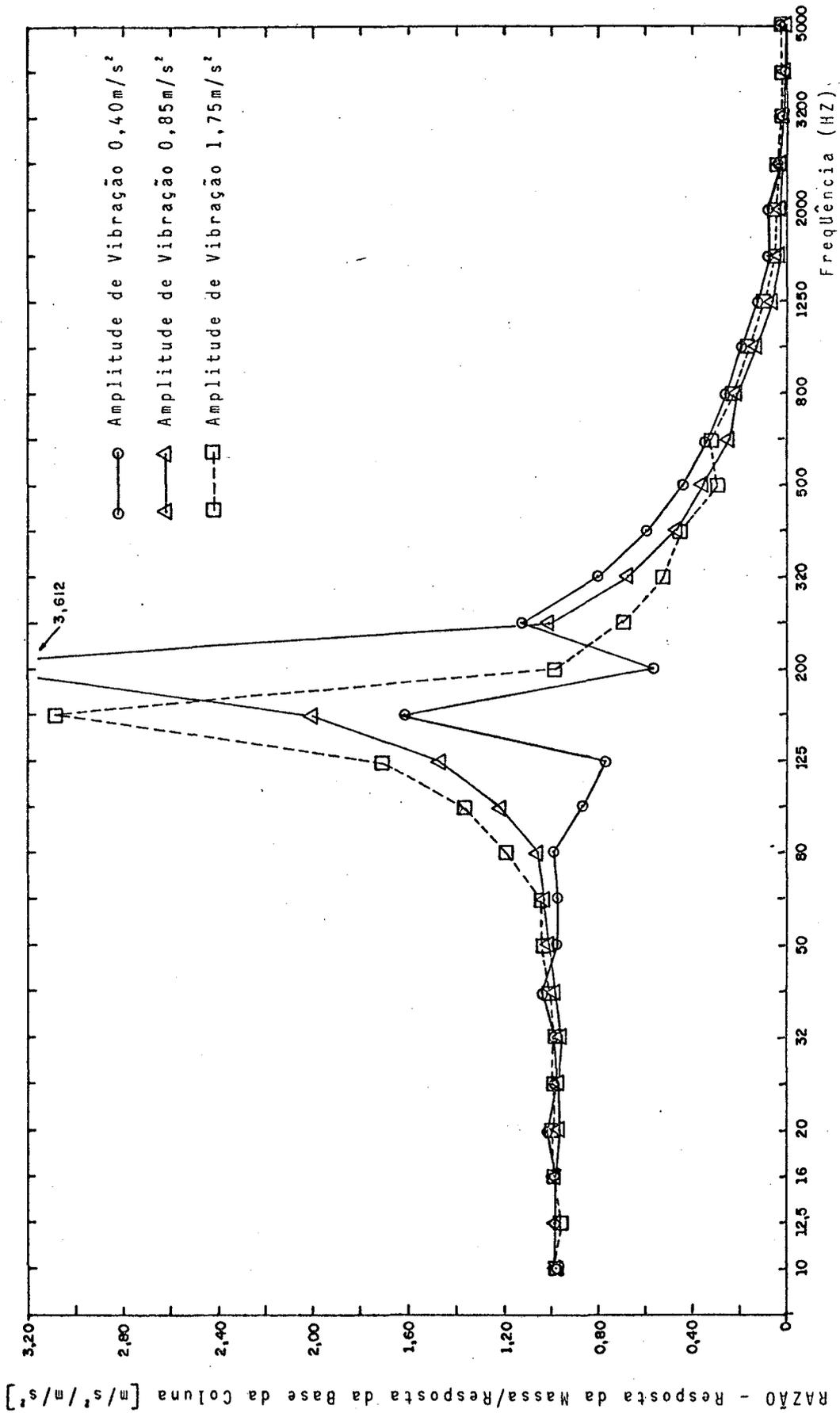


FIGURA (3.6) - Curvas comparativas da relação de amplitudes de vibração usando a massa de 5,72kg (pressão $9,86 \times 10^3 \text{ H/m}^2$), areia selecionada: graos de 0,6 a 1,2mm, altura da coluna de areia: 300mm, diâmetro da coluna: 86mm

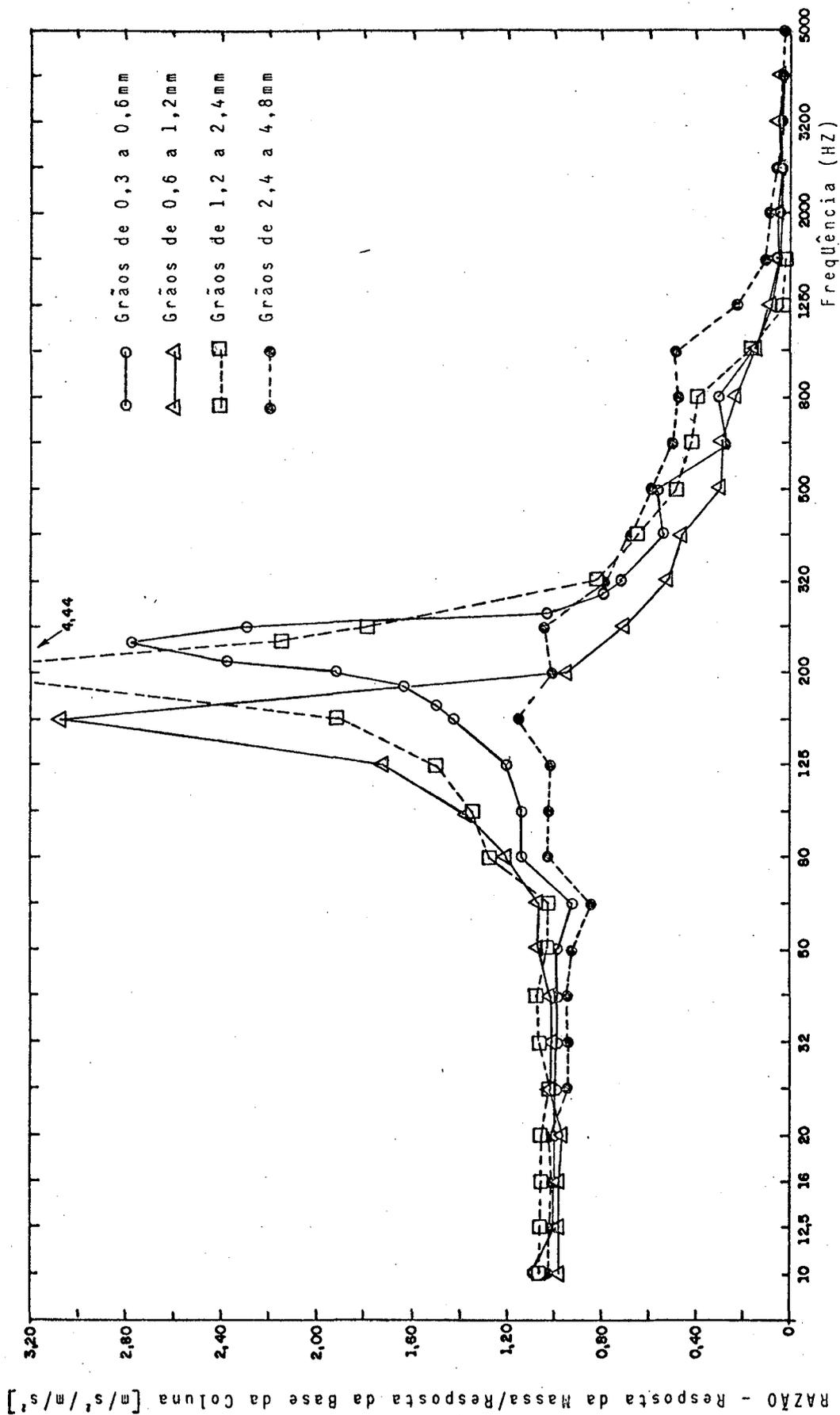


FIGURA (3.7) - Curvas comparativas dos efeitos do tamanho do grão da coluna de material granular, usando massa de 5,72kg (pressão de $9,86 \times 10^3 \text{ N/m}^2$), altura da coluna 300mm, diâmetro da coluna 86mm, amplitude de vibração na base $1,75m/s^2$

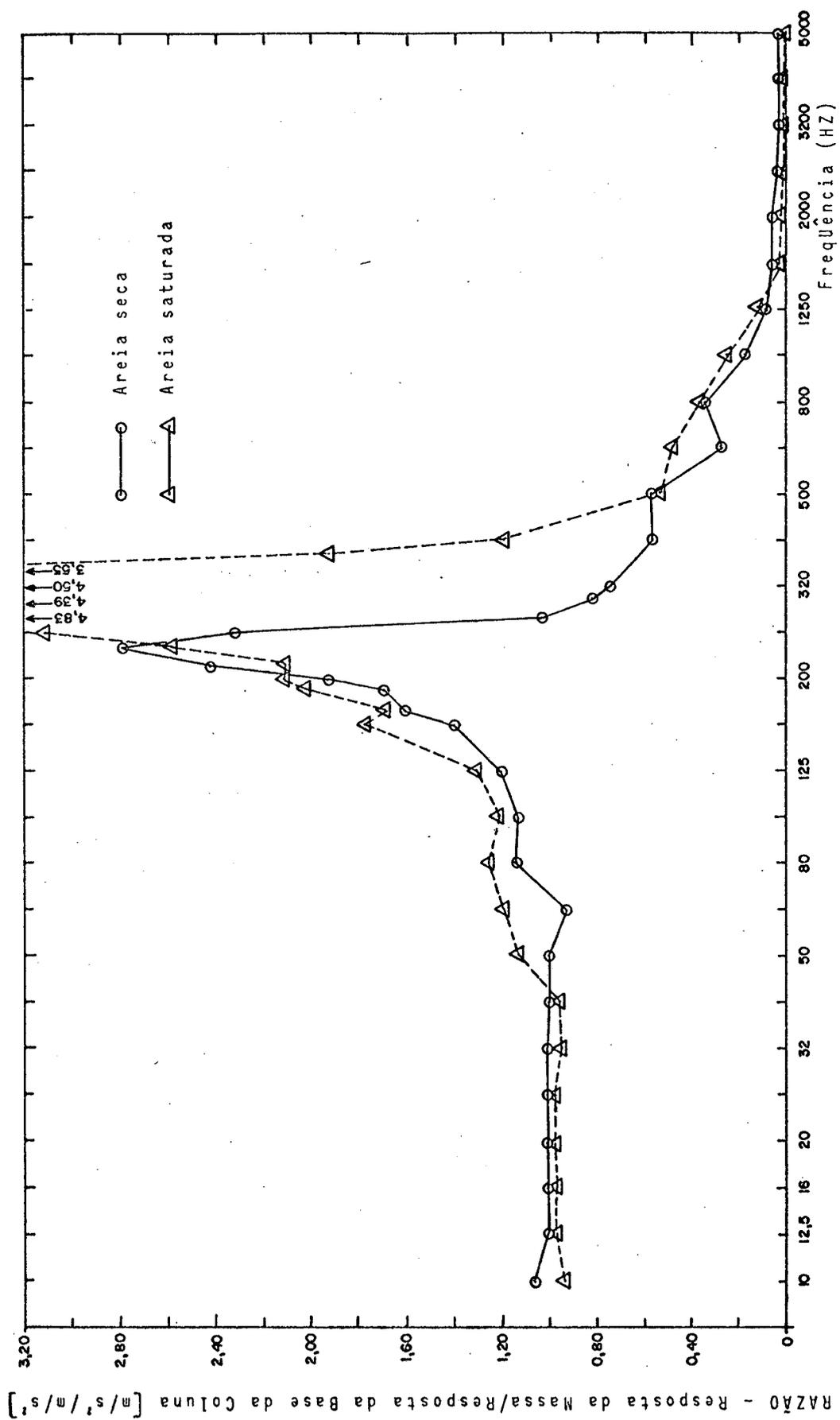


FIGURA (3.8) - Curva comparativa do efeito do fluido do fluido no material granular, usando areia com grãos de 0,3 a 0,6mm, massa de 5,72kg (pressão de $9,86 \times 10^3 \text{ N/m}^2$), altura da coluna de areia: 300mm, diâmetro da coluna: 86mm, amplitude de vibração na base: $1,75m/s^2$

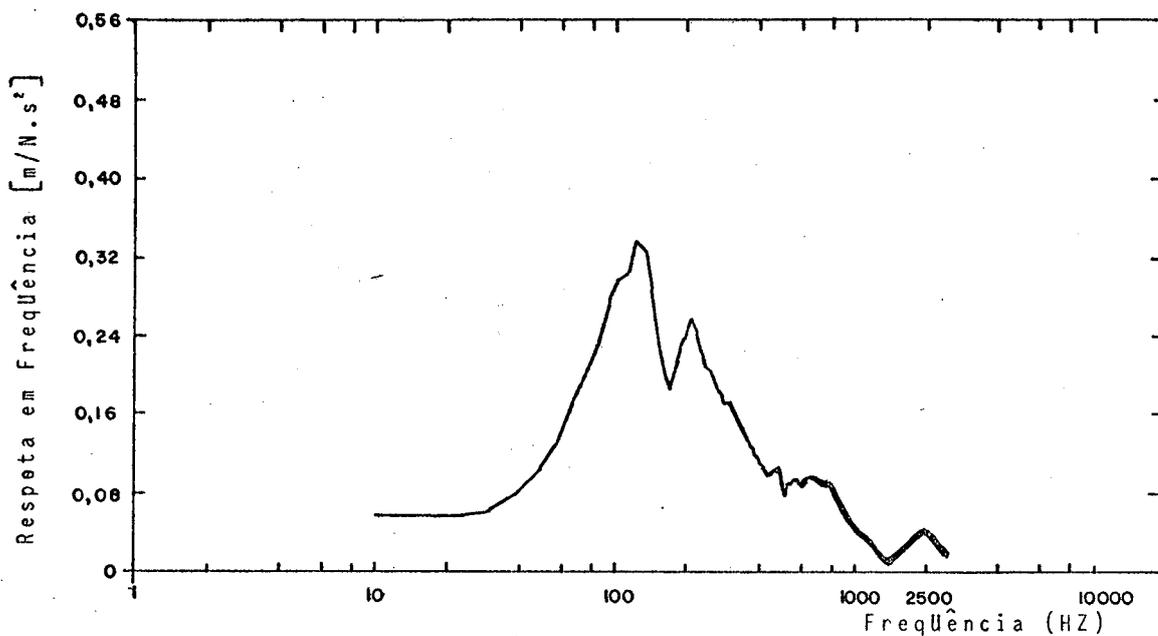


FIGURA (3.9) - Curva de resposta em frequência (aceleração/força) por excitação tipo impacto, coluna com diâmetro 86mm, areia seca grãos de 0,3 a 0,6mm, altura da coluna 300mm, massa concentrada sob a coluna 5,72kg, média em 50 ensaios.

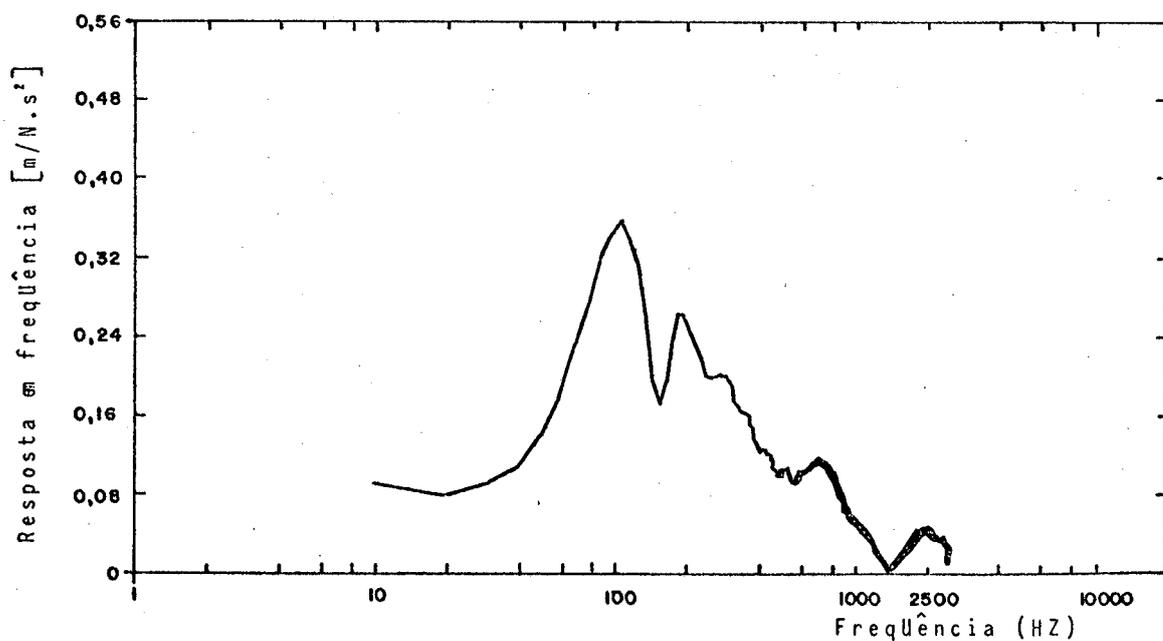


FIGURA (3.10) - Curva de resposta em frequência (aceleração/força) por excitação tipo impacto, coluna de diâmetro 86mm, areia seca grãos de 2,4 a 4,8mm, altura da coluna 300mm, massa concentrada sob a coluna 5,72kg, média em 50 ensaios.

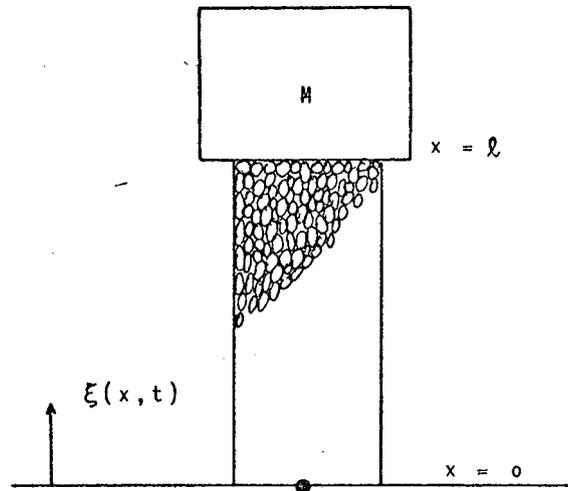


FIGURA (3.11) - Sistema assumindo a propagação de ondas longitudinais na coluna de material granular

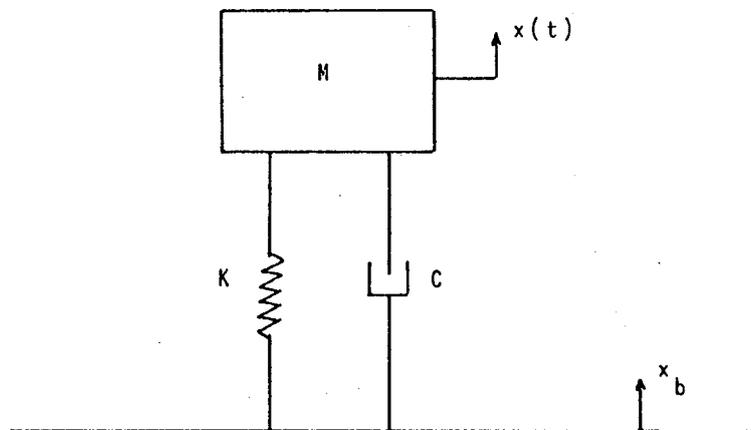


FIGURA (3.12) - Sistema de um grau de liberdade

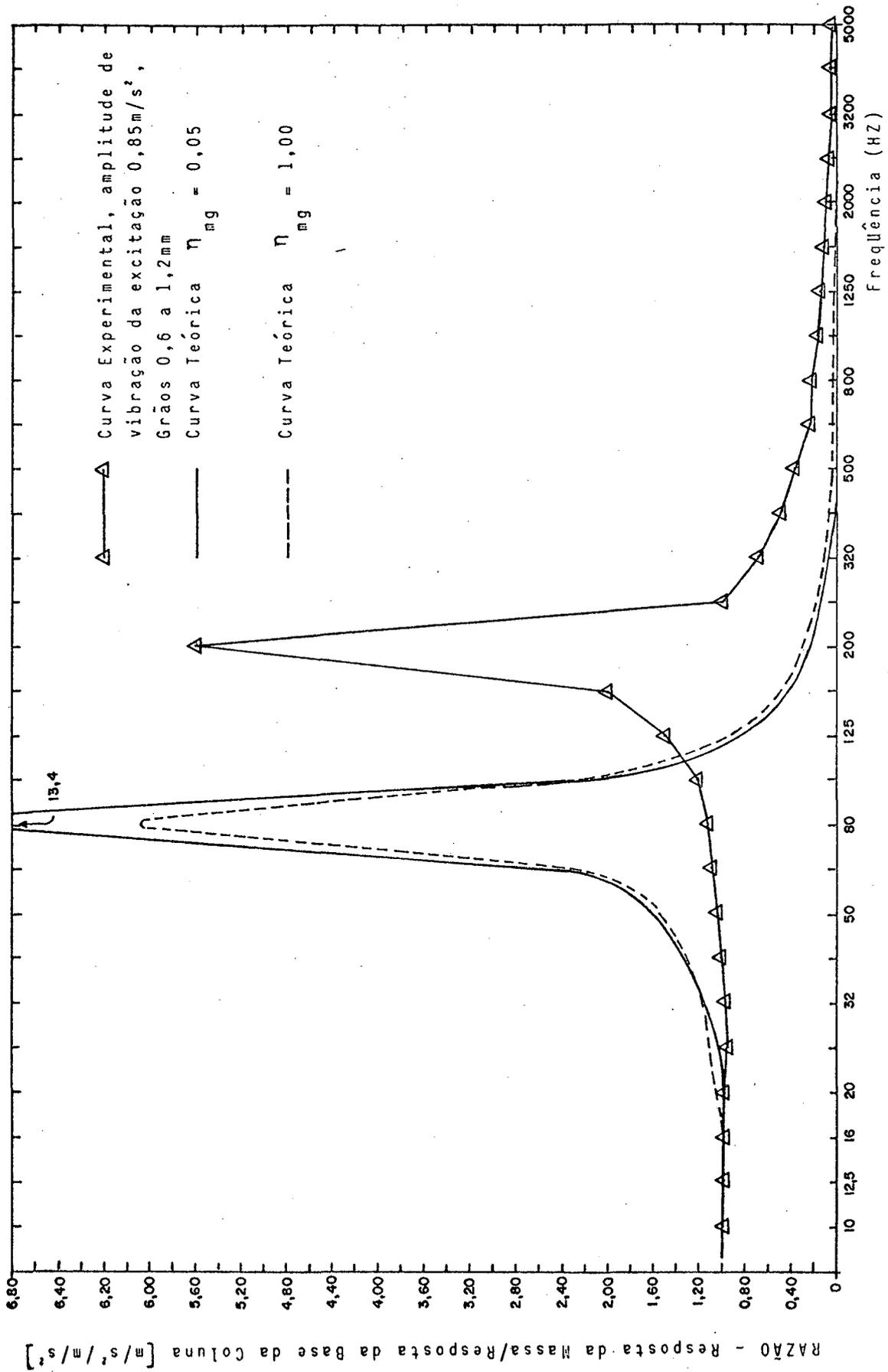


FIGURA (3.13) - MODELO 1 - Comparação entre resultados teóricos e experimentais para uma coluna de material granular com as seguintes características: altura 300mm, diâmetro 36mm, massa adicionada no topo 5,72kg.

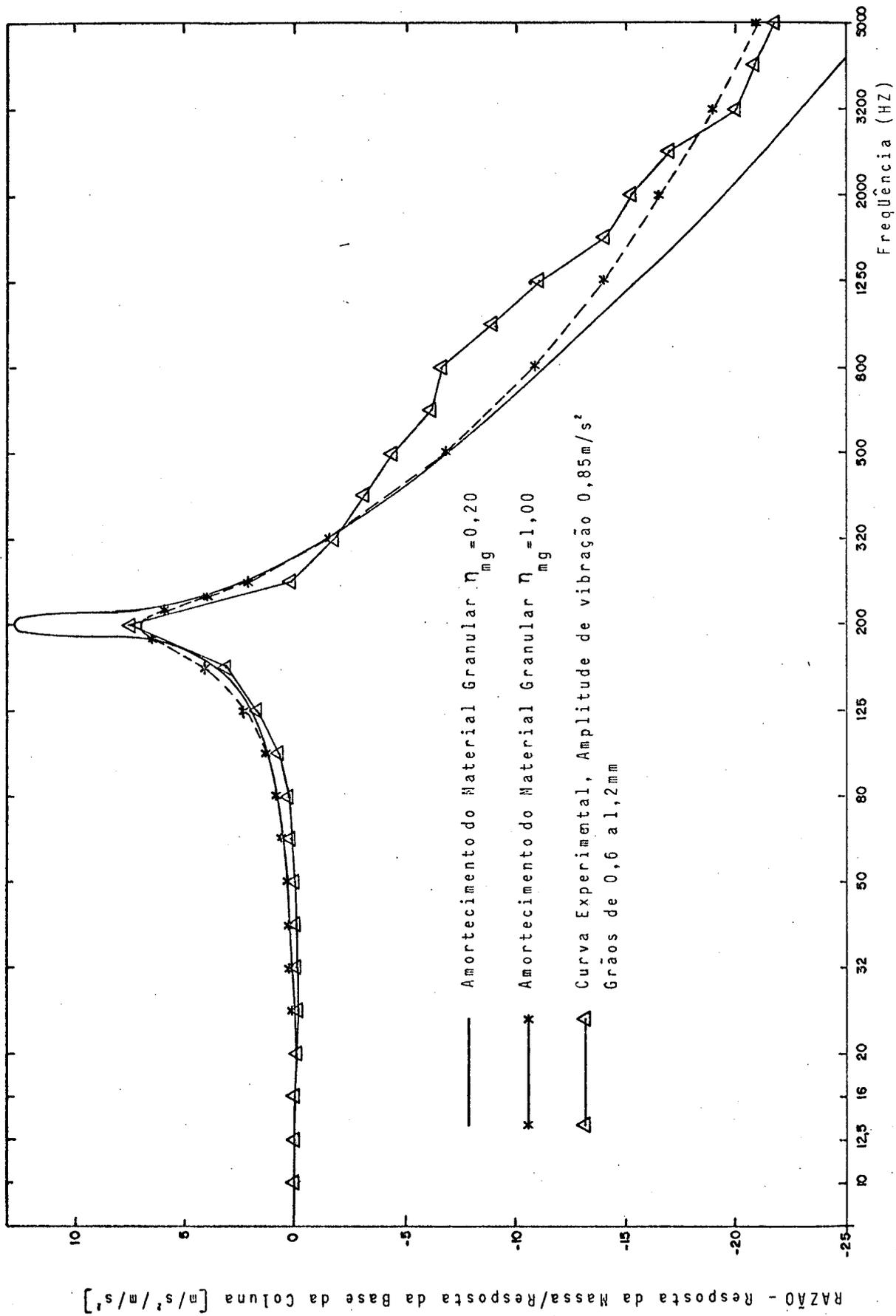


FIGURA (3.14) - MODELO 2 - Comparação entre resultados teóricos e experimentais para uma coluna de material granular com as seguintes características: altura 300mm, diâmetro 86mm, massa adicionada no topo

5,72kg.

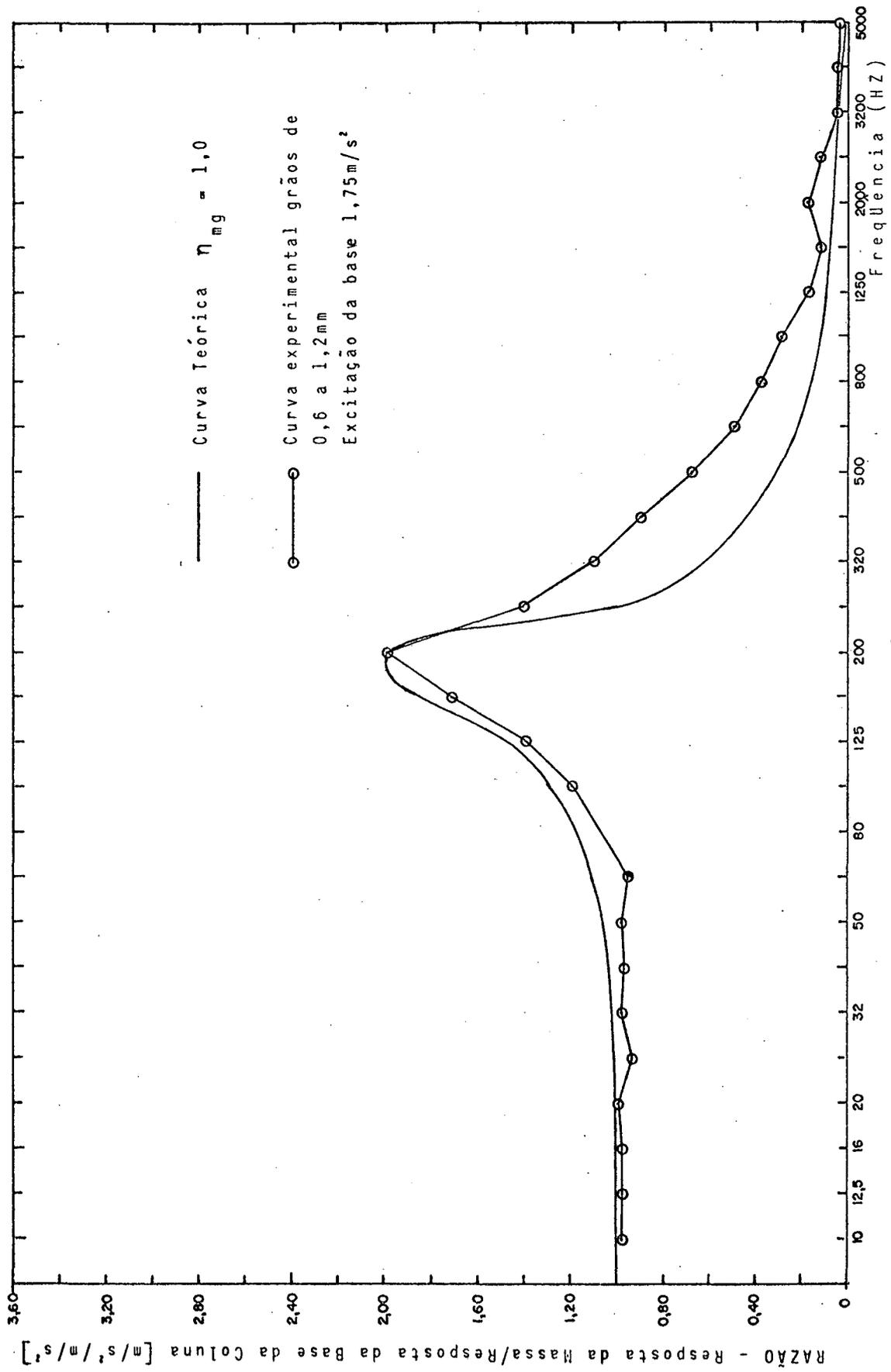


FIGURA (3.15) - MODELO 2 - Comparação entre o modelo matemático da coluna comportando-se como um sistema de um grau de liberdade e valores experimentais para a coluna com as seguintes características: altura 300mm, massa adicionada 1,43kg.

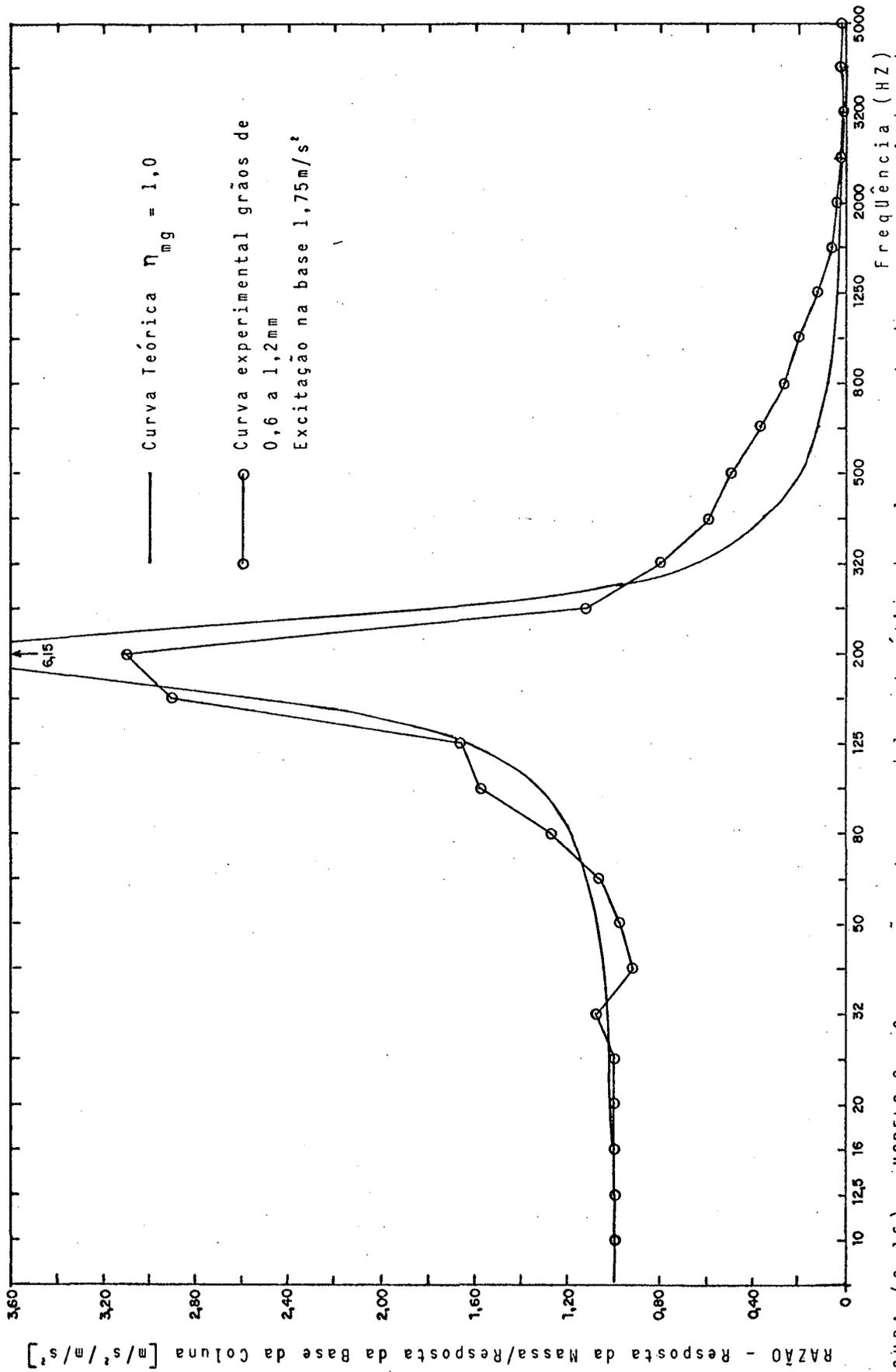


FIGURA (3.16) - MODELO 2 - Comparação entre o modelo matemático da coluna co, pertando-se com um sistema de um grau de liberdade e valores experimentais para a coluna com as seguintes características: altura 100mm, massa adicionada 2,86kg.

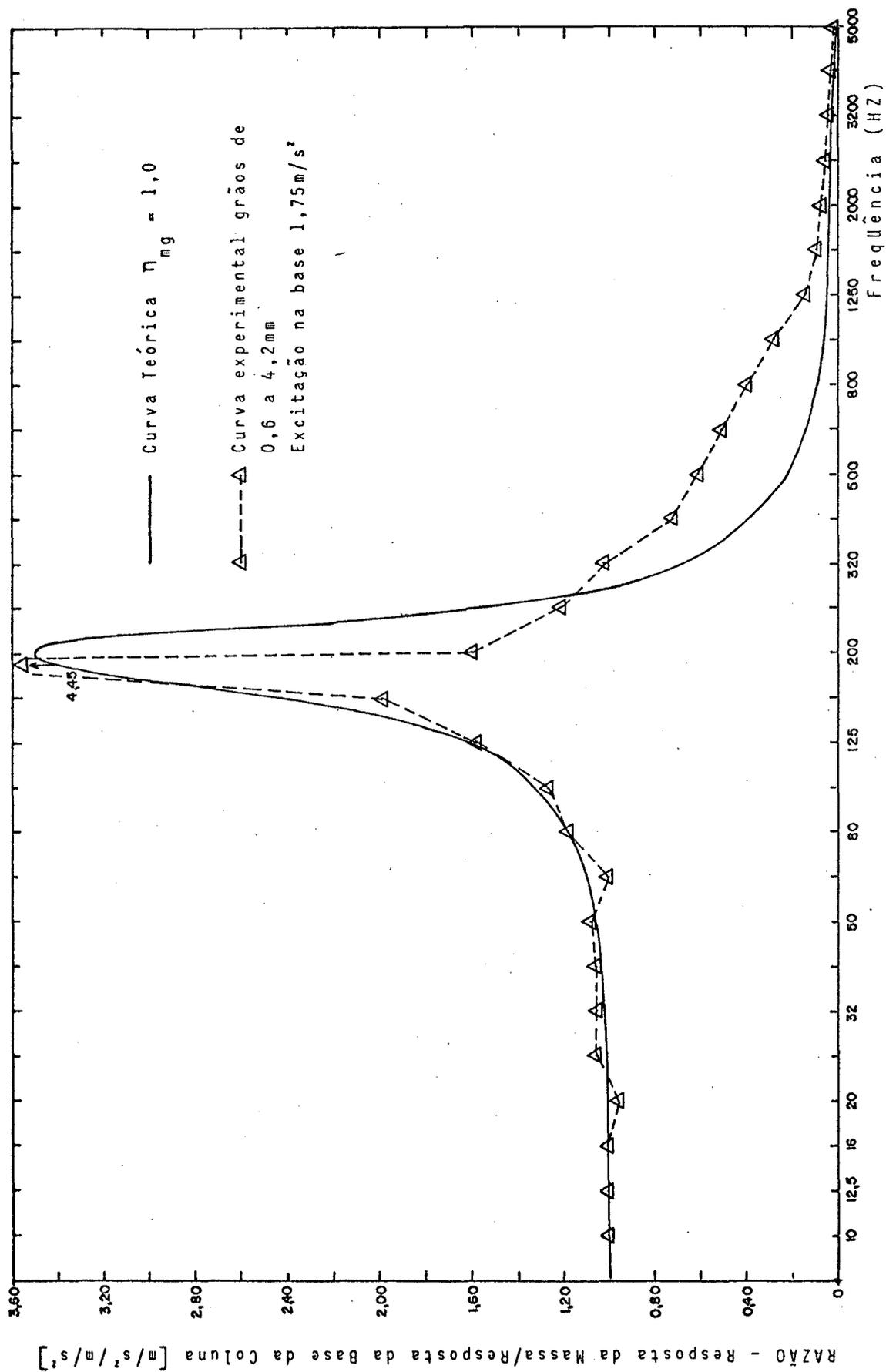


FIGURA (3.17) - MODELO 2 - Comparação entre o modelo matemático da coluna comportando-se como um sistema de um grau de liberdade e valores experimentais para a coluna com as seguintes características: altura 200mm, massa adicionada 2,86kg.

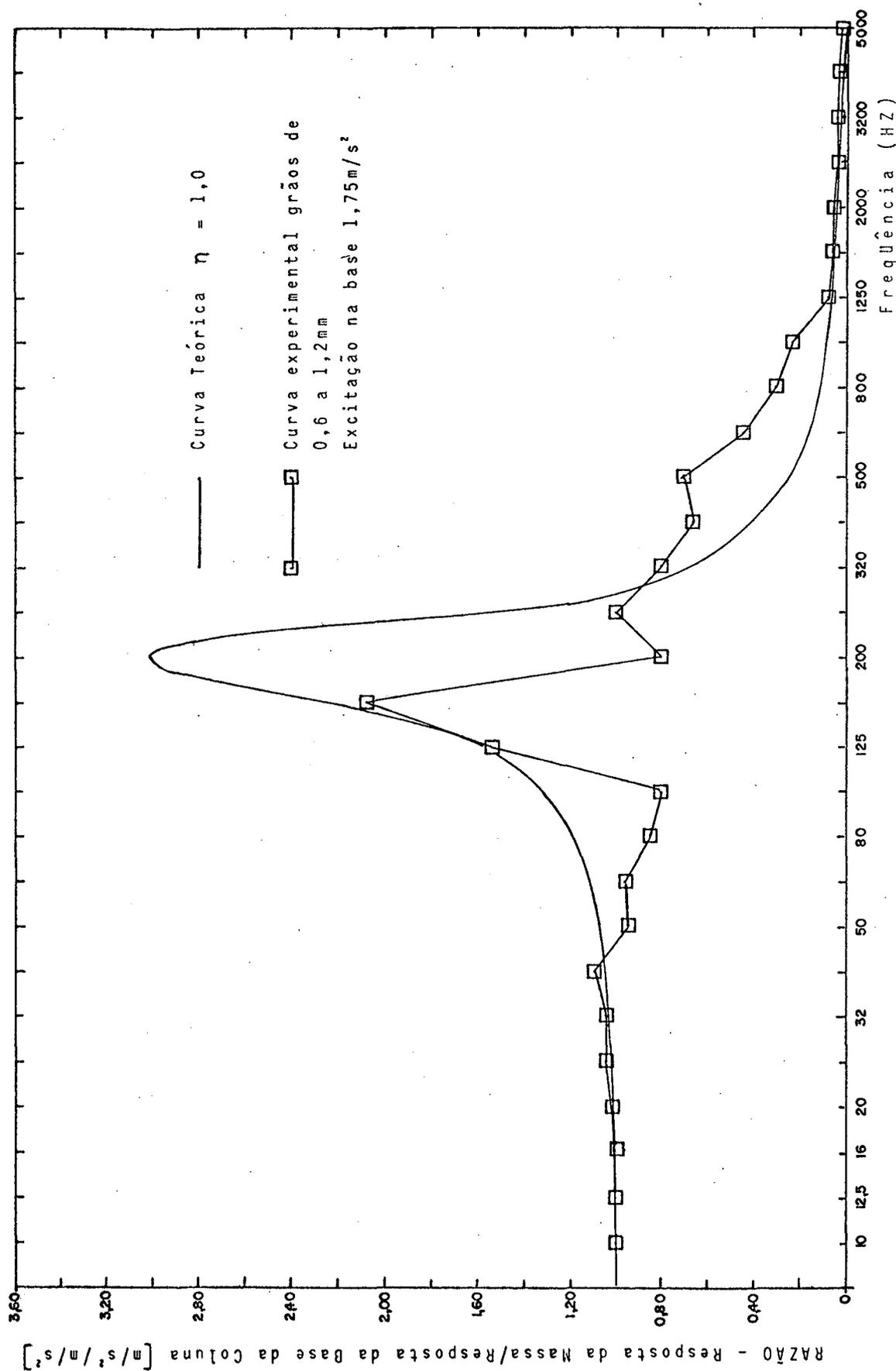


FIGURA (3.18) - MODELO 2 - Comparação entre o modelo matemático da coluna comportando-se como um sistema de um grau de liberdade e valores experimentais para a coluna com as seguintes características: altura 300mm, massa adicionada 2,86kg.

C A P Í T U L O 4

COMPARAÇÃO COM OUTROS MECANISMOS DE AMORTECIMENTO

4.1 Introdução

Através dos resultados apresentados nos capítulos anteriores, nota-se um alto fator de perda resultante da adição de material granular às vigas ocas. Este mecanismo possibilita ainda o ajuste da região de máximo amortecimento para qualquer frequência de interesse, bastando para tal selecionar adequadamente, as dimensões internas da cavidade do componente de estrutura. Outras características importantes deste mecanismo de amortecimento dizem respeito à resistência à temperatura, além do seu baixo custo e facilidade de aplicação.

Este capítulo objetiva sua comparação com outros mecanismos de amortecimento, visando a determinar o potencial de cada mecanismo. Vários são os mecanismos normalmente encontrados em estruturas de máquinas em geral.

O atrito seco é talvez o mais comum, porém sua eficiência limita-se a juntas que permitem grandes deslocamentos relativos de suas superfícies em contato. Isto ocorre nas baixas frequências apenas.

O atrito viscoso em juntas devido à presença de óleos lubrificantes e de impurezas também contribuem para a dissipação de energia, porém sua área de atuação limita-se a áreas de contato (juntas) que normalmente são pequenas.

O amortecimento de material, que em certos casos, dependendo dos teores de liga, produzem fatores de perda da ordem de 0,01 não é significativo porque na prática estruturas montadas já tem, no total, fatores de perda nesta ordem, não sendo, portanto, vantajoso aumentar o fator de perda da estrutura pelo aumento da dissipação do material, que pode ser muito difícil e caro.

O uso de neutralizadores dinâmicos é outro meio de aumen-

tar o amortecimento de forma eficiente, porém restringe-se a uma faixa muito estreita de frequência.

Tendo em vista as razões acima citadas, a construção sanduíche com uso de materiais viscoelásticos e o bombeamento de ar, foram os métodos selecionados para efeito de comparação dos resultados.

Estes métodos propiciam uma maior dissipação da energia vibratória do que aquela obtida por amortecimento no material das estruturas. Este efeito se encontra entre outros, no caso das construções com várias camadas, que têm entre suas partes individuais camadas de ar ou líquidos inclusos. Aparentemente o atrito viscoso é o responsável pelas perdas que vão ocorrendo.

MOSER [01] apresenta um estudo sobre a influência da viscosidade de um gás ou fluido aprisionado entre duas superfícies. Sua análise consistiu na determinação dos números de onda do sistema, sendo o fator de perda obtido através da razão entre as partes imaginária e real da constante de propagação.

FOX & WHITTON [02], estudaram o amortecimento da vibração estrutural, através de um filme fino de gás e conduziram estudos teóricos e experimentais sobre o processo pelo qual tal camada de gás enclausurada entre superfícies de estrutura pode contribuir de forma significativa para o amortecimento. Os efeitos da compressibilidade do gás, da condutividade térmica e da inércia foram considerados, além da variação do amortecimento com a pressão do gás e com a espessura da camada.

As construções com camadas de material viscoelástico agregadas a chapas ou estruturas de máquinas, em particular, são de grande importância para aplicações práticas de controle de ruído. Uma configuração típica consiste em uma chapa de base, normalmente metálica, na qual é colada uma ou mais camadas de material viscoelástico de amortecimento. Caso sobre estas for, ainda, adicionada uma chapa metálica, amortecimentos ainda maiores podem ser ob

tidos.

O sistema essencialmente resulta em uma divisão do trabalho onde as chapas de metal contribuem com a necessária rigidez e o material de amortecimento produz a desejável dissipação.

UNGAR [03], desenvolveu expressões para predição do fator de perda de estruturas compostas em termos das propriedades dos materiais constituintes, especialmente aplicáveis a compostos comumente usados, incorporados internamente à estrutura ou simplesmente agregados à superfície.

A predição do amortecimento de estruturas complexas podem ser conduzidas satisfatoriamente através da abordagem sugerida por "UNGAR". Tal abordagem é também discutida por CREMER & HECKL [04]. KERVIN [05], entretanto, aborda o problema através da análise das constantes de propagação das ondas de flexão em placas ou barras (estruturas simples).

A predição do amortecimento referente a este mecanismo segue a análise conduzida por "UNGAR" a qual será apresentada neste Capítulo.

4.2 Amortecimento por Uso de Material Viscoelástico

Um número considerável de materiais viscoelásticos tem sido desenvolvido para uso em amortecimento estrutural, em forma de camadas livres ou compelidas.

Os materiais são disponíveis no mercado em placas ou lençóis para aplicação por colagem ou vulcanização no metal. Os adesivos são disponíveis em forma líquida ou pastosa, sendo aplicados através de espátula ou spray.

É essencial que tais materiais estejam perfeitamente aderidos à estrutura de base para que não haja deslocamentos relativos e para que resista às grandes tensões que ocorrem.

Este tratamento, por construção sanduíche, tem sido usa

do efetivamente na indústria aeronáutica e em estruturas onde o peso, a deformação e a resistência à fadiga são importantes. São também usados em painéis para blindagem de equipamentos eletrônicos e montagem de bases para equipamentos.

Nesta seção será analisada a resposta de uma barra quadrada (50 x 50 x 3mm de espessura), com uma camada de material viscoelástico agregada em sanduíche, entre uma das faces da barra e uma chapa de metal com 3mm de espessura.

A barra, com as mesmas dimensões da estudada no capítulo 2, objetiva a comparação dos resultados com os obtidos no estudo do material granular.

4.2.1 Escolha de Materiais Apropriados

A escolha dos materiais viscoelásticos para amortecimento estão relacionados com o tipo de construção e com a eficiência no uso do material. Para construções em sanduíche muitas propriedades devem ser consideradas. O módulo de cisalhamento dinâmico é o mais importante porque a ação de amortecimento é basicamente cisalhamento. Um elastômero típico tem um módulo de rigidez ao cisalhamento na faixa de $6,9 \times 10^5$ a $6,9 \times 10^8$ N/m², ou até mesmo mais alto para algumas aplicações especiais.

As propriedades dos materiais são relativamente estáveis em relação à frequência, porém, sensíveis em relação à temperatura. É interessante que se tenha tanto quanto possível, a mais larga faixa de temperatura, particularmente para aplicações militares e industriais. A decisão final na escolha dependerá, além de outros fatores, de envolvimentos ambientais, tais como resistência à umidade, ao salitre, aos vapores de óleo e aos solventes. Algumas flexibilidades de projeto são possíveis pela variação da rigidez do polímero básico do material.

A escolha do material de amortecimento para aplicações

simples, é mais limitada do que para camadas do material em san
duiche, porém seguem as regras básicas similares. Desde que a energi
gia seja dissipada por tensões de tração e de compressão, os compo
ponentes da elasticidade dinâmica tornam-se importantes.

Quando a camada de material de amortecimento, simplesmente aplica
da, necessitar controlar efetivamente a resposta da estrutura
composta, será necessário que este material seja bem rígido e extr
emamente bem amortecido. Um material macio, ainda que extremame
nte amortecedor, poderá não atuar como um efetivo tratamento de
amortecimento se ele não estiver "compelido".

Para os experimentos descritos neste trabalho, face a difi
culdade de aquisição de materiais especiais para amortecimento
no mercado nacional, foram selecionadas seis amostras de materi
ais viscoelásticos distintos, comumente empregados na indústri
a. Estes materiais são, segundo informação dos fabricantes, resi
stentes a agentes químicos, à compressão, ao desgaste, à corrosi
ão, a óleos, graxas, ácidos diluídos e às intempéries.

AMOSTRA NÚMERO	CLASSIFICAÇÃO ASTM - D 2000	POLÍMERO BÁSICO	DUREZA ENSAIADA (SHORE A)	PESO ESPE- CÍFICO (kg/m ³)	ESPESSURA USADA (mm)
1	2BG 708 A14 B14 E14 E34	NITRILA	65	1.500	3
2	2BC 515 A14 B14 E14 E34 G21	NEOPRENE	50	1.370	5
3	4BC 705 A14 B14 E14 E34 G21	NEOPRENE	82	1.800	3
4	2AA 625 A13 B13 L14	ESTIRENO- BUTADIENO	71	1.120	3,5
5	B86 715 A14 B14 E14 E34 E51 E61 E15 L14	NITRILA	60	1.250	5
6	2AA 705 A13 B13 L14	ESTIRENO- BUTADIENO	71	1.520	4

QUADRO 3
MATERIAIS VISCOELÁSTICOS ENSAIADOS

Estes materiais, com características e classificação indi
dicadas no Quadro 3, foram ensaiados usando-se os critérios indí

cados na norma ASTM E 756-80 [06], com o objetivo de se conhecer suas propriedades de amortecimento por ação de um esforço de cisalhamento.

Estas propriedades são o fator de perda (β) e o módulo de rigidez ao cisalhamento (G), e também suas variações na faixa de frequência usual (50-HZ e 5 KHZ), para uma temperatura ambiente, objetivando a escolha dos mais apropriados para aplicação nos ensaios a serem realizados com a barra quadrada.

4.2.2 Medição das Propriedades de Amortecimento dos Materiais

O método usado para determinação das propriedades de amortecimento das vibrações nos materiais foi desenvolvido por Dr. H.OBERST e normalizado pela ASTM E-756-80 [06], o qual consiste na medição do fator de perda (β), do módulo de elasticidade ("módulo de Young", E_2) e do módulo de rigidez ao cisalhamento (G), na faixa de frequência de 50 HZ a 5 KHZ e na faixa usual de temperatura, em torno da ambiente.

Este método é recomendado para uso em testes de materiais que tenham aplicação em controle de vibração estrutural e controle de ruídos audíveis. Dentre os materiais estão metais, esmaltes, cerâmicas, borrachas, plásticos, madeiras e outros que possam ser construídos na configuração da amostra de teste.

Os materiais que tiverem rigidez suficiente podem ser testados usando-se uma simples barra de teste, homogênea. Os que não possuem rigidez necessitam da comparação de dois resultados de testes envolvendo uma barra de metal nua (sozinha) e a barra conjugada com o material de amortecimento.

Com o material agregado em sanduíche a duas barras de metal, são obtidas as propriedades do amortecimento por esforço cisalhante, e através do estudo das várias ressonâncias da barra vibrante, são estabelecidos os efeitos da frequência nas proprie

dades de amortecimento do material.

Este método assume que todas as medições são feitas na faixa linear, ou seja, a força de excitação aplicada ao conjunto barra/material de amortecimento, apresentando comportamento linear.

As equações apresentadas para o cálculo das propriedades dos materiais de amortecimento por cisalhamento não incluem os termos de elasticidade para a camada do material de amortecimento. Esta é uma suposição aceitável, uma vez que o módulo de elasticidade do material é consideravelmente menor do que o do metal. Também estas equações são desenvolvidas usando uma variação temporal do tipo senoidal para o modo de vibração.

Para barras compostas, esta aproximação é aceitável somente nos maiores modos, e é, portanto, conveniente ignorar os resultados do primeiro modo.

Assume-se também que o fator de perda do metal é desprezável, o que é uma suposição válida, pois este fator para o aço ou alumínio, é de, no máximo, 0,001, o que é significativamente menor do que aqueles encontrados nas barras compostas.

Para a determinação das propriedades de amortecimento dos materiais escolhidos, sujeitos a deformação por cisalhamento, foi necessária a construção de amostras coladas em sanduíche entre barras de metal, veja figura (4.1). Um espaçador de metal foi colocado na raiz da secção da amostra para garantir uma fixação rígida, simulando com isto, a condição de contorno de uma barra rigidamente fixada em uma de suas extremidades.

A figura (4.2) mostra a fixação da amostra e a montagem da instrumentação usada na determinação das frequências de ressonância.

Na construção das amostras um cuidado especial foi tomado na colagem do material viscoelástico às barras, objetivando obter-se uma camada mais fina e homogênea para possibilitar a perer

feita aderência e minimização dos efeitos do adesivo nas medições.

Foram executadas as medições para determinação das frequências de ressonância da barra nua (sem material de amortecimento), e das barras com o material de amortecimento agregado em sanduiche, veja, como exemplo as curvas de resposta em frequência nas figuras (4.3) e (4.4) respectivamente para a barra sem amortecimento e para a barra conjugada com o material da amostra 6.

O método utilizado foi o da determinação da impedância da extremidade livre da amostra. Para tal, uma força aleatória, tipo ruído branco, foi utilizada para excitar vibrações na amostra e a impedância foi, então, obtida com o uso do analisador de Fourier, com o qual foi realizada a medição de forma automática da função de transferência.

Para uma maior precisão de leitura das frequências de ressonância foram utilizadas 300 médias e uma resolução de 2,5 Hz aproximadamente. Veja o diagrama de blocos da instrumentação utilizada na figura (4.5).

Nas frequências de ressonância foram medidos os decaimentos logarítmicos da resposta a um impacto filtrado em banda de frequência. Desta forma o decaimento foi registrado para faixas de frequência de 1/3 de oitava, centradas em torno das ressonâncias da amostra. Veja o diagrama de blocos da instrumentação utilizada na figura (4.6). E como exemplo da forma típica do decaimento da energia vibratória, utilizada na determinação do amortecimento na frequência de 1583 Hz da amostra do material 6, veja a figura (4.7).

O fator de perda foi determinado pelo método da taxa de decaimento, conforme descrito na seção 2.3.1. Para cada frequência, três leituras foram feitas e o valor médio computado.

Com os valores das frequências de ressonância da barra de OBERST (barra nua), obtem-se através da expressão (4.2) [06] o módulo de YOUNG do material da barra para cada frequência de ressonância.

$$E = \frac{12\rho l^4 f_n^4}{H^2 C_n^2} \quad (4.1)$$

Com estes valores: módulo de elasticidade de barra de OBERST, frequências de ressonância e amortecimento em cada frequência medidos na barra composta, podemos calcular através das equações (4.2) e (4.3) [06], o módulo de rigidez e o fator de perda do material viscoelástico ensaiado, em cada uma das frequências de ressonância da barra.

$$G = \frac{(A'-B') - 2(A'-B')^2 - 2(A' \eta_s)^2}{(1-2A' + 2B')^2 + 4(A' \cdot \eta_s)^2} \left[\frac{E H_2 H_3 2\pi C_n}{l^2} \right] \quad (4.2)$$

$$\beta_2 = \frac{A' \eta_s}{A' - B' - 2(A' - B')^2 - 2(A' \eta_s)^2} \quad (4.3)$$

Com estes valores obtém-se a variação do módulo de rigidez e o do amortecimento em função da frequência para a temperatura ensaiada. Podendo-se, portanto, plotar a curva dos valores obtidos versus frequência.

4.2.3 Resultados e Escolha dos Melhores Materiais

Com os resultados dos ensaios descritos no item anterior, executados para os seis materiais indicados no Quadro 3, e com o auxílio das equações (4.1), (4.2) e (4.3), foram obtidas as curvas de amortecimento versus frequência, módulo de rigidez versus frequência e produto fator de amortecimento módulo de rigidez versus frequência para todos os materiais ensaiados.

Os resultados estão mostrados nas figuras (4.8), (4.9) e

(4.10) respectivamente.

Nota-se que as amostras 1 e 6 são mais indicadas como materiais de amortecimento, e foram, portanto, as escolhidas para a aplicação nos ensaios realizados com a barra quadrada, cujos resultados encontram-se descritos no item 4.2.5 deste capítulo.

4.2.4 Predição do Fator de Perda da Barra Sanduiche

Inicialmente, será analisado um elemento de área do material viscoelástico conjugado em sanduíche com a barra e uma chapa metálica de largura igual a um dos lados da barra, conforme mostrado na figura (4.11).

Assume-se nesta análise que os efeitos de deformação por inércia rotatória são desprezáveis, bem como os efeitos de tração e compressão sobre o material viscoelástico.

Os esforços externos aplicados sobre o elemento em análise serão considerados harmônicos, e o deslocamento transversal terá, portanto, apenas componente harmônico.

Desta forma, é possível expressar a deformação axial média da estrutura n por:

$$\bar{\epsilon}_n = \frac{d\delta_n}{dx} \quad (4.4)$$

A densidade de energia de deformação longitudinal (energia por unidade de comprimento) armazenada no material viscoelástico, é dada por:

$$w_{\text{longit.}} = \frac{1}{2} K^{\perp} |\bar{\epsilon}_n|^2 \quad (4.5)$$

Similarmente, a densidade de energia de deformação por flexão (energia por unidade de comprimento) armazenada no material viscoelástico, por:

$$w_{\text{flexão } n} = \frac{1}{2} B_n \left| \frac{d\bar{\theta}}{dx} \right|^2 \quad (4.6)$$

e a densidade de energia de deformação por cisalhamento armazenada no material viscoelástico, por:

$$w_{\text{cisalha. } n} = G_n A_n \left| \bar{\gamma}_n \right|^2 \quad (4.7)$$

Como $\bar{\theta}(x)$ obedece a um movimento harmônico, pode-se escrever:

$$\bar{\theta}(x) = \bar{\theta}_0 \cdot \cos kx \quad (4.8)$$

Se os efeitos de terminação forem desprezados, $\bar{\delta}_n$ e $\bar{\gamma}_n$, serão também harmônicos, e pode-se então escrever:

$$\bar{\delta}_n = \bar{R}_n \bar{\theta} \quad , \quad \bar{\gamma}_n = \bar{P}_n \bar{\theta} \quad (4.9)$$

Integrando a expressão da densidade de energia ao longo de um comprimento de onda, $\lambda = 2\pi/k$, obtém-se o valor médio da energia armazenada. Denotando estes valores por letras maiúsculas, pode-se escrever:

$$\left[W_{\text{longitu.}} + W_{\text{flexão}} \right]_n = \frac{1}{4} k^2 [\theta_0]^2 [K_n |\bar{R}_n|^2 + B_n] \quad (4.10)$$

$$\left[W_{\text{cisalha.}} \right]_n = \frac{1}{4} [\theta_0]^2 G_n A_n [\bar{P}_n]^2$$

Aplicando a definição do fator de perda, e considerando que α_n representa o fator de perda por alongamento da n-ésima estrutura, e que β_n representa o fator de perda por cisalhamento

desta, então, o fator de perda da estrutura composta é dado por:

$$\eta = \frac{k^2 \sum \alpha_n (K_n^\perp |\bar{R}_n|^2 + B_n^\perp) + \sum \beta_n (G_n^\perp A_n |\bar{P}_n|^2)}{k^2 \sum (K_n^\perp |\bar{R}_n|^2 + B_n^\perp) + \sum (G_n^\perp A_n |\bar{P}_n|^2)}, \quad (4.11)$$

onde os somatórios são efetuados sobre todas as subestruturas.

Através da geometria de uma dada estrutura, pode-se facilmente determinar:

$$K_n^\perp = E_n^\perp A_n, \quad B_n^\perp = r_n^2 K_n^\perp \quad (4.12)$$

Onde E_n^\perp é a parte real do módulo de elasticidade da n -ésima estrutura, A_n a área da secção desta estrutura e r_n o raio de giração de A_n . Contudo as quantidades \bar{R}_n e \bar{P}_n definidas pelas equações (4.9) são determinadas através de uma análise detalhada que considera a interação das subestruturas.

Conforme considerado inicialmente, se as deformações axial e cisalhante das subestruturas 1 e 3 foram desprezadas e que $\alpha_1 = \alpha_3 = \beta_1 = \beta_3 = 0$, isto implica, pela equação (4.9), que $\bar{P}_1 = \bar{P}_3 = 0$.

Como os fatores de perda por cisalhamento e por tração de materiais viscoelásticos (β_2, α_2) são aproximadamente iguais, podemos portanto considerar $\alpha_2 \approx \beta_2$.

Desta forma a equação (4.11) será reescrita [0,3] como segue:

$$\frac{\beta_2}{\eta} = 1 + \frac{(K_1^\perp |\bar{R}_1|^2 + B_1^\perp) + (K_3^\perp |\bar{R}_3|^2 + B_3^\perp)}{K_2^\perp |\bar{R}_2|^2 + B_2^\perp + J^\perp |H_2 P_2|^2} \quad (4.13)$$

onde,

$$R_1 \Delta = J H_{31} (2 K_3 + K_2) + \frac{K_2 I}{2} (K_3 + 2J), \quad (4.14a)$$

$$R_2 \Delta = J H_{31} (K_3 - K_1) - J I (K_1 + K_3) - I K_1 K_3, \quad (4.14b)$$

$$R_3 \Delta = -J H_{31} (2K_1 + K_2) + \frac{K_2 I}{2} (K_1 + 2J), \quad (4.14c)$$

$$\Delta = 2K_1 K_3 + \frac{K_2}{2} (K_1 + K_3) + 2 J (K_1 + K_2 + K_3), \quad (4.14d)$$

lembrando que os parâmetros K_1 , K_3 , B_1 e B_3 são quantidades reais e apenas (\bar{J}) e (\bar{K}_2) são complexas.

A razão destas duas quantidades é real e pode, ainda, ser expressa na forma:

$$\frac{\bar{K}_2}{\bar{J}} = (k H_2)^2 \left(\frac{E_2}{G_2} \right) = 2 (1 + \nu) (k H_2)^2 \quad (4.15)$$

O parâmetro ν representa o coeficiente de POISSON do material viscoelástico.

A análise aqui considerada assume que $(k H_2)^2 \ll 1$, isto é, o comprimento de onda de flexão da estrutura composta seja bastante maior que a espessura (H_2) da camada de material de amortecimento.

O elemento em estudo permite ainda assumir que as estruturas 1 e 3 são consideravelmente mais rígidas que a estrutura 2, isto é $K_1 \gg |\bar{K}_2|$, $K_3 \gg |\bar{K}_2|$.

A equação (4.13) pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\frac{\beta_2}{\eta} = 1 + \frac{|\bar{X}|^2 + \Lambda |1 + C \bar{X}|^2}{X^2 + U_{\text{longitud.}} + U_{\text{flexão}}} \quad (4.16)$$

onde,

$$X^{\perp} \cong \frac{K_2^{\perp}}{2(1+\nu)(kH_2)^2} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_3} \right) \quad , \quad (4.17a)$$

$$\Lambda \cong \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_3} \right) \left(\frac{B_1 + B_3}{H_{31}^2} \right) \quad , \quad (4.17b)$$

$$U_{\text{longitud.}} \cong K_2^{\perp} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_3} \right) \left\| \bar{X} \left[\frac{K_3 - K_1}{K_3 + K_1} - \frac{I}{H_{31}} \right] - \frac{I}{H_{31}} \right\|^2 \quad , \quad (4.17c)$$

$$U_{\text{flexão}} \cong K_2^{\perp} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_3} \right) \left(\frac{r_2}{H_{31}} \right)^2 |1 + C\bar{X}|^2 \quad , \quad (4.17d)$$

Os parâmetros \bar{X} , $U_{\text{longitud.}}$, $U_{\text{flexão}}$ representam respectivamente os termos da energia de deformação normalizados, referentes respectivamente ao cisalhamento, alongamento e flexão da estrutura 2.

Portanto, pelas equações (4.17a, c, d) pode-se mostrar que:

$$U_{\text{longitud.}} \ll X^{\perp} \text{ para } K_2^{\perp} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_3} \right) \ll kH_2 \quad , \quad (4.18a)$$

$$U_{\text{flexão}} \ll X^{\perp} \text{ para } K_2^{\perp} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_3} \right) \ll \left(\frac{H_{31}}{r_2} \right) kH_2 \quad (4.18b)$$

Com isto, pode-se desprezar as contribuições por alongamento e por flexão já que a rigidez à flexão e ao alongamento do material viscoelástico da estrutura 2 são desprezáveis.

Como a camada do material viscoelástico é resiliente em comparação com as estruturas elásticas 1 e 3, e é uma camada de espessura constante, pode-se reduzir a equação (4.16) à seguinte forma:

$$\eta = \frac{\beta_2 Y X}{1 + (2+Y) X + (1+Y) (1+\beta_2^2) X^2} \quad , \quad (4.19)$$

onde,

$$\frac{1}{y} \cong \left(\frac{B_1 + B_3}{H_{31}^2} \right) \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_3} \right)$$

e

$$X \cong \frac{G_2^1 b}{k^2 H_2} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_3} \right)$$

Na equação acima, o número da onda de flexão k , pode ser expresso da forma

$$k = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 m}{B}} \quad (4.20)$$

onde m representa a massa por unidade de comprimento da viga e B a rigidez à flexão da viga composta, onde os momentos de inércia são calculados em relação a linha neutra da seção composta.

As equações (4.19) e (4.20) aplicadas à barra quadrada conjugada em sanduíche com os materiais viscoelásticos, cujas propriedades foram determinadas nos itens anteriores, predisseram fatores de perda coerentes com as características da estrutura e do material viscoelástico considerado. Seus resultados serão apresentados no item 4.2.5, juntamente com os resultados experimentais.

4.2.5 Medição do Fator de Perda da Barra Sanduiche

Para a execução destes experimentos foram usadas barras de secção quadrada de aço SAE-1020, com as seguintes dimensões 50 x 50 x 3mm e 1,70m de comprimento, agregadas em uma face ao material viscoelástico, e este, a uma chapa de 50mm de lado por 3mm de espessura, em todo o comprimento da barra, conforme figura (4.12).

Foram preparadas duas barras sanduíche com materiais das amostras 1 e 6 conforme especificadas no Quadro 3.

Três barras ao todo foram testadas de mesmas dimensões e nas seguintes condições: sem material de amortecimento, com material de amortecimento amostra 1, e com material de amortecimento amostra 6.

Na colagem do material viscoelástico ao metal, cuidados especiais foram tomados, tais como: preparação adequada das superfícies a serem agregadas; obtenção de um filme de cola extremamente fino conforme recomenda a Norma ASTM E 756-80[06]; mantido uma compressão homogênea durante todo o tempo de cura, mais de 24 horas; uso do adesivo apropriado; etc.

As frequências de ressonância das barras foram obtidas através da determinação experimental da impedância de uma das extremidades livres das barras. Para tal, uma força aleatória, tipo ruído branco foi utilizada para excitar vibrações nas barras e a impedância foi então obtida com o uso do analisador de FOURIER, com o qual foi realizada a medição de forma automática da função de transferência.

Para uma maior precisão da leitura das frequências de ressonância, foram utilizadas 300 médias e uma resolução de 2,5 HZ aproximadamente. Veja o diagrama de blocos da instrumentação utilizada na figura (4.13).

Desta forma, foram obtidas as frequências de ressonância das barras com o material de amortecimento e da barra sem o material de amortecimento.

Com as frequências de ressonância, usando-se um filtro de banda de frequência, foi medido o decaimento logarítmico da resposta a um impacto. Desta forma o decaimento foi registrado para faixas de frequências de 1/3 de oitava centradas em torno da ressonância das barras, veja o diagrama de blocos da instrumentação utilizada na figura (4.14).

Nas figuras (4.15) e (4.16), podem ser vistos os espec
tros de frequência respectivamente da barra sem amortecimento e
da barra sanduíche com material da amostra 1.

Na figura (4.17), pode ser visto a forma típica do decaime
nto da energia vibratória da barra sem amortecimento, na frequência
central de 2 325 HZ.

A figura (4.18) mostra a forma típica do decaimento da
energia vibratória da barra sanduíche com material da amostra 1,
na frequência central de 303 HZ. Estes registros e os da resposta
em frequência foram plotados através do registrador gráfico do
analisador de FOURIER.

O fator de perda foi determinado pelo método da taxa de
decaimento, da mesma forma que foi calculado no item 4.2.2 deste
capítulo. Conforme procedimento anterior, três leituras foram
feitas e o valor médio computado.

Nas figura (4.19) e (4.20), respectivamente para as amostras
1 e 6, podem ser vistas as curvas comparativas entre os fatores
de perda teórico e experimental.

Os valores "Teórico A" foram obtidos através da aplicação
da equação (4.19), com a utilização das características do material
de amortecimento e do módulo de rigidez obtidos da curva
(figura (4.8)), onde foi considerada a sua variação em função da
frequência.

Os valores "Teórico B" foram obtidos através da mesma equa
ção (4.19), porém, foram considerados os valores médios do fator
de amortecimento e do módulo de rigidez obtidos da mesma curva,
figura (4.8).

Na figura (4.21), podemos observar uma comparação entre
os valores experimentais de amortecimento para a barra sanduíche
da amostra 1; para a barra da amostra 2 e para a barra sem o material
de amortecimento.

Os valores do fator de amortecimento das barras sanduí

che são pelo menos 10 vezes superiores aos da barra sem material de amortecimento, o que significa que a energia está realmente sendo dissipada no material viscoelástico, e que a energia perdida através da suspensão ou por outras formas, é desprezível.

A boa concordância entre os resultados teóricos e experimentais mostram a precisão adequada dos sistemas de medição empregados na determinação, tanto do fator de amortecimento e do módulo de rigidez do material viscoelástico, quanto o do fator de amortecimento da barra sanduíche.

4.3 Medição do Amortecimento por Bombeamento de Ar

O ar aprisionado no espaço entre as superfícies de componentes de estruturas, é forçado a se deslocar de um ponto para outro, quando estas vibram. Este processo de "bombeamento" proporciona uma considerável dissipação de energia devido à viscosidade do fluido já que os gradientes de velocidade são elevados.

Com o objetivo de se conhecer a eficiência deste mecanismo de amortecimento e compará-lo ao amortecimento proporcionado pelo uso de material granular, experimentos foram realizados usando-se a barra de secção quadrada, já descrita no capítulo 2.

Uma lâmina de aço (SAE-1020) com espessura de um milímetro e largura de 50mm foi acoplada à barra através de pares de parafusos conforme mostrado nas figuras (4.22) e (4.23). O espaçamento entre parafusos no sentido longitudinal era de 200mm.

Entre a lâmina e a barra, foram, ainda, colocadas arruelas especialmente construídas para controlar a distância entre as mesmas, objetivando variar a espessura da camada de ar e com isso, conhecer o efeito sobre o amortecimento.

As arruelas que serviam como espaçadores, possuíam as seguintes dimensões: 1,0mm; 0,4mm e 0,2mm. O amortecimento da barra foi também medido sem arruelas, o que implica em folga nula.

Os ensaios consistiram na determinação das frequências de ressonância e subseqüentes medições do decaimento logarítmico da resposta filtrada de uma faixa de frequência de 1/3 de oitava, centrada em torno das frequências de ressonância. Estes ensaios foram realizados com o mesmo critério utilizado nos ensaios descritos nos itens 4.2.2 e 4.2.5, incluindo o mesmo instrumental, conforme pode ser visto pelos diagramas de bloco mostrado nas figuras (4.13) e (4.14).

O fator de perda foi também determinado pelo método da taxa de decaimento, onde três leituras foram feitas e valor médio computado.

Na figura (4.24), foram plotados os valores experimentais do fator de perda da barra conjugada com a lâmina, nas quatro condições ensaiadas. Pode-se observar que, para espaçamentos entre 0 e 0,4mm, o amortecimento é bastante superior, comparado ao da barra sem a lâmina ou com espaçamento da ordem de 1,0mm.

Espaçamentos menores produzem amortecimento pelo menos 10 vezes superior ao da barra livre.

A folga que apresentou melhores resultados foi a de 0,2 mm, a qual proporcionou fatores de perda entre 0,01 e 0,02.

A observação experimental de que o amortecimento varia com a espessura da camada de ar, era esperado tendo em vista o mecanismo de dissipação de energia. Camadas muito espessas estão sujeitas a menores gradientes de velocidade do fluido, o que produz menor dissipação de energia. Camadas muito finas, entretanto, oferecem uma grande resistência à movimentação relativa das superfícies devido aos grandes gradientes de velocidade formados. A inércia do fluido, neste caso, dificulta a própria movimentação

É esperado, portanto, que exista um valor ótimo da espessura da camada a qual maximiza o amortecimento.

Segundo TROCHIDIS [07], e FOX & WHITTON [02], o valor ótimo para a espessura pode ser da ordem de dezenas de microns, à

fração de milímetro. Por isso, a própria irregularidade na planicidade das superfícies em contato são significantes para maximizar o amortecimento sem que seja necessário o uso de espaçadores.

Os resultados experimentais obtidos, neste trabalho concordam com o dito acima, onde os maiores valores do fator de perda foram obtidos com espaçadores de 0,2mm e sem espaçadores.

A possibilidade de o amortecimento ter sido causado por dissipação na forma de atrito seco nas juntas parafusadas foi eliminada por MAIDANIK [08], que conduziu experimentos deste mecanismo em uma câmara de vácuo. Os resultados indicam uma sensível diferença devido à inexistência de ar. Os resultados obtidos neste trabalho também são, certamente, devidos à presença do filtro, uma vez que espaçamentos de 0,4mm e 1,00mm são bastante inferiores aos obtidos com espaçamentos de 0,2mm e zero.

4.4 Comparação dos Resultados

Uma comparação entre os amortecimentos obtidos pelos três mecanismos ensaiados pode ser vista na figura (4.25). Os ensaios realizados com a barra de seção quadrada (50x 50mm) e suspenso por fios finos de aço em todos os testes.

A primeira observação diz respeito à eficiência da areia como material de amortecimento. Fatores de perda são nitidamente superiores nas baixas e médias frequências, chegando a 0,1 - 0,2, como é observado nos resultados das barras ensaiadas com material granular.

O método por bombeamento de ar, sem dúvida, resultou em menores fatores de perda. Entretanto, o método possui aplicações onde outros não são possíveis, principalmente em ambientes hostis aos materiais viscoelásticos, sujeitos à alta temperatura. Este mecanismo não possui uma elevada capacidade de amortecimento, o que torna imprópria sua aplicação a estruturas pesadas.

Materiais viscoelásticos apresentaram fatores de perda de 0,02 - 0,03, conforme esperado deste mecanismo.

4.5 Conclusões

A adição de amortecimento por bombeamento de ar, em algumas situações é mais vantajosa em relação a outros métodos, principalmente se o ambiente estiver sujeito a altas temperaturas e a vapores de óleo. Nestas situações, a aplicação de materiais viscoelásticos será impraticável.

O tratamento por material viscoelástico é o método que se aplica onde não existem cavidades para aplicação do material granular, e onde a criação de cavidades é indesejável. Necessita normalmente de ambientes menos contaminados para maior durabilidade do material aplicado, além de requerer cuidados especiais os quais devem ser tomados na preparação das superfícies e na colaagem ou vulcanização do material.

O uso de material granular é o que requer menores cuidados em sua aplicação. É um material de fácil aquisição, particularmente a areia que é de baixo custo. É um método bastante eficiente, pois, apresenta fatores de perda bastante elevados, além de possibilitar o ajuste da região de máximo, através de um dimensionamento adequado das cavidades.

Deve-se lembrar, também, que existe o desgaste dos grãos com o tempo, e que embora não tenha sido objeto deste estudo, sabe-se que existe e que altera a região de máximo amortecimento. Porém esta alteração não é muito grande como pode ser visto na comparação entre os diversos tamanhos de grãos apresentada no capítulo 2.

Conclui-se que o uso de materiais granulares para amortecimento de estruturas de máquinas é bastante eficiente e adequado à maioria das aplicações práticas.

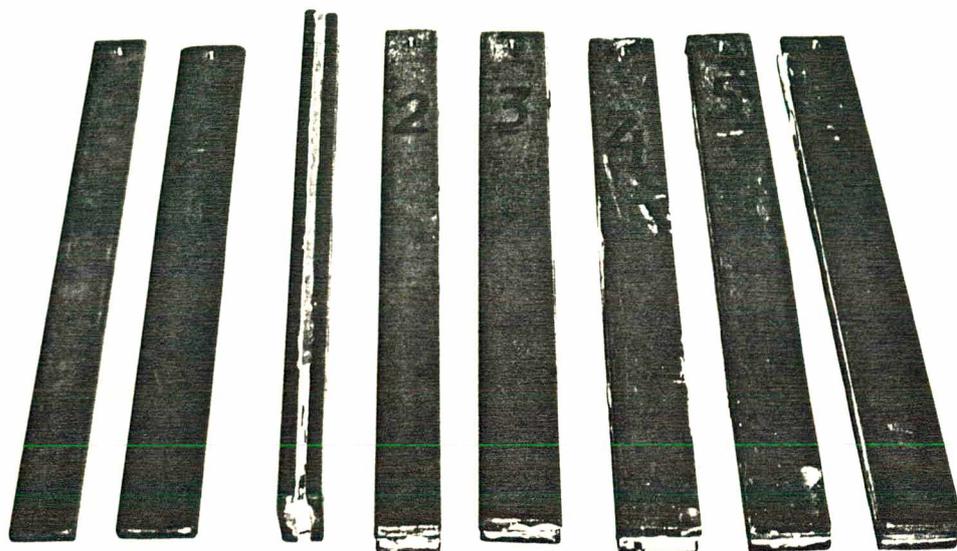


FIGURA (4.1) - Amostras em forma sanduíche usadas para a determinação das características do material

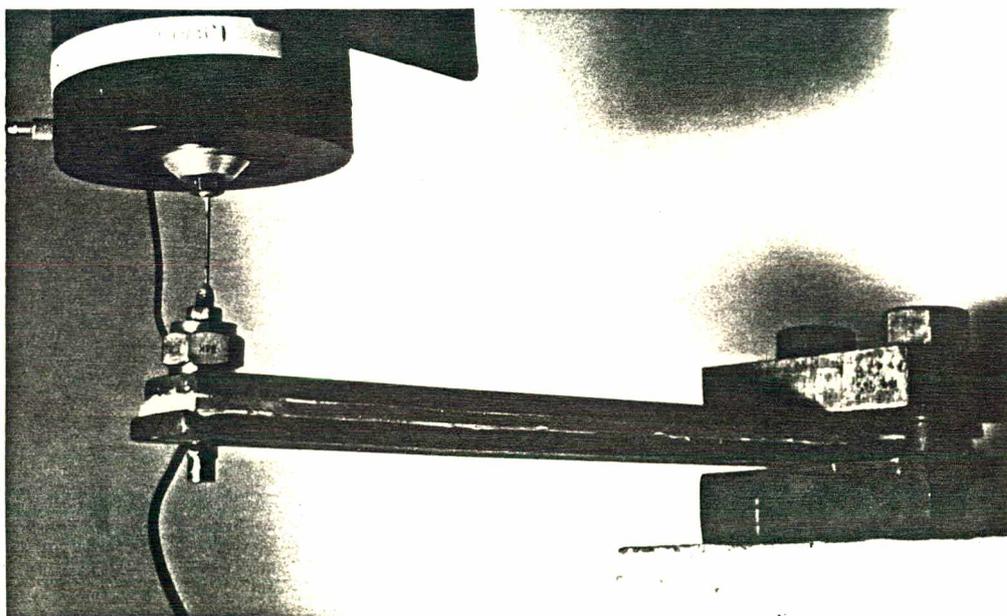


FIGURA (4.2) - Montagem da amostra e instrumentação para determinação das frequências de ressonância

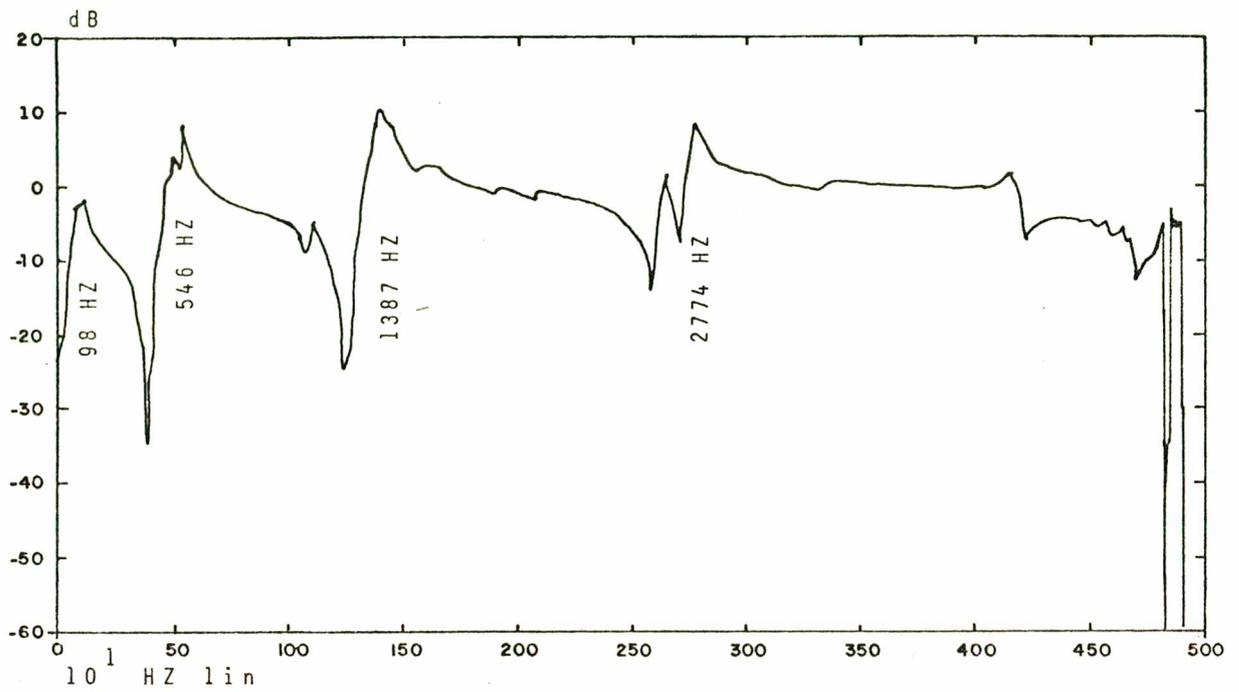


FIGURA (4.3) - Resposta de freqüência da barra sem amortecimento, dimensões 32 x 3 x 240mm (barra de OBERST)

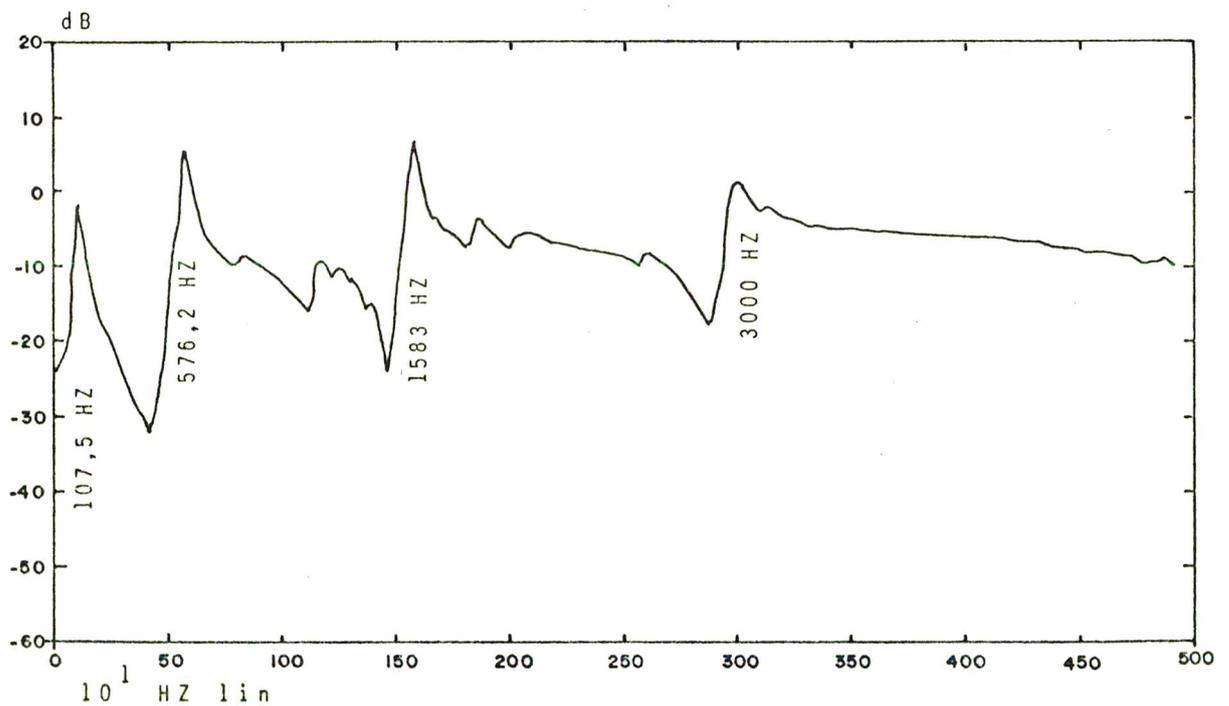


FIGURA (4.4) - Resposta de freqüência da amostra 6 de material viscoelástico (em sanduiche)

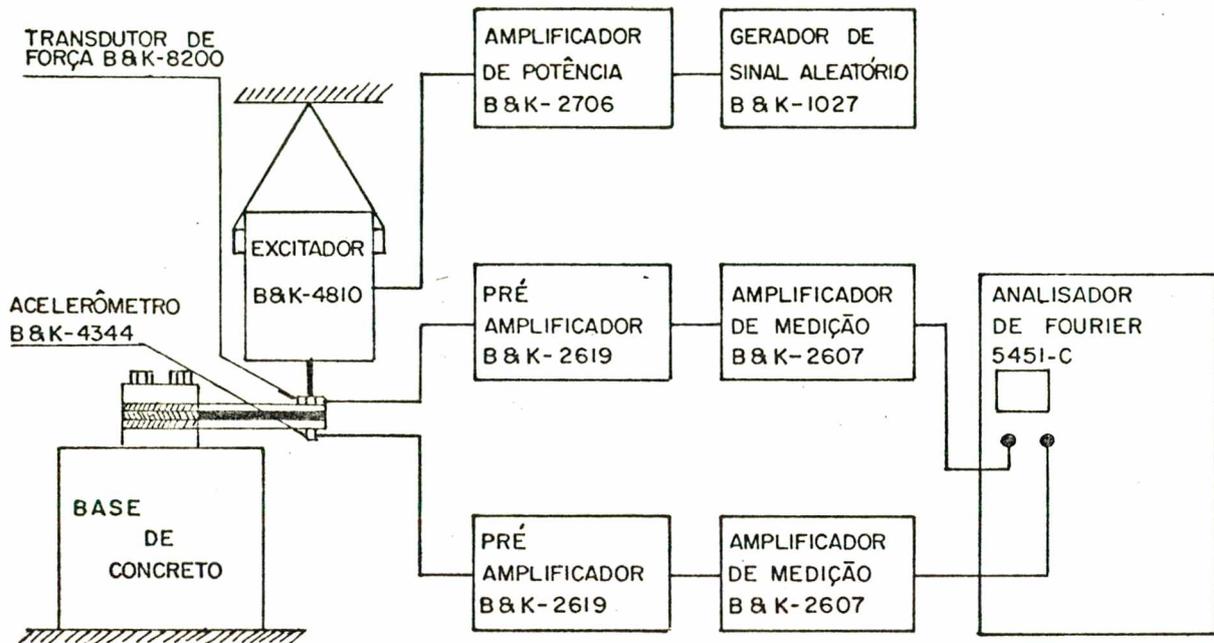


FIGURA (4.5) - Diagrama de blocos da instrumentação usada na determinação dos modos de vibração da barra com material de amortecimento

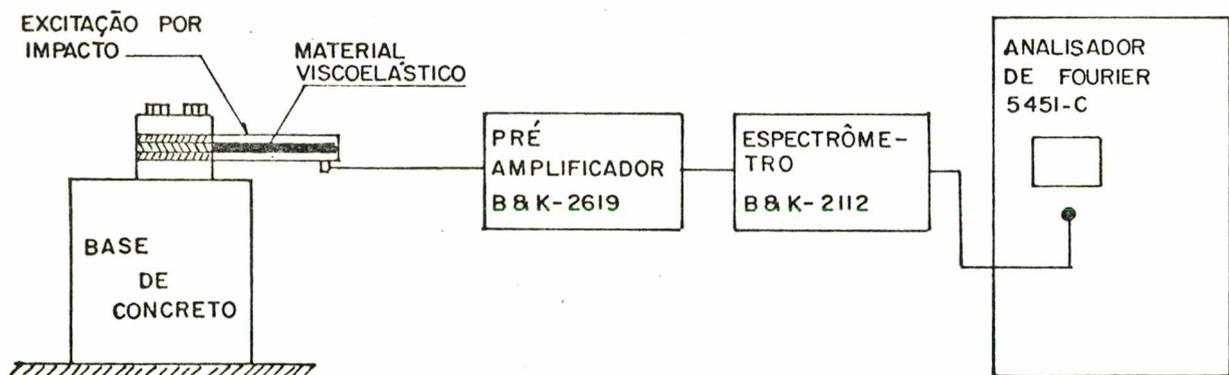


FIGURA (4.6) - Diagrama de blocos da instrumentação usada na determinação do amortecimento

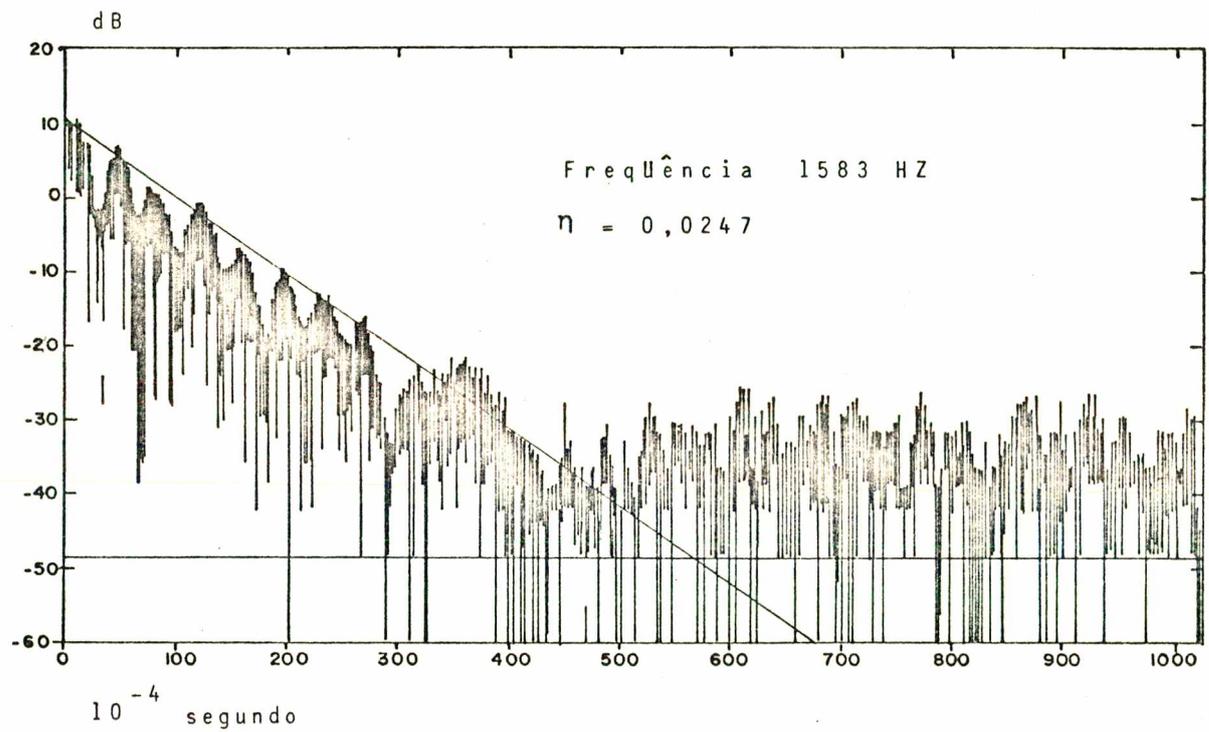


FIGURA (4.7) - Forma típica do decaimento da energia vibratória, utilizada na determinação do amortecimento da amostra 6 do material viscoelástico (em sanduiche)

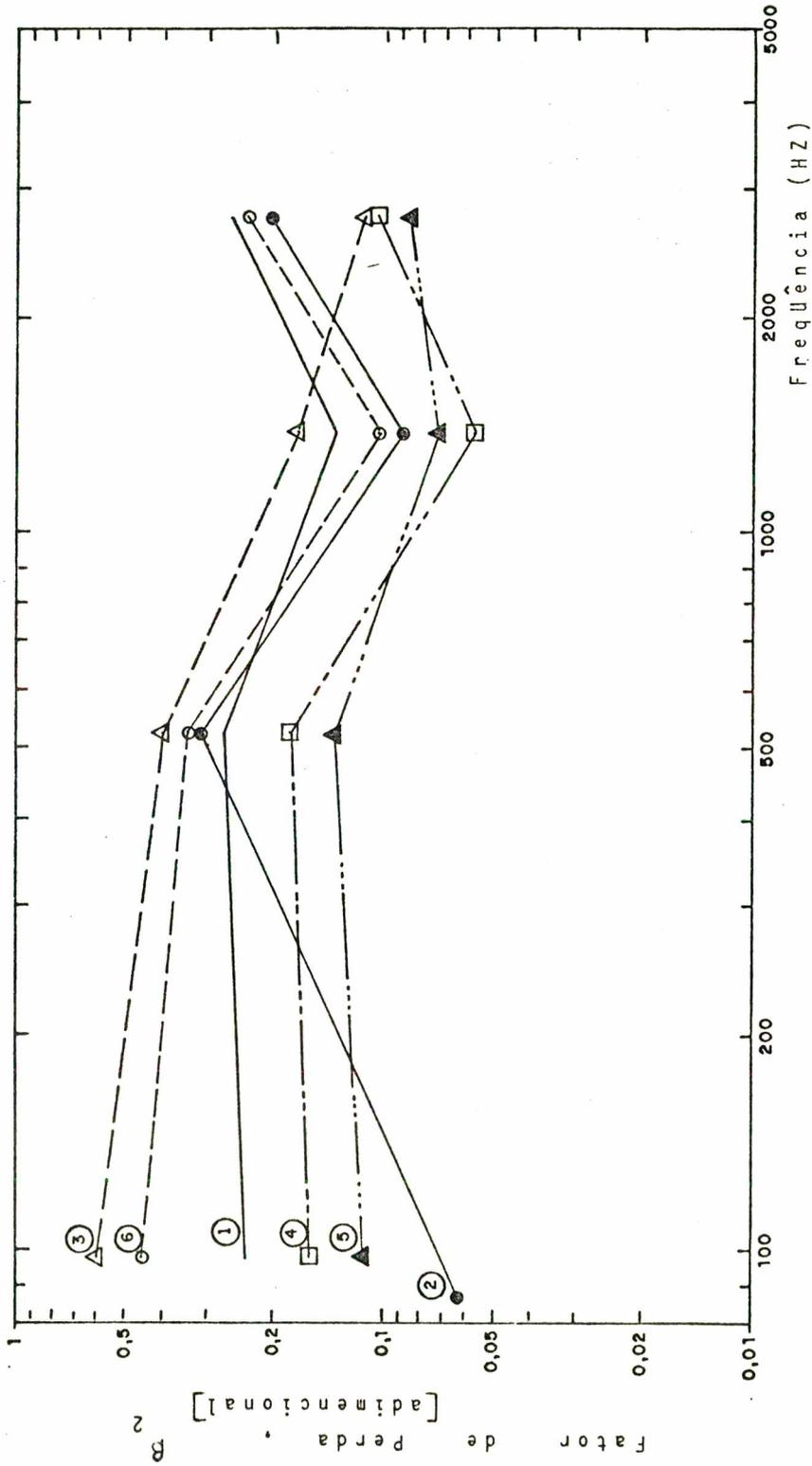


FIGURA (4.8) - Fator de perda dos vários materiais de amortecimento ensaiados versus frequência

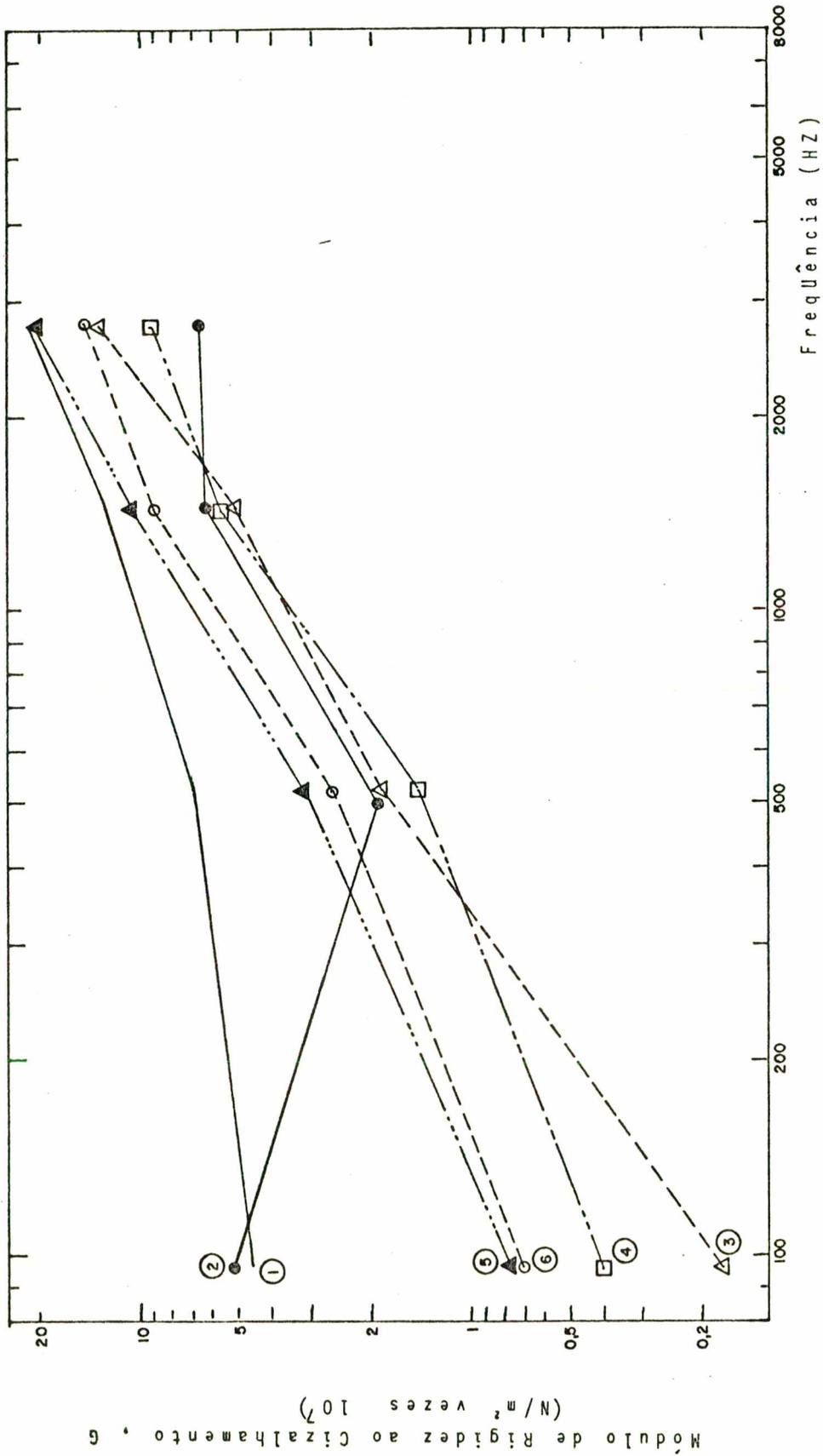


FIGURA (4.9) - Módulo de rigidez ao cisalhamento dos vários materiais ensaiados versus frequência

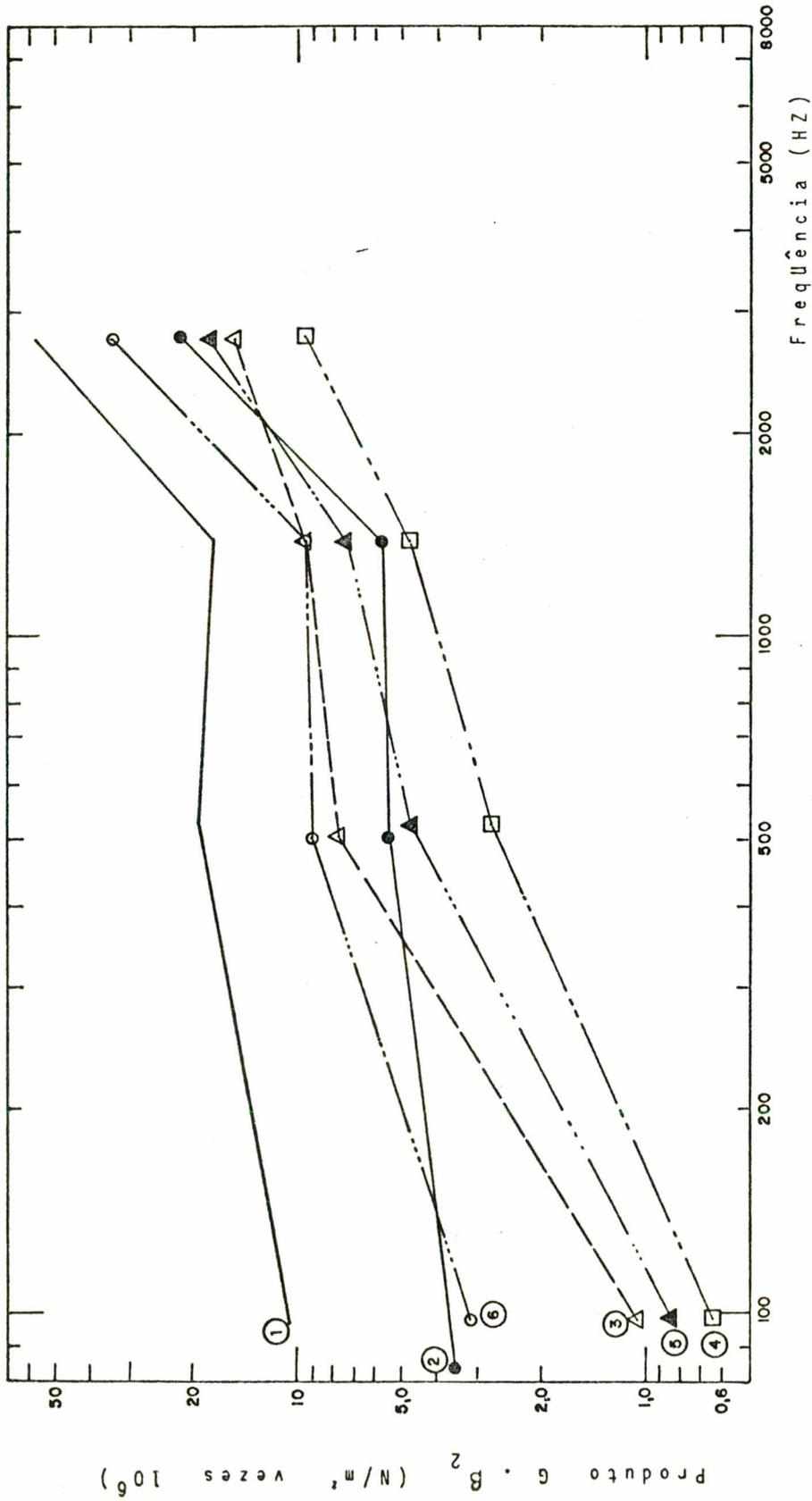


FIGURA (4.10) - Produto do módulo de rigidez ao cisalhamento x fator de perda dos vários materiais ensaiados versus frequência

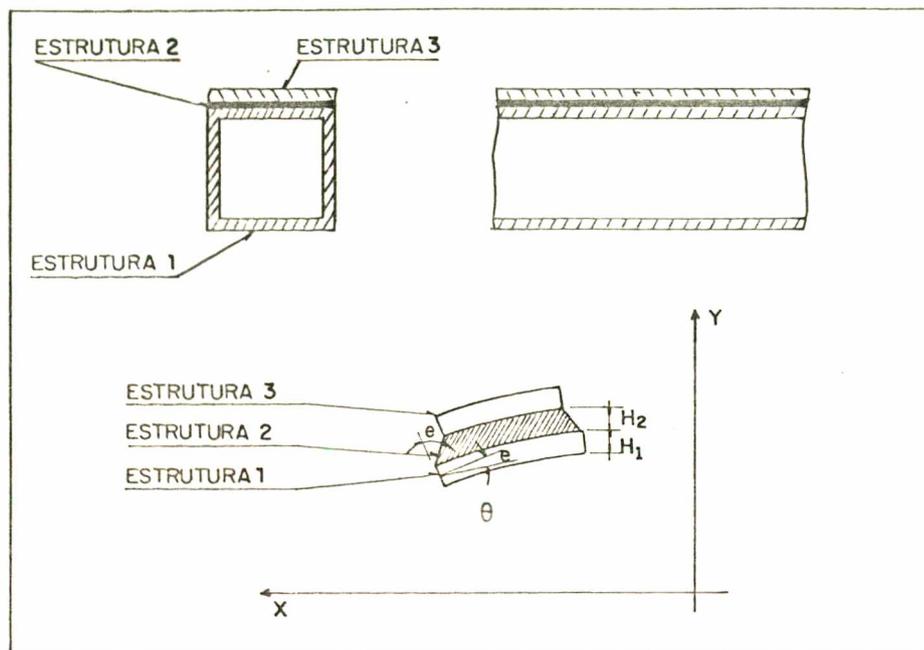


FIGURA (4.11) - Deformação de um elemento de área da barra quadrada conjugada com material viscoelástico

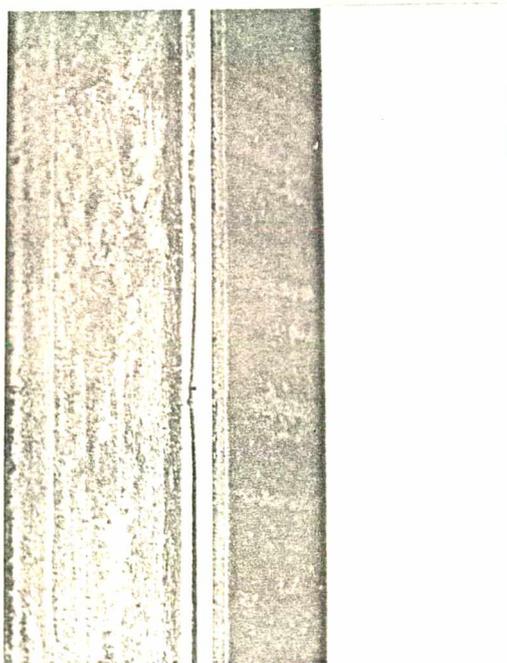


FIGURA (4.12) - Barra quadrada (50 x 50 x 3mm de espessura), conjugada com material viscoelástico e chapa de aço de 3mm de espessura, em sanduíche

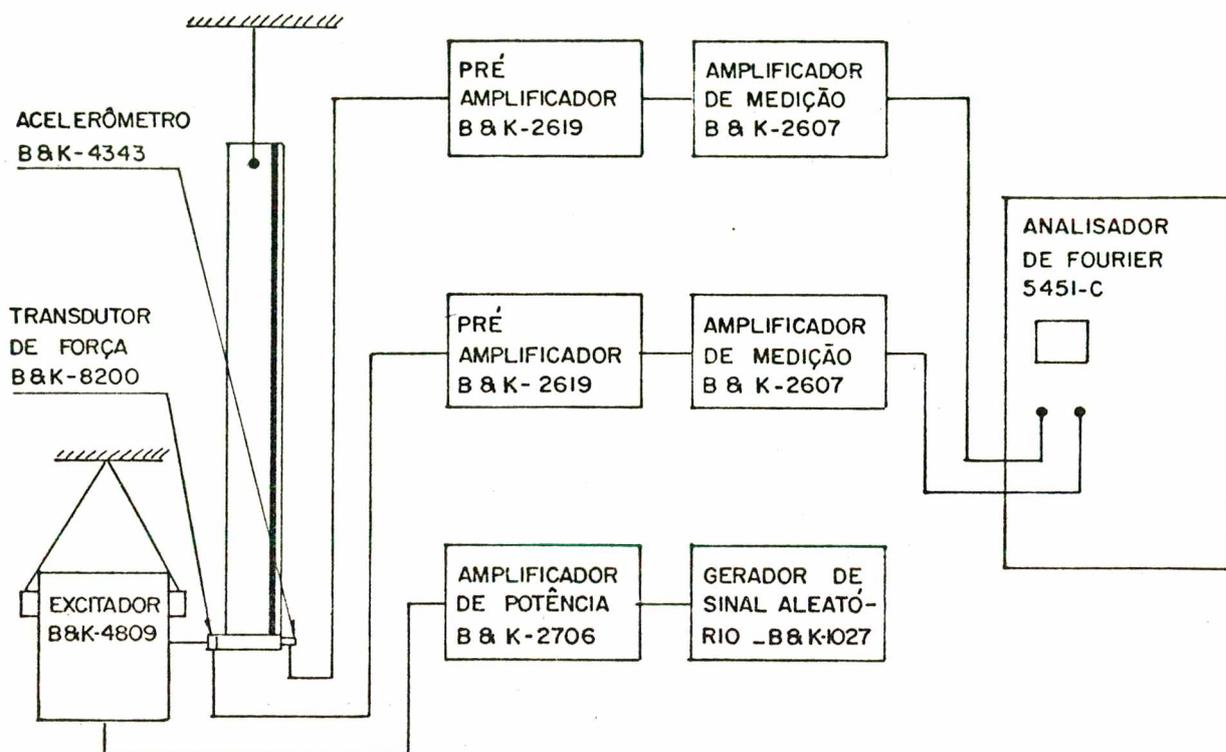


FIGURA (4.13) - Diagrama de blocos da instrumentação usada na determinação das frequências de ressonância da barra

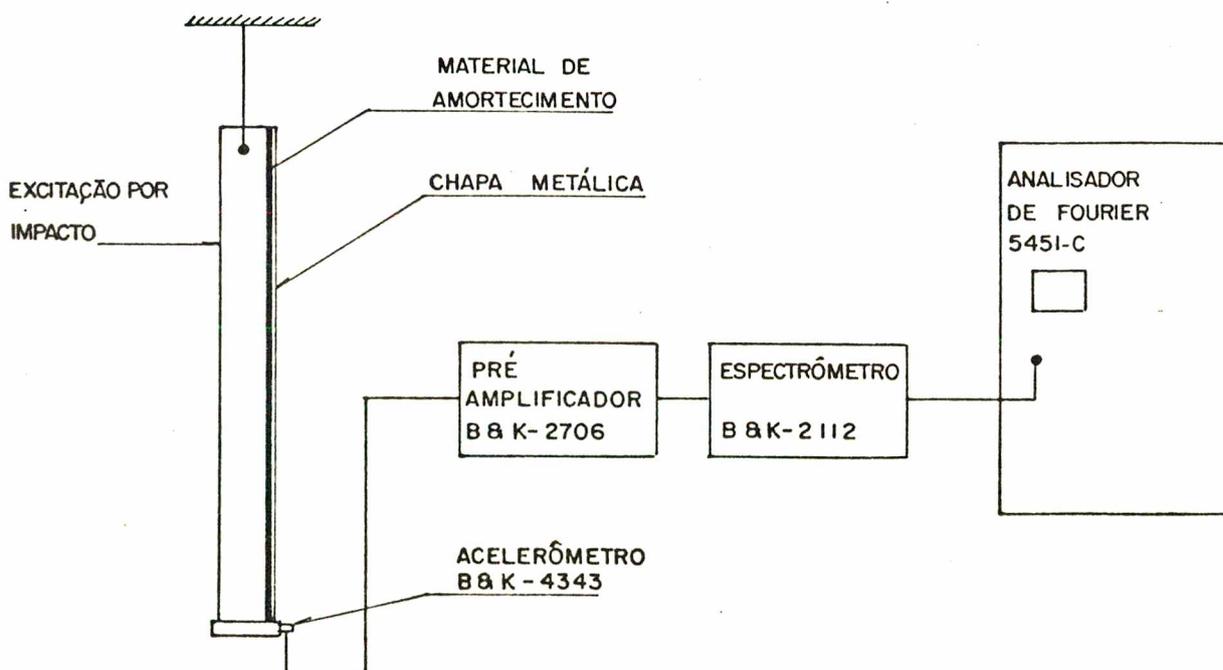


FIGURA (4.14) - Diagrama de blocos da instrumentação usada na determinação do amortecimento

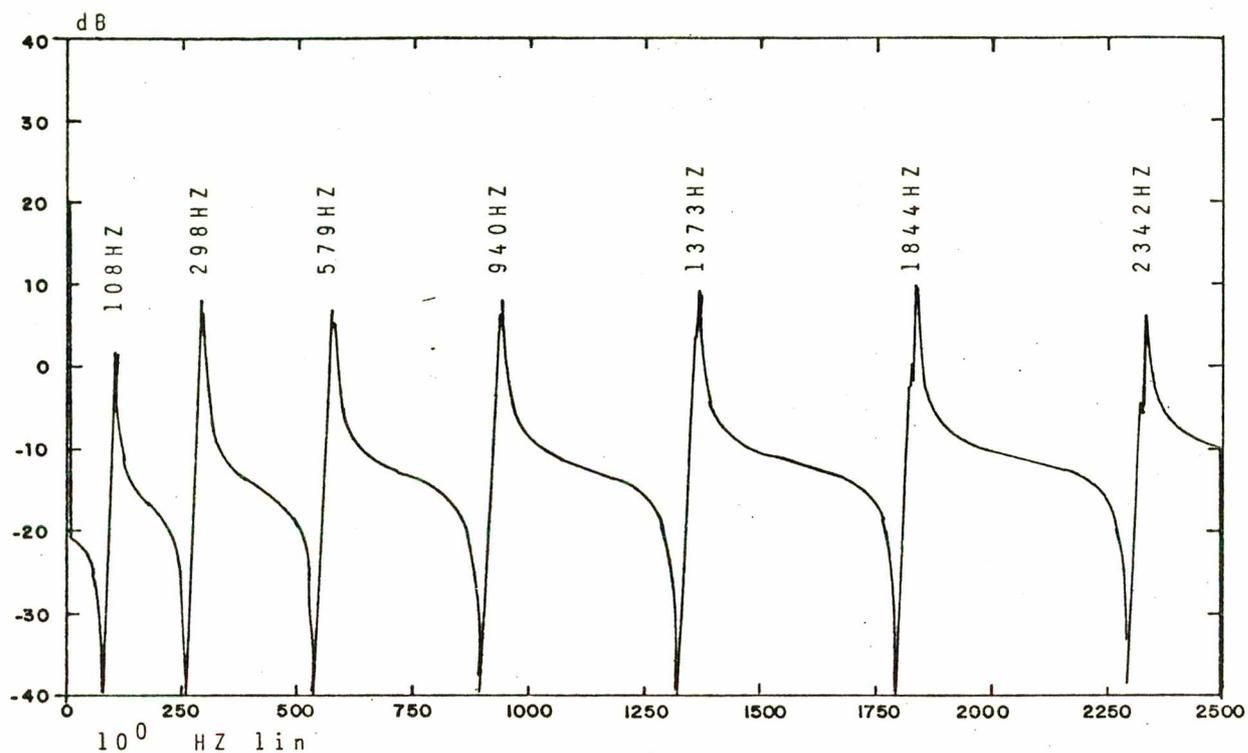


FIGURA (4.15) - Resposta em frequência da barra quadrada (50 x 50 x 3mm de espessura), altura 1,70m sem amortecimento

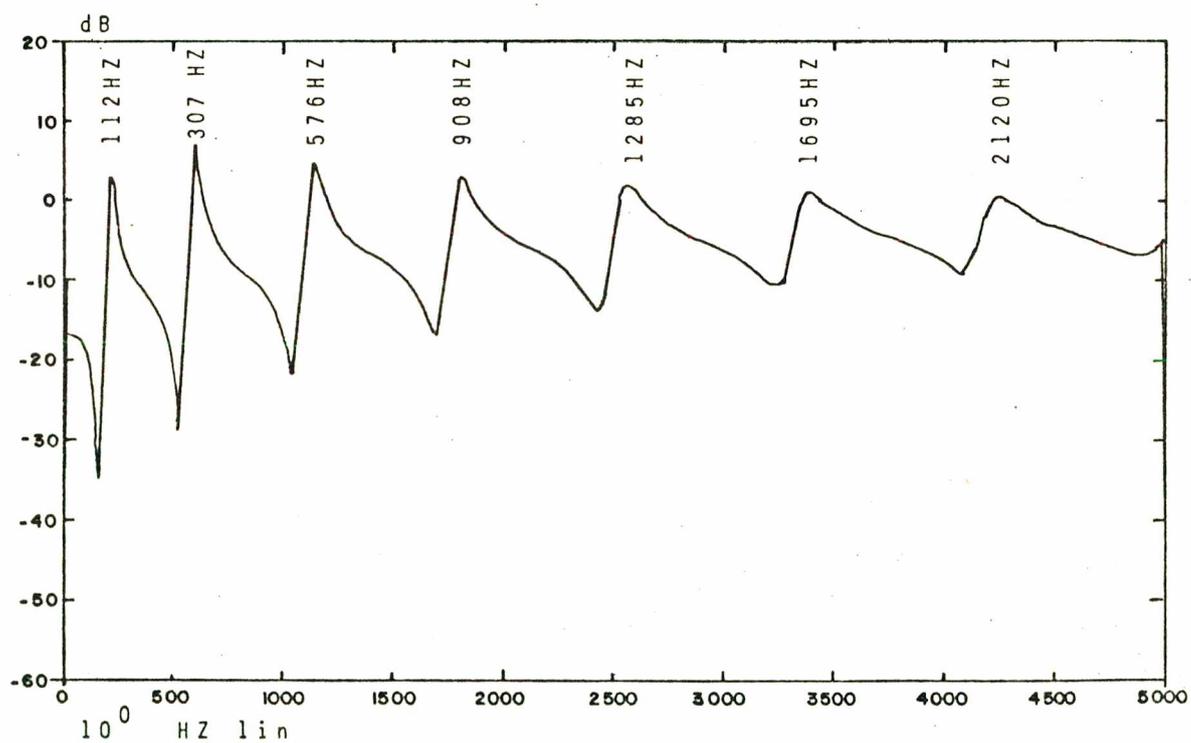


FIGURA (4.16) - Resposta em frequência da barra quadrada conjugada com material viscoelástico (amostra 1) e a chapa de aço de 3mm de espessura

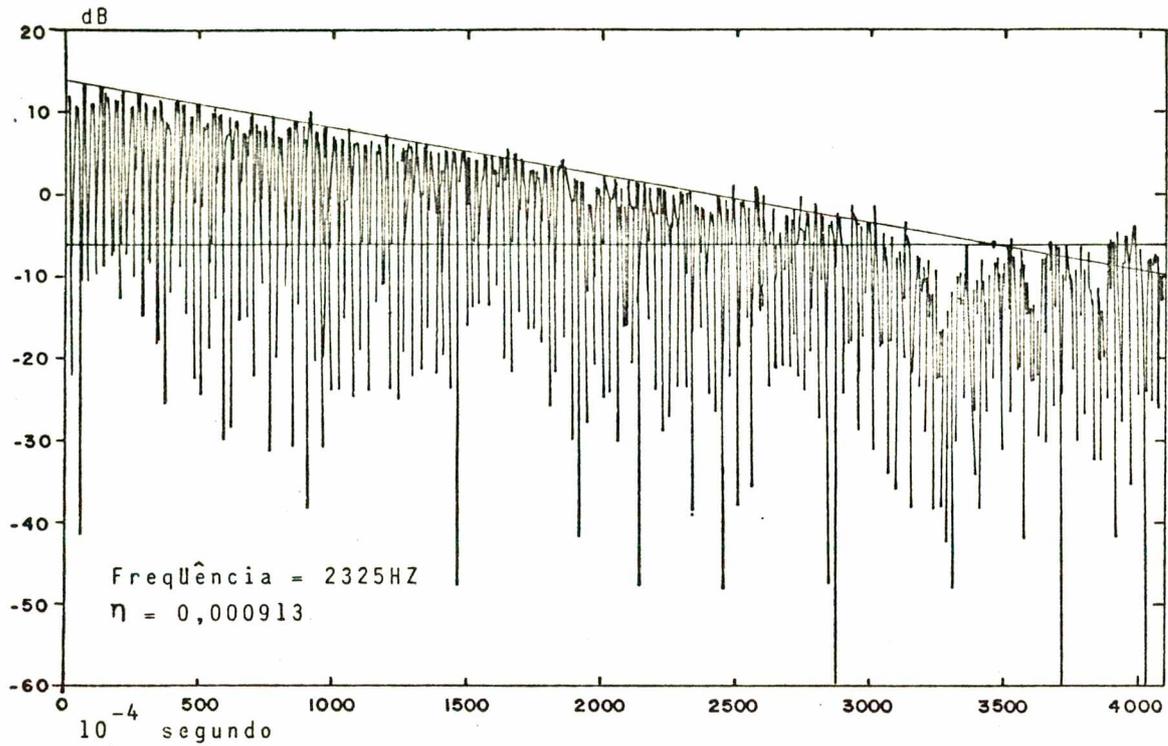


FIGURA (4.17) - Forma típica do decaimento da energia vibratória utilizada na determinação do amortecimento da barra sem o material viscoelástico

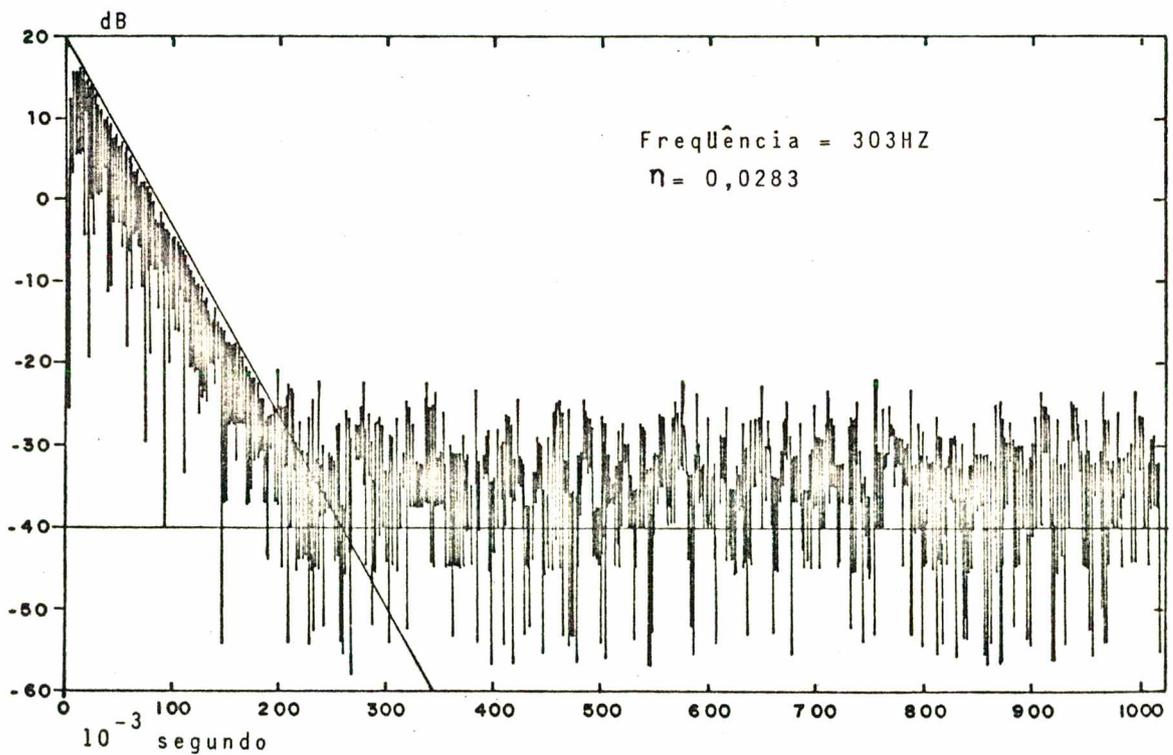


FIGURA (4.18) - Forma típica do decaimento da energia vibratória utilizada na determinação do amortecimento da barra conjugada com a amostra 1 (em sanduíche)

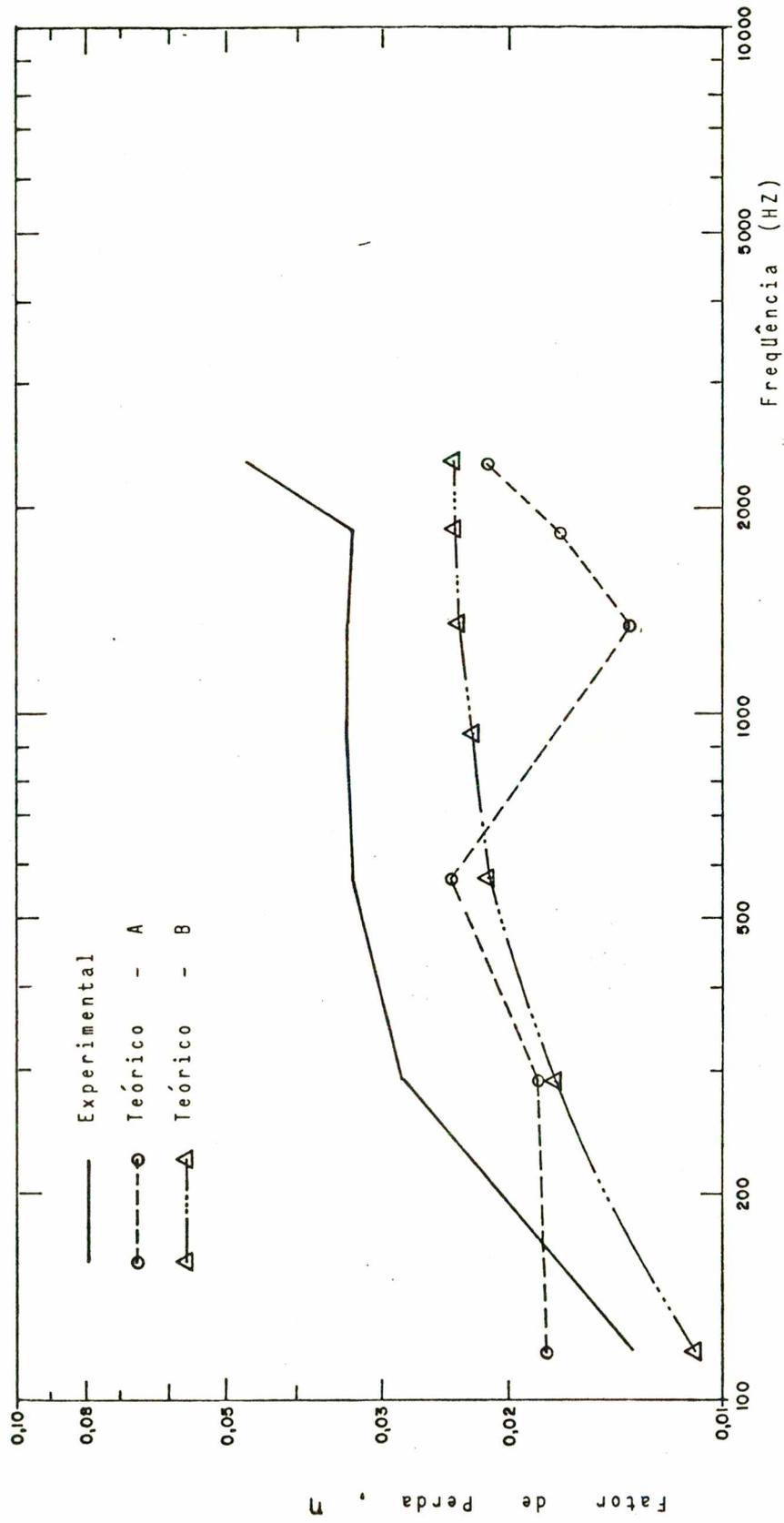


FIGURA (4.19) - Comparação entre fatores de perda teórico e experimental da barra sanduiche, do material da amostra I.

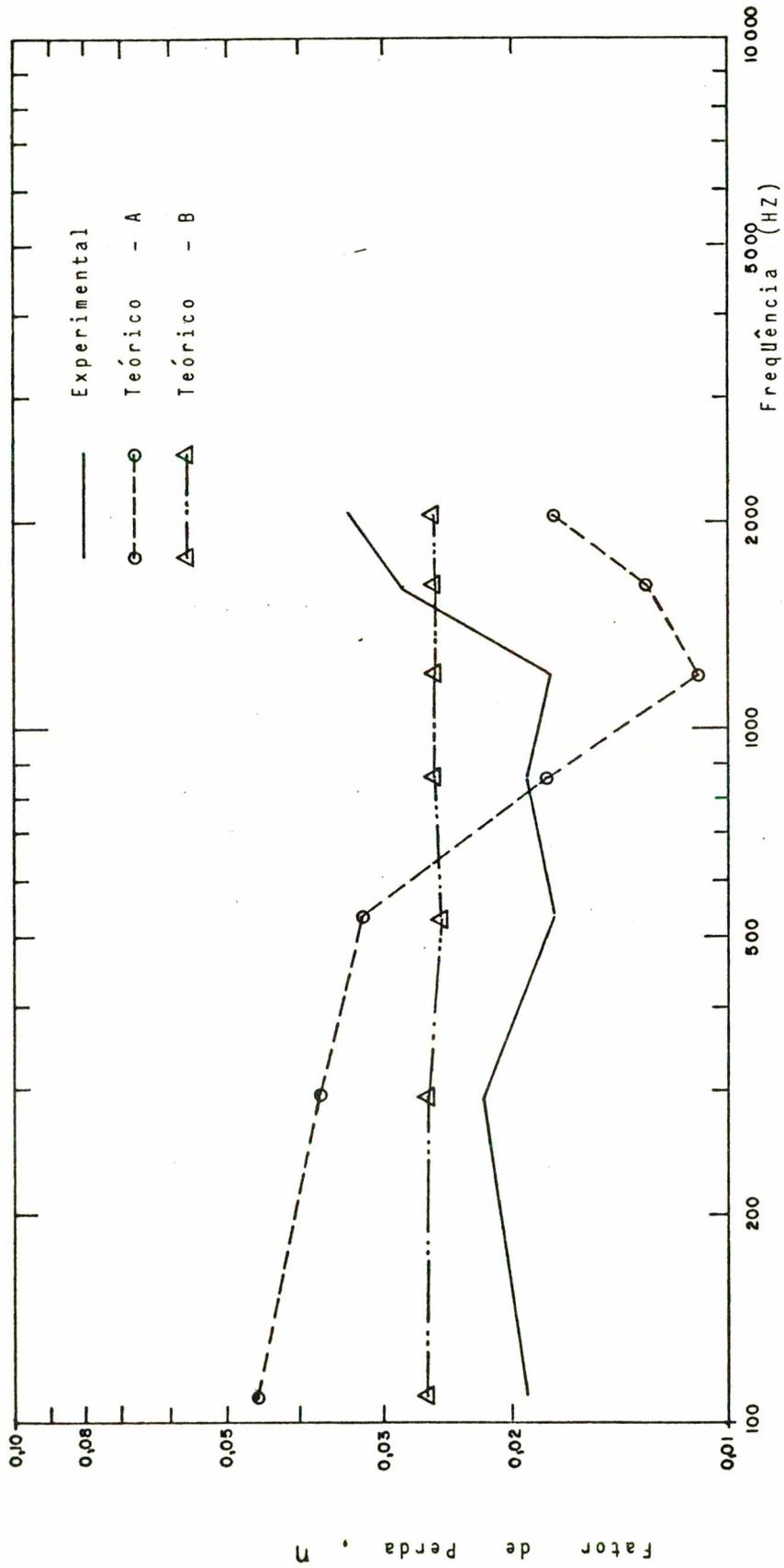


FIGURA (4.20) - Curva comparativa entre valores teóricos e experimentais para uma barra quadrada 50 x 50mm, comprimento 1,70m, composta com material viscoelástico em sanduíche, amostra 6, e uma chapa de seção 50 x 3mm

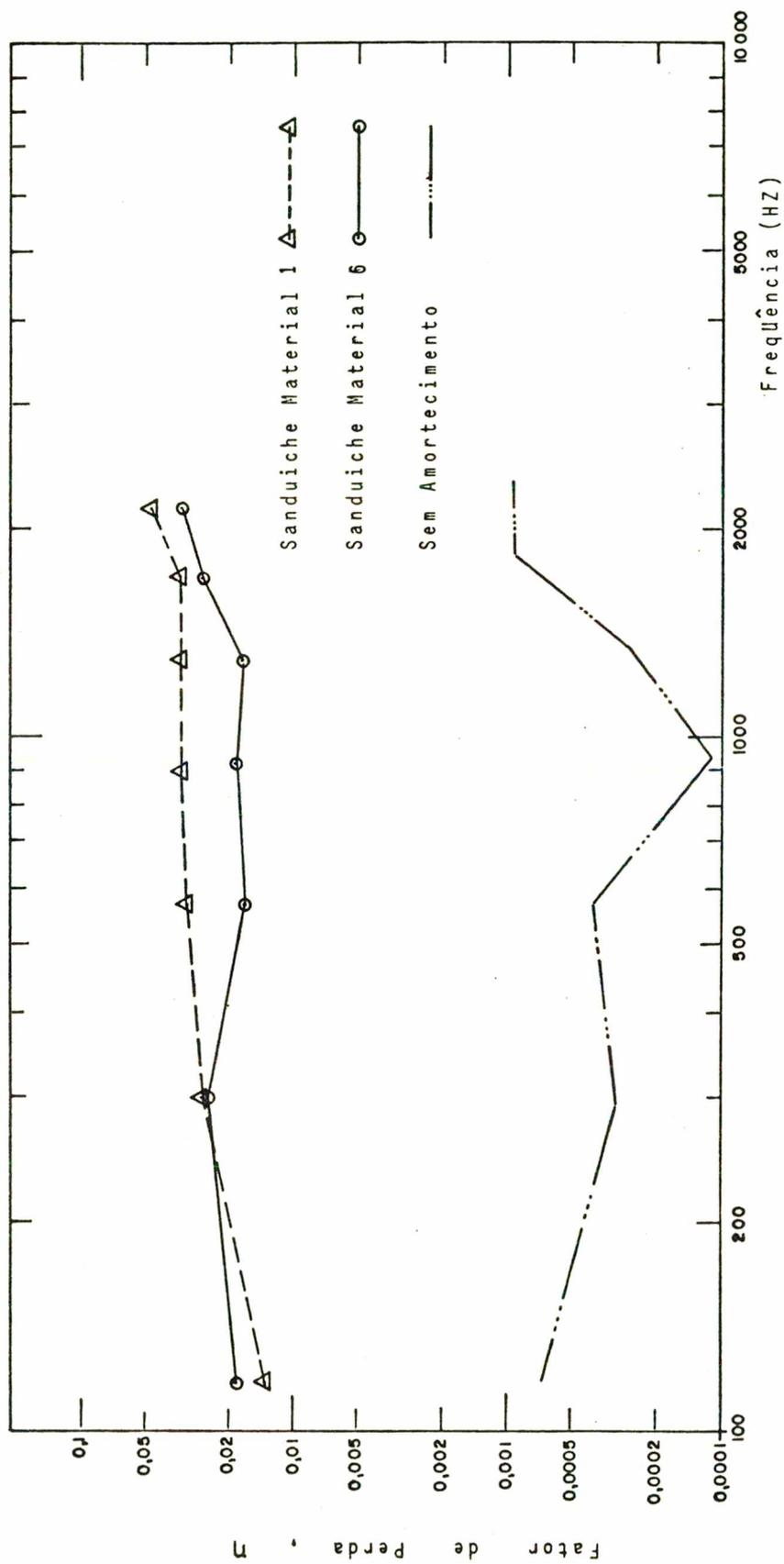


FIGURA (4.21) - Comparação entre valores experimentais do fator de perda da barra quadrada 50 x 50mm, comprimento 1,70m, conjugada nas condições indicadas

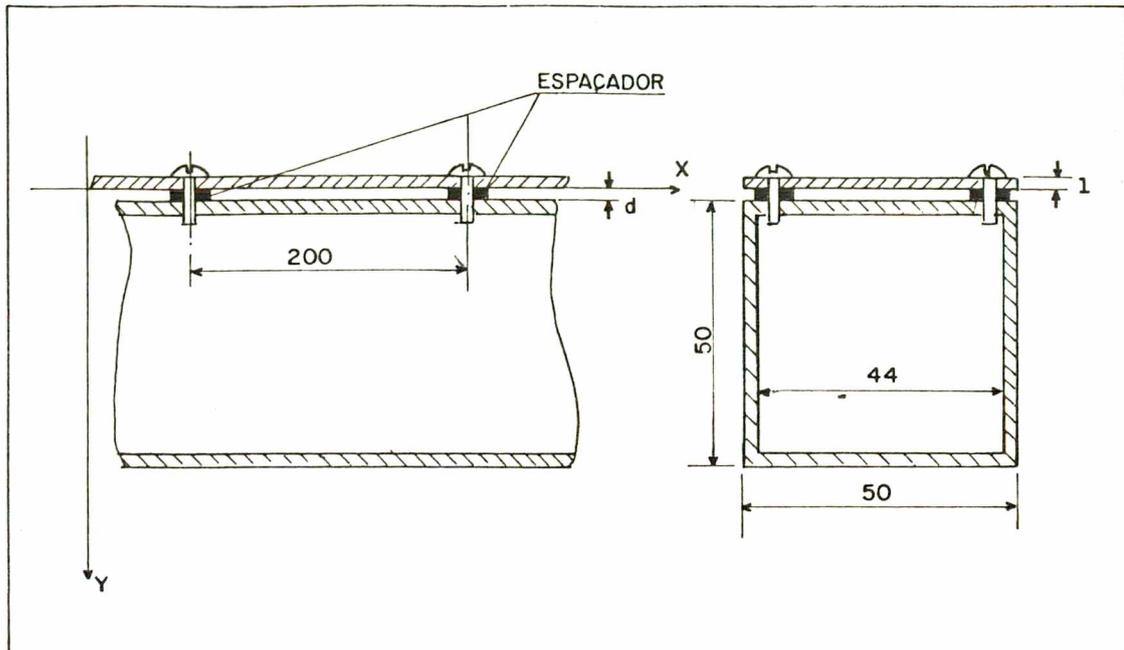


FIGURA (4.22) - Esquema do acoplamento entre a barra rígida e uma lâmina flexível

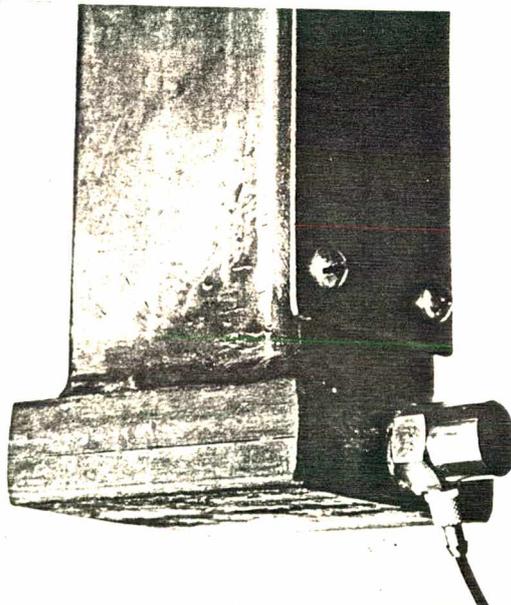


FIGURA (4.23) - Barra quadrada conjugada com uma lâmina de 1mm de espessura, com espaçadores para ensaios de amortecimento por bombeamento de ar

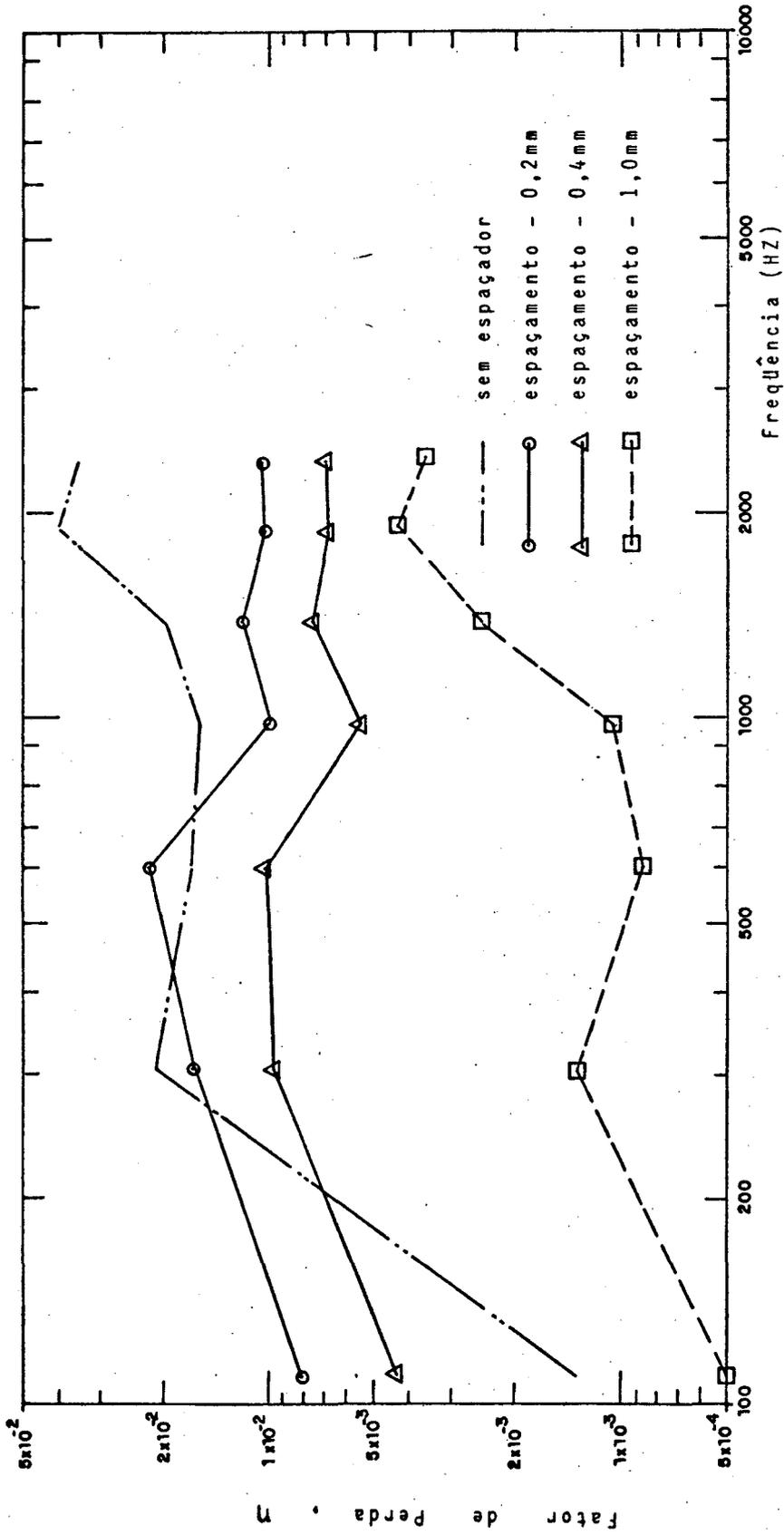


FIGURA (4.24) - Curvas comparativas entre valores experimentais do fator de perda de uma barra quadrada 50 x 50mm; 1,70m de comprimento, conjugada com uma chapa de 50 x 1mm, amortecendo nas interfaces dos metais "bombeamento de ar"

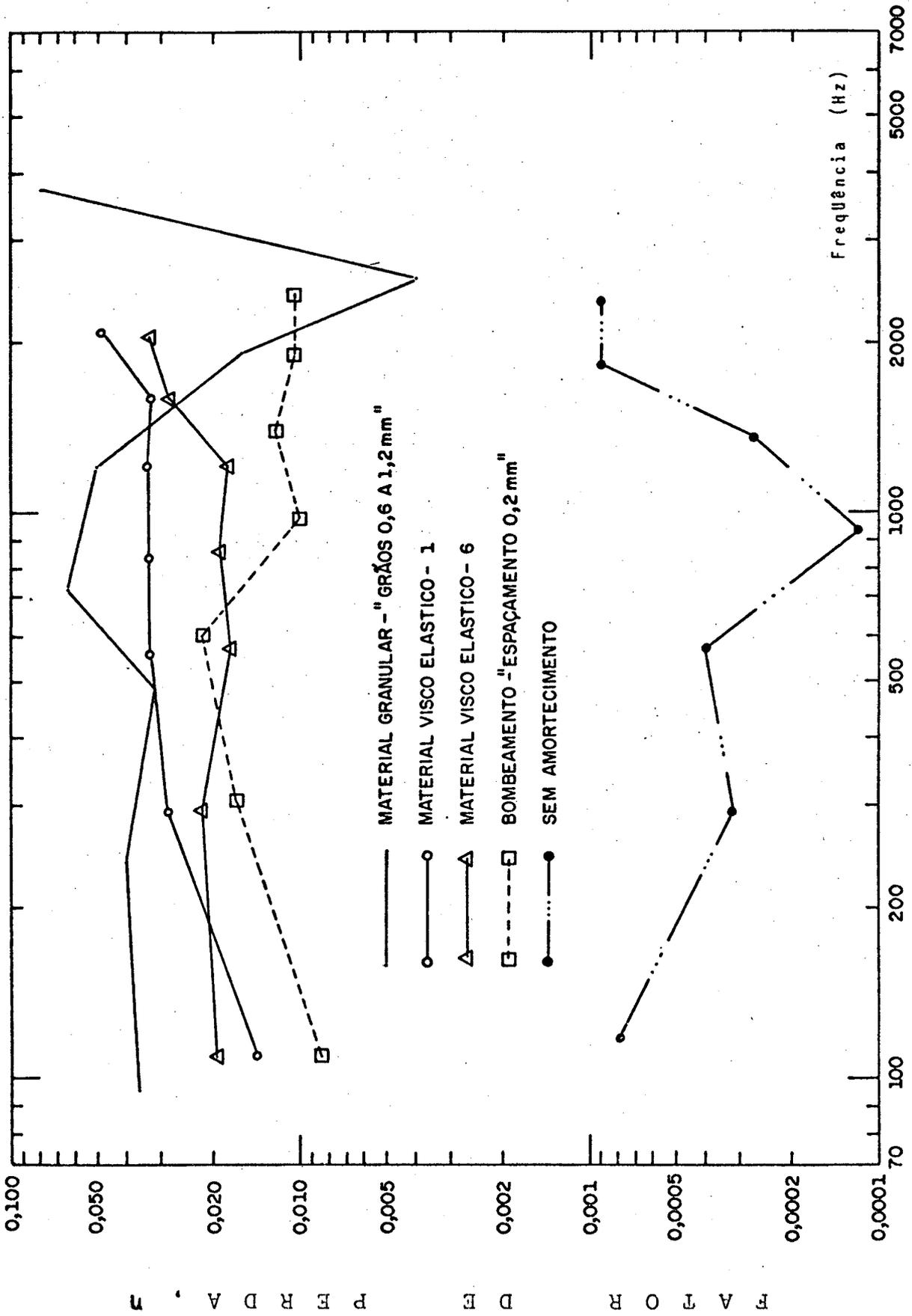


FIGURA (4.25) - Curva comparativa entre valores experimentais de uma barra quadrada 50x50mm; 1,70mm de comprimento conjugada com diversos materiais de amortecimento.

C A P Í T U L O 5

CONCLUSÕES

Os resultados dos experimentos em barras cheias com areia seca revelam o alto nível de amortecimento que pode ser obtido por este mecanismo. A maximização do amortecimento nas médias frequências é extremamente importante no ponto de vista de controle de ruído, uma vez que a energia sonora irradiada de máquinas encontra-se concentrada nesta região, enquanto que o amortecimento de estruturas de máquinas observado na prática apresenta valores que de crescem com a frequência, nesta região, Daí, a importância dos resultados obtidos neste trabalho.

O mecanismo de amortecimento de materiais granulares confinados em cavidades é explicado em termos de formação de ondas estacionárias longitudinais no material. O amortecimento é máximo quando a dimensão interna da cavidade corresponde a $1/4$, $3/4$, $5/4$,... do comprimento de onda longitudinal no material granular. Um modelo matemático referente à predição do amortecimento apresenta valores que concordam com os experimentais nas baixas frequências e também com relação à frequência para a qual o amortecimento é máximo. A diferença entre resultados teóricos e experimentais na região de máximo, é atribuída à incapacidade que ondas elásticas possuem de transmitirem tensões de tração em materiais granulares. Isto faz com que a curva do amortecimento resultante apresente uma forma que se aproxima da teórica supondo um amortecimento interno bastante elevado (da ordem de 1,0).

Entre todos os parâmetros analisados experimentalmente, nenhum deles demonstrou a possibilidade de produzir amortecimentos, tão altos quanto os obtidos através das ressonâncias nas cavidades.

Observa-se, entretanto, que materiais granulares mais densos poderiam produzir amortecimento ainda maiores, já que o fator de perda é proporcional à densidade do material. Neste sentido

bolinhas de chumbo teriam certamente, vantagens sobre a areia.

Estruturas que não possuem cavidades também podem ser amortecidas por este método através da fixação de pequenas caixas metálicas contendo material granular e a frequência de máximo a amortecimento pode ser ajustada através da seleção apropriada de suas dimensões internas. Estruturas com cavidades maiores poderiam ser amortecidas colocando-se espaçadores internos.

Uma comparação entre os fatores de perda alcançados com areia e com a utilização de materiais viscoelásticos e pelo bombeamento de ar, mostra a superioridade dos materiais granulares. Além disso resistem a altas temperaturas, são de fácil aplicação, e possuem baixo custo.

Estudos posteriores sobre amortecimento por materiais granulares são sugeridos principalmente em relação às aplicações práticas. Todos os parâmetros têm sido testados em laboratório, porém necessitam a seguir, serem testados em estruturas de máquinas e em outras situações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - MÖSER, M. 1980 "Damping of Structure-Borne Sound by the Viscosity of a Layer Between two Plates" *Acústica*, Volume 46, págs. 210-217
- [02] - FOX, M.J.H. & WHITTON, P.N. "The Damping of Structural Vibrations by thin Gas Films" *Journal of Sound and Vibration* (1980) 73(2), págs. 279-295
- [03] - UNGAR, Eric E. "Loss Factors of Viscoelastically Damped beam Structures". *The Journal of the Acustical Society of America*, Volume 34, Número 8, Agosto 1962, págs.1082-1089
- [04] - CREMER, L. & HECKL, M. 1973 "Structures-Borne Sound" Springer-Verlag, New York
- [05] - KERWIN, E.M. "Damping of Flexural Waves by a Constrained Viscoelastic Layer". *The Journal of the Acustical Society of America*, Volume 31, Número 7, Julho, 1959 págs. 952-962
- [06] - ASTM E 756-80 "Standard Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials"
- [07] - TROCHIDIS, A. "Körperschalldämpfung Durch Viskositätsverluste in Gasschichten bei Koppelplatten. Tese de Doutorado na Universidade de Berlin, 1977 - págs. 1-12
- [08] - MAIDANIK, G. "Energy Dissipation Associated with Gas Pumping in Structural Joints" *The Journal of the Acustical Society of America*, Volume 40, Número 5, (1966), 1064

- [09] - LENZI, A. "The Use of Damping Material in Industrial Machines", Tese de Doutorado submetida a Universidade de Southampton.
- [10] - TSE, MORSE & KINKLE "Mechanical Vibrations Theory and Application" Second Edition, págs. 31-32, 1978.
- [11] - REYNOLDS, D.D. "Engineering Principles of Acoustics", Allyn & Bacon, Inc ed. pág. 70, 1981.
- [12] - WOLF, N.D. "Results of Loss Factor Measurements on concrete Beams Using a Viscoelastic or Sand Damping System" ASD-TKR-62-717. Wright-Patterson AFB, Ohio, 1962.
- [13] - KERWIN, E.M. "Macromechanisms of Damping in Composite Structures" Paper Published at the 67 th Annual Meeting of ASTM on Internal Friction Damping and Cyclic Plasticity ASTM-STP nº 378, 1964.
- [14] - KUHL, W. & KAISER, H. "Absorption of Structure-Borne Sound in Building Materials with and Without Sand-Filled Cavities", Acústica, Volume 2, págs. 179-188, 1952.
- [15] - HALL, J.R. & RICHART, F.E. "Dissipation of Elastic Wave Energy in Granular Soils". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. ASC, November, SM6, págs. 27-56, 1963.

A P Ê N D I C E A

DISPERSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma das vigas, a de secção quadrada 50x50mm, serviu de teste para verificar a dispersão dos resultados do amortecimento obtido experimentalmente. Para tal, o fator de perda foi medido três vezes para cada frequência. A figura A-1 mostra os valores obtidos em cada medição.

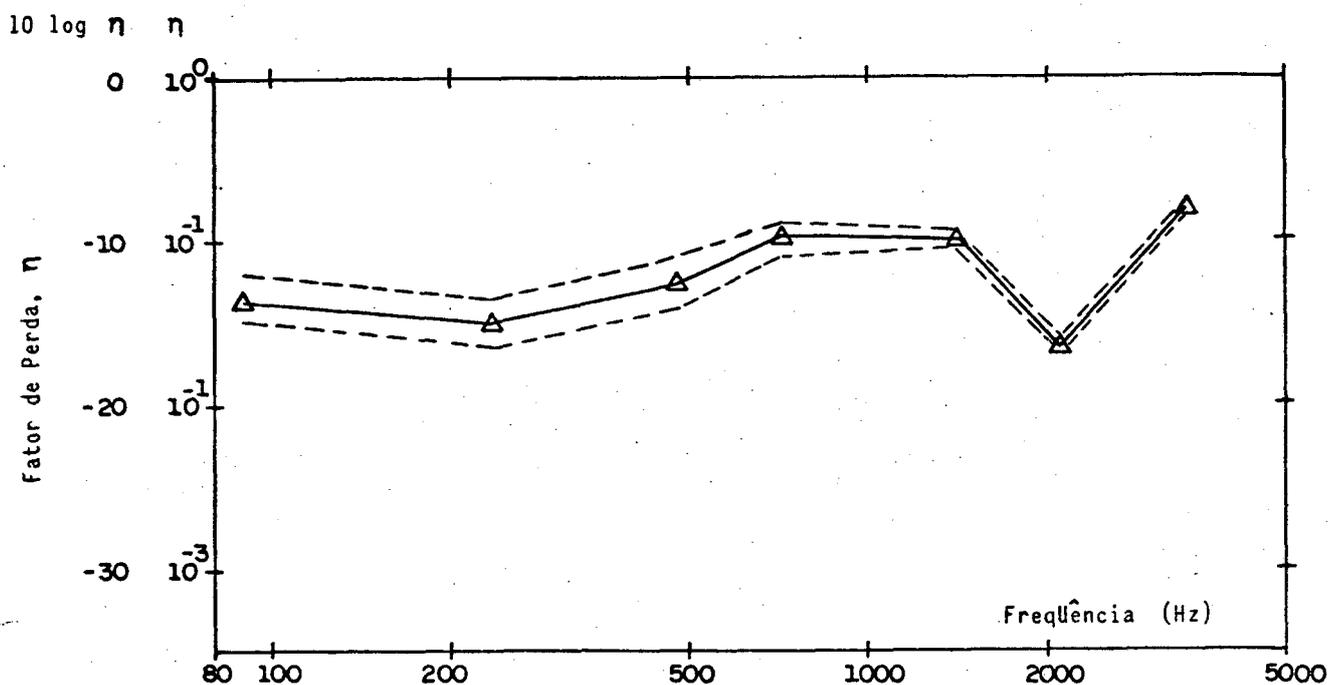


FIGURA A.1 - Dispersão dos resultados obtidos na barra de secção quadrada 50x50mm, comprimento 1,70m, peso do conjunto barra cheia 12,5kg, grãos 2,4 a 4,2mm, para três medições.

Conforme pode-se observar através da figura acima, a dispersão é mais acentuada nas baixas frequências, enquanto que os resultados são bastante consistentes nas altas frequências. Mesmo assim a diferença máxima observada entre os valores de três medições não ultrapassam a 3dB.