

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DOS
DOIS MICROFONES PARA MEDIÇÃO
DE CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS
DE AMOSTRAS FEITAS DE CINZAS
DE CARVÃO MINERAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA

U L F H E R M A N N M O N D L

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
FEVEREIRO 1986

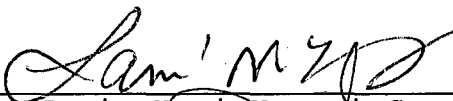
DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DOS DOIS MICROFONES
PARA MEDIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE
AMOSTRAS FEITAS DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL

U L F H E R M A N N M O N D L

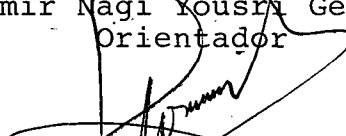
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

M E S T R E E M E N G E N H A R I A

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA - ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: VIBRA
ÇÕES E RUÍDO; E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GR
ADUAÇÃO.

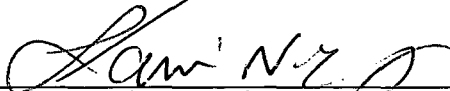


Prof. Samir Nagi Yousri Gerges , Ph.D
Orientador

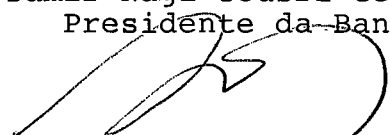


Prof. Clóvis Raimundo Maliska , Ph.D.
Coordenador

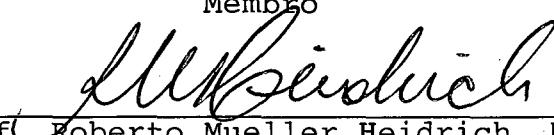
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Samir Nagi Yousri Gerges , Ph.D.
Presidente da Banca



Prof. Moyses Zindeluk , D.Sc.
Membro



Prof. Roberto Mueller Heidrich, M.Eng.
Membro

À minha esposa ANGELA
meus filhos ASTRID, HERMANN
e STEPHANIE

AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar os seguintes agradecimentos:

Ao Prof. Samir N.Y. Gerges, pelo seu empenho e dedicação aos trabalhos de orientação.

Ao Eng. Nelson G.P. Nogueira pelo apoio dado, sem o qual não seria possível a conclusão desta dissertação.

Aos Profs. Antonio René Paula Leite, Cassimiro Ayres Cardoso e ao Eng. Vladimir K. Chebrat aos quais muito devo em minha carreira de engenheiro

À todos os professores e funcionários da UFSC pelos ensinamentos e apoio técnico.

Ao Eng. Robson Veiga pelo desenvolvimento de ladrilhos acústicos a base de cinza de carvão e ao seu empenho para continuação das pesquisas tecnológicas deste material.

INDICE

Resumo.....	1
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	
1.1- Generalidades.....	2
1.2- Objetivos do Trabalho.....	3
1.3- Referências Bibliográficas.....	5
Capítulo 2 - MATERIAIS DE CINZA DE CARVÃO	
2.1- Ocorrências de Carvão no Brasil.....	6
2.2- Utilização do Carvão.....	7
2.3- Geração de Eletricidade com Carvão.....	8
2.4- Problemas Ambientais Produzidos.....	9
2.5- Aplicação da Cinza Pesada.....	9
2.6- Fabricação de Placas Acústicas.....	10
2.7- Características Físicas e Acústicas das amostras de Ladrilhos.....	13
2.8- Referências Bibliográficas.....	17
Capítulo 3 - REVISÃO FÍSICO-MATEMÁTICA DA ABSORÇÃO E IMPEDÂNCIA ACÚSTICA	
3.1- Generalidades.....	18
3.2- Medição da Absorção Acústica no Tubo de Impedância.....	20
3.3- Impedância Acústica Determinada no Tubo de Impedância.....	22
3.4- Absorção Acústica pela Técnica de Dois Microfones.....	24
3.5- Impedância Acústica Superficial pela Técnica de Dois Microfones.....	26

3.6- Referências Bibliográficas.....	29
--------------------------------------	----

Capítulo 4 - TÉCNICAS DE MEDIÇÃO ACÚSTICA USADAS

4.1- Geral.....	30
4.2- Tubo de Impedância.....	31
4.2.1- Sistema Eletro-acústico.....	31
4.2.2- Medição da Absorção e Impedância....	32
4.3- Técnica dos Dois Microfones.....	33
4.3.1- Sistema Eletro-acústico.....	33
4.3.2- Sistema Computacional.....	34
4.3.3- Preparação e Ajustes físicos de Medição.....	37
4.3.4- Cálculo Digital das Funções Auxiliares.....	44
4.3.5- Medição da Função de Transferência e Cálculo da Absorção Acústica.....	47
4.4- Referências Bibliográficas.....	51

Capítulo 5 - ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

5.1- Influência da Forma do Espectro.....	52
5.2- Repetibilidade.....	58
5.3- Variação da Distância entre os Microfones e a Amostra.....	60
5.4- Comparação com Dados Obtidos no Tubo de Impedância.....	62

Capítulo 6 - RESUMO E CONCLUSÕES

6.1- Resumo.....	66
------------------	----

6.2- Materiais Acústicos feitos de Cinzas de Carvão.....	67
6.3- Técnica dos Dois Microfones.....	68
6.3.1- Vantagens da Técnica dos Dois Microfones.....	68
6.3.2- Grau de Precisão.....	68
6.3.3- Fontes de Imprecisão.....	69
6.3.4- Sugestões de Estudos Posteriores....	69

RÉSUMÉ

Acoustic tiles made of ashes of several granulometries and agglomerates with resinous epoxy glue were manufactured. Several samples tests were performed by the 2 microphones technique, showing that the material has good acoustic properties. A revision of the theory used in measuring tubes of classical impedance was developed and formulae for measuring absorption and acoustic impedance by the 2 microphones technique were developed, applying an equation developed by other authors who applied other theoretical formulations. The technology of measurement used was described as well as apparatus and processes used. A series of essays being made to verify the exactness of the 2 microphones technique. Several aspects of the results were discussed, as well as the comparison with the results of other methods. Both methods - classical impedance and 2 microphones - show a good agreement. Finally, posterior studies for deeper knowledge in the acoustic measurement area by the 2 microphones technique were suggested.

RESUMO

Fabricaram-se ladrilhos acústicos, feitos de cinzas de diversas granulometrias e aglomerados com cola de resina epoxídica. Testaram-se diversas amostras pela técnica de dois microfones, demonstrando o material ter boas propriedades acústicas. Desenvolveu-se uma revisão da teoria usada em medições no tubo de impedância clássico e desenvolveu-se fórmulas para medição de absorção e impedância acústica pela técnica dos dois microfones a partir da equação da onda acústica plana, chegando-se as mesmas equações desenvolvidas por outros autores que partiram de outras formulações teóricas. Foi descrita a tecnologia de medições empregada, bem como a aparelhagem e processos usados, efetuando-se uma série de ensaios para verificação da exatidão da técnica dos dois microfones, discutindo-se diversos aspectos dos resultados, bem como sua comparação com os obtidos no tubo de impedância clássico, obtendo-se boa concordância entre ambos métodos. Finalizando-se foram sugeridos estudos posteriores para aprofundamento dos conhecimentos na área da medição acústica pela técnica dos dois microfones.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1- GENERALIDADES

A medição de propriedades acústicas de pequenas amostras de materiais já é praticada nas últimas décadas, no tubo de impedância, existindo uma norma desde 1958 (ASTM - 384-58) que padroniza os procedimentos de medição e cálculo de absorção acústica e da impedância acústica específica [1.01].

Com o desenvolvimento da computação digital de processamento e análise de sinais, Seybert e Ross [1.02] baseados em teorias estatísticas desenvolveram um método de determinação de propriedades acústicas usando excitação por ruído branco e medição por dois microfones.

Posteriormente Chung e Blaser [1.03] desenvolveram um método de medidas acústicas em tubos com uso da técnica de dois microfones e funções de transferência, usando teorias de coerência estatística.

Recentemente Gerges, Andrade e outros [1.04] apresentaram uma equação para determinação do coeficiente de absorção acústica através dos sinais dos dois microfones, baseando-se em teoria de ondas planas.

A determinação de propriedades acústicas pela técnica dos dois microfones foi a evolução natural do método clássico do tubo de impedância, com a leitura sequencial em diversas frequências e pontos dentro de um tubo substituída pela leitura simultânea em dois pontos pré-determinados, de todas as frequências envolvidas na medição.

1.2- OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho objetiva apresentar um novo material de absorção acústica, feito a partir de cinzas de carvão, avaliando-se as suas propriedades acústicas, e desenvolver um formulário para a técnica de dois microfones, para determinação da absorção e impedância acústica, descrevendo-se a técnica de medição, discutindo-se os resultados e apresentando conclusões.

No Capítulo 2 trata-se da problemática da produção de cinzas pesadas pela queima de carvão, bem como o uso de cinza na fabricação de ladrilhos acústicos absorvedores de ruído.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão da teoria físico-matemática empregada no tubo de impedância e desenvolvendo-se equações para absorção e impedância de materiais em tubo, com o uso da técnica de dois microfones e funções de transferência, partindo-se da equação de ondas planas.

A tecnologia de medição empregada é descrita no Capítulo 4.

dando ênfase a todos os aspectos importantes dos procedimentos de medição e cálculo.

No Capítulo 5 são avaliados e discutidos os resultados de medições efetuadas para evidenciar efeitos como a forma do espectro de excitação, ajustes e verificações do equipamento, repetibilidade das medições, influências do ruído de fonte e da distância da amostra ao primeiro microfone e comparação com medições feitas pelo método clássico.

Finalizando, o Capítulo 6 apresenta um resumo do trabalho, conclusões, mostrando as vantagens da técnica dos dois microfones, e sugestões para novas pesquisas visando futuros trabalhos para aperfeiçoamento desta técnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS - CAPÍTULO 1

- [1.01] STANDARD METHOD OF TEST IMPEDANCE AND ABSORPTION OF ACOUSTICAL MATERIALS BY OF THE TUBE METHOD - ASTM DESIGNATION C-384-58 (REAPPROVED 1972) - USA.
- [1.02] EXPERIMENTAL DETERMINATION OF ACOUSTIC PROPERTIES USING TWO-MICROPHONE RANDOM-EXCITATION TECHNIQUE - A.F. Seybert, D.F. Ross - J. Acoust. Soc. Am. May-1977.
- [1.03] TRANSFER FUNCTION METHOD OF MEASURING IN-DUCT ACOUSTIC PROPERTIES, J.Y. Chung and D.A. Blaser - I Theory / I Experiment - J. Acoust. Soc. Am. September-1980.
- [1.04] MEDIÇÃO DE ABSORÇÃO ACÚSTICA DE MATERIAIS COM A TÉCNICA DE DOIS MICROFONES - Samir N.Y. Gerges, Ednardo B. de Andrade, Renato T. Vargas e Ricardo R. Damasceno - VIII COBEM - São José dos Campos-SP. Dezembro 1985.
- [1.05] ASTM COMMITTEE-E 33 - SUBCOMITEE E-3301-A, Impedance tube method for measuring sound absorption materials - "Preparing revisions to test method C-384 for impedance and absorption of acoustical materials by the impedance tube method to include the microphone in-duct method.

CAPITULO 2

2- MATERIAIS DE CINZA DE CARVÃO

2.1- OCORRÊNCIAS DE CARVÃO NO BRASIL

O carvão mineral em quantidades economicamente importantes ocorre nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, em sedimentos do Grupo Tubarão, de idade permocarbonífera na formação Rio Bonito [2.01].

No nível atual de conhecimento, 91,45% das reservas brasileira conhecidas encontram-se no Rio Grande do Sul, 8,27% em Santa Catarina, existindo algumas pequenas ocorrências no Paraná e São Paulo [2.01] [2.02].

Em Santa Catarina as reservas são da ordem de $1,0 \times 10^9$ t [2.03], concentrando-se as principais ocorrências desde o sul de Criciúma até o norte de Orleães, numa extensão de cerca de 80 km por 30 km de largura.

No Rio Grande do Sul as reservas de carvão espalham-se por um

espaço geográfico mais dilatado que em Santa Catarina, abrangendo as reservas conhecidas cerca de 21×10^9 t. As principais reservas localizam-se em Candiota próximo a Bagé, Irui, nas imediações de Cachoeira do Sul, Leão-Butiá próximo de Butiá, Charqueadas perto de São Jerônimo e Gravataí-Morungava entre o leste de Porto Alegre e o mar em Tramandai [2.01] [2.02] [2.03].

No Paraná as reservas são de ordem de 64×10^6 t, cifra modesta comparada com os dois outros estados já citados.

2.2- UTILIZAÇÃO DO CARVÃO

Os carvões dos diversos estados tem características diversas em termos de utilização.

No Paraná a produção de carvão destina-se a Termoelétrica de Figueira de 30 Mw e as indústrias Klabin, sendo o carvão paranaense do tipo vapor, com alto teor de enxofre, não tendo aplicação em siderurgia e coque.

Em Santa Catarina o carvão tem características siderúrgicas, sendo beneficiado no Lavador de Capivari em Tubarão, separando-se as frações metalúrgicas e vapor. A maior parte da fração vapor é consumida pelo complexo termoelétrico Jorge Lacerda e o restante no setor industrial [2.03].

No Rio Grande do Sul a quase totalidade das reservas, constitui-se de carvão vapor destinado basicamente à geração de energia elétrica, processos de queima para aquecimento, indústria de cimento e outros, sendo atualmente a maior utilização para a geração de energia elétrica na U.T. Candiota [2.03].

2.3- GERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM CARVÃO

No Sul do Brasil, a geração de eletricidade é principalmente hidráulica, sendo a termoeletricidade usada em caráter complementar, para atenuar o efeito de estiagens, visto as usinas termelétricas serem menos sensíveis a secas. A potência instalada de geração termoelétrica é de 140 MW, sendo as usinas em construção de 1020 MW e as planejadas de 2680 MW.

A distribuição pelos estados sulinos das usinas em operação é a seguinte:

a) PARANÁ:		TOTAL
U. T. Figueira		30 MW
b) SANTA CATARINA		
U. T. Jorge Lacerda I	100MW	
U. T. Jorge Lacerda II	132 MW	
U. T. Jorge Lacerda III	250 MW	482 MW
c) RIO GRANDE DO SUL		
U. T. Candiota I	126 MW	
U. T. Charqueadas	72 MW	
U. T. São Jeronimo	30 MW	228 MW

As usinas atualmente em construção nos estados sulinos são:

a) SANTA CATARINA:		
U. T. Jorge Lacerda IV	350 MW	350 MW
b) RIO GRANDE DO SUL:		
U. T. Candiota II	320 MW	
U. T. Jacuí I	350 MW	670 MW

O Plano 2000 da ELETROBRAS, prevê para os estados sulinos a construção de mais oito usinas termelétricas a carvão até o ano 2000, perfazendo uma potência instalada da ordem de 2680 MW.

2.4- PROBLEMAS AMBIENTAIS PRODUZIDOS

O processo da queima de carvão pulverizado nas caldeiras de usinas termelétricas, produz emissão de gases como CO₂, NO₂, SO₂ e poeiras (cinzas volantes) na atmosfera, calor da água de refrigeração dos condensadores nos rios, além da cinza pesada.

O maior volume de poluentes são as cinzas pesadas, as quais são removidas do fundo das caldeiras por transporte hidráulico sob a forma de lama bombeada. A destinação das cinzas pesadas são imensos depósitos cercados por diques ocupando grandes extensões de terras aproveitáveis para a agricultura.

Estes depósitos de cinzas pesadas liberam diversos poluentes, como poeiras finas que se espalham nas imediações por ocasião de ventanias, além de haver a contaminação dos aquíferos por lixiviação de metais pesados. [2.05] [2.06] [2.07]

2.5- APLICAÇÃO DA CINZA PESADA

As quantidades de cinzas pesadas produzidas numa termelétrica, depende principalmente do conteúdo das cinzas do carvão empregado. Os carvões usados nas usinas catarinenses têm cerca de 45% de conteúdo em cinzas, enquanto nas usinas gaúchas tem cerca de 55%. [2.01] [2.03]

Uma usina de 350 MW que usa carvão gaúcho, tem uma previsão anual de produção de cinzas da ordem de 500.000 t. [2.07]

As cinzas pesadas são um grande problema na geração de eletricidade à carvão. Existem diversas aplicações, desde o uso como material de aterros para construção de estradas e terraplenos, de tijolos, agregados para fabricação de concreto leve, etc, tendo estas aplicações todavia, como fator limitante os custos de

transportes para os grandes centros consumidores.

As U.T. de Tubarão e Candiota encontram-se longe dos grandes centros consumidores, prevendo-se grandes problemas para aproveitamento das cinzas pesadas. A U.T. de Jacuí I por localizar-se perto de Porto Alegre tem um maior potencial para utilização de suas cinzas pesadas.

Para ajudar na solução deste problema, pesquisou-se a fabricação de ladrilhos acústicos os quais seriam utilizáveis no lugar de lã de rocha ou vidro, materiais muito custosos, com um possível uso em ambientes industriais e residenciais para a redução de ruídos.

2.6- FABRICAÇÃO DE PLACAS ACÚSTICAS

Para fabricação das placas acústicas utilizou-se cinza pesada, proveniente da bacia de cinza da U.T. Jorge Lacerda III.

A composição granulométrica de uma amostra típica desta bacia está indicada na tabela e gráfico adiante indicado.

TAB. 2.1- GRANULOMETRIA DAS CINZAS

PENEIRAS		PESO RETIDO	% MATERIAL RETIDO INDIVIDUAL ACUMULADO	
mm	pol	(kg)	%	%
4,8	4	0,034	1,82	1,82
2,4	8	0,081	4,34	6,16
1,2	16	0,099	5,31	11,47
0,6	30	0,177	9,49	20,96
0,3	50	0,222	11,90	32,86
0,15	100	0,796	40,89	73,75
FUNDO		0,490	26,25	100,00
TOTAL		1,866	100,00	-

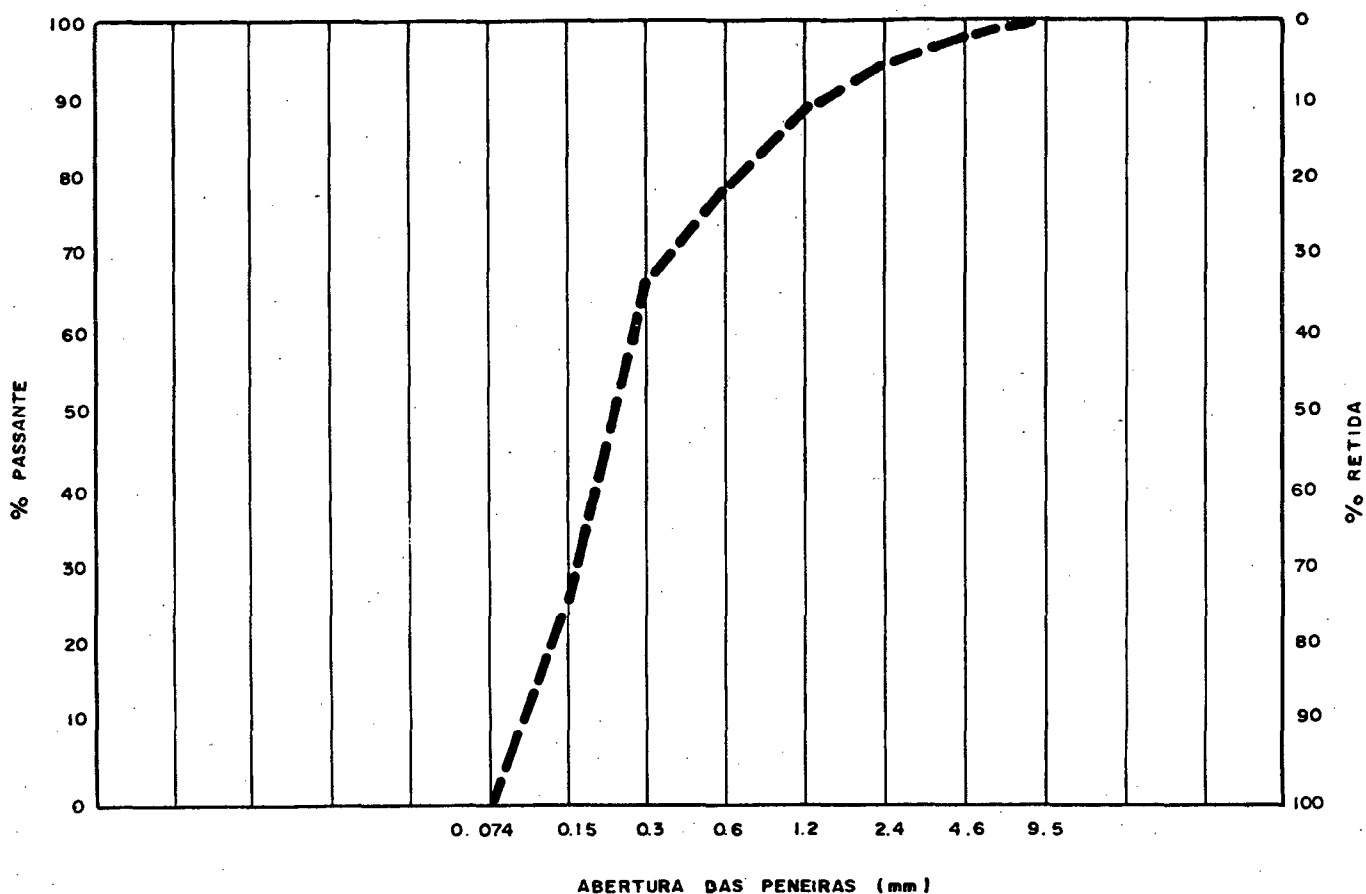


Fig. 2.1- Curva granulométrica das cinzas pesadas da U.T. Jorge Lacerda III

A idéia básica na fabricação dos ladrilhos acústicos, consiste na aglomeração de grãos de uma certa finura, de modo a deixar vazios porosos, da ordem de 50%, usando-se como aglomerante uma cola de resina epoxídica a qual é aplicada em quantidades tais que haja colagem dos pontos de ligação entre os grãos de cinza.

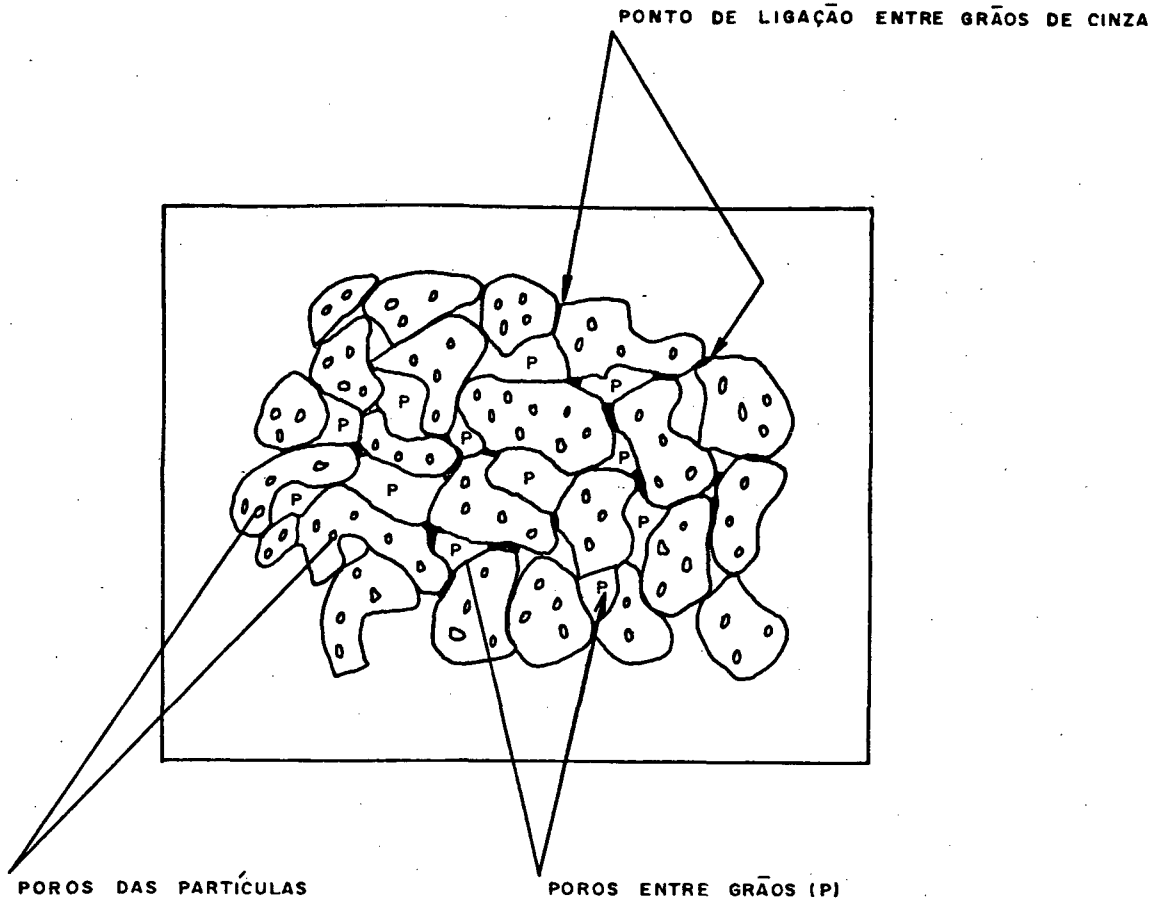


Fig. 2.2- Aspecto macroscópico da ligação dos grãos de cinza

Para cada tamanho de grão, testou-se quantidades variáveis de cola, até chegar-se num ponto ótimo onde havia um compromisso entre a solidez da peça e sua porosidade.

O fluxograma do processo de fabricação das placas acústicas está indicado na figura 2.3.

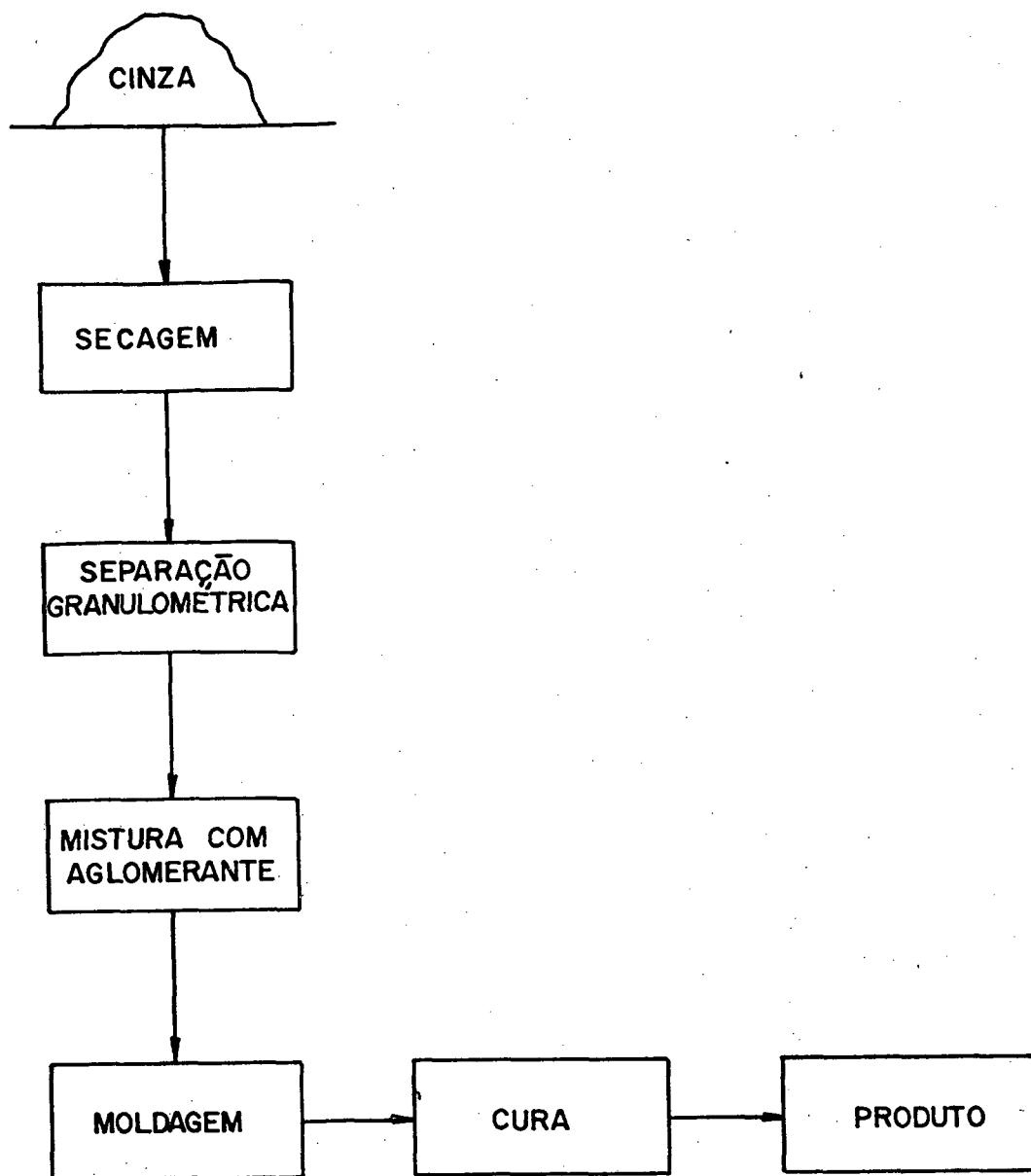


Fig. 2.3- Fluxograma do processo de fabricação de placas acústicas

2.7- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ACÚSTICAS DAS AMOSTRAS DE LADRILHOS

Quanto as propriedades físicas, o objetivo na construção dos ladrilhos acústicos foi conseguir-se um produto que tivesse uma porosidade adequada, para um mínimo de peso, além de uma razoável, resistência física ao manuseio.

Fabricaram-se ladrilhos de diversas granulometrias, variando de 8 a 30 malhas/(pol²), os quais foram preliminarmente ensaiados em tubo de impedância clássico, revelando-se os ladrilhos de malhas 16 e 30 os mais promissores.

Em duas amostras feitas com cinzas de malhas 16 e 30, ensaiadas no Laboratório de Materiais da UFSC, obteve-se densidades de 0,703 e 0,765 g/cm³, respectivamente, em porosidades de 52,93 a 53,57%.

As amostras de malhas 16 e 30 foram então selecionadas para os ensaios acústicos, objeto deste trabalho. Alguns valores de absorção estão indicados na Tab. 2.2 e nos gráficos anexos.

TAB. 2.2- ABSORÇÃO ACÚSTICA*

FREQ. (Hz)	$\alpha \neq 16$	$\alpha \neq 30$
250	0,070	0,115
500	0,125	0,190
750	0,240	0,320
1000	0,320	0,410
1250	0,475	0,630
1500	0,700	0,815
1750	0,910	0,975
2000	0,990	0,995
2250	0,950	0,940

* Medida em Tubo de Impedância

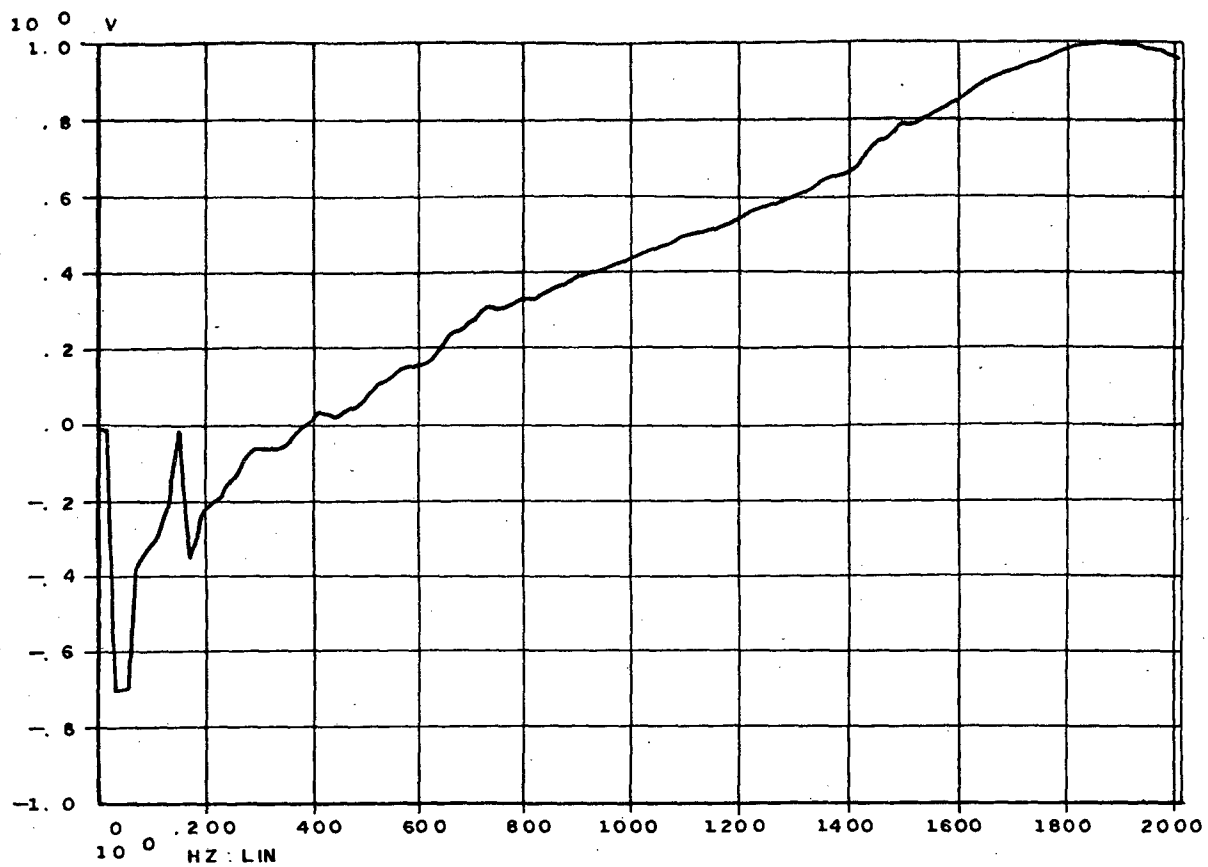


Fig. 2.4a-Absorção acústica de ladrilho fabricado com cinza de malha 16 e $h=3,0\text{cm}$ (medido com técnica de dois microfones)

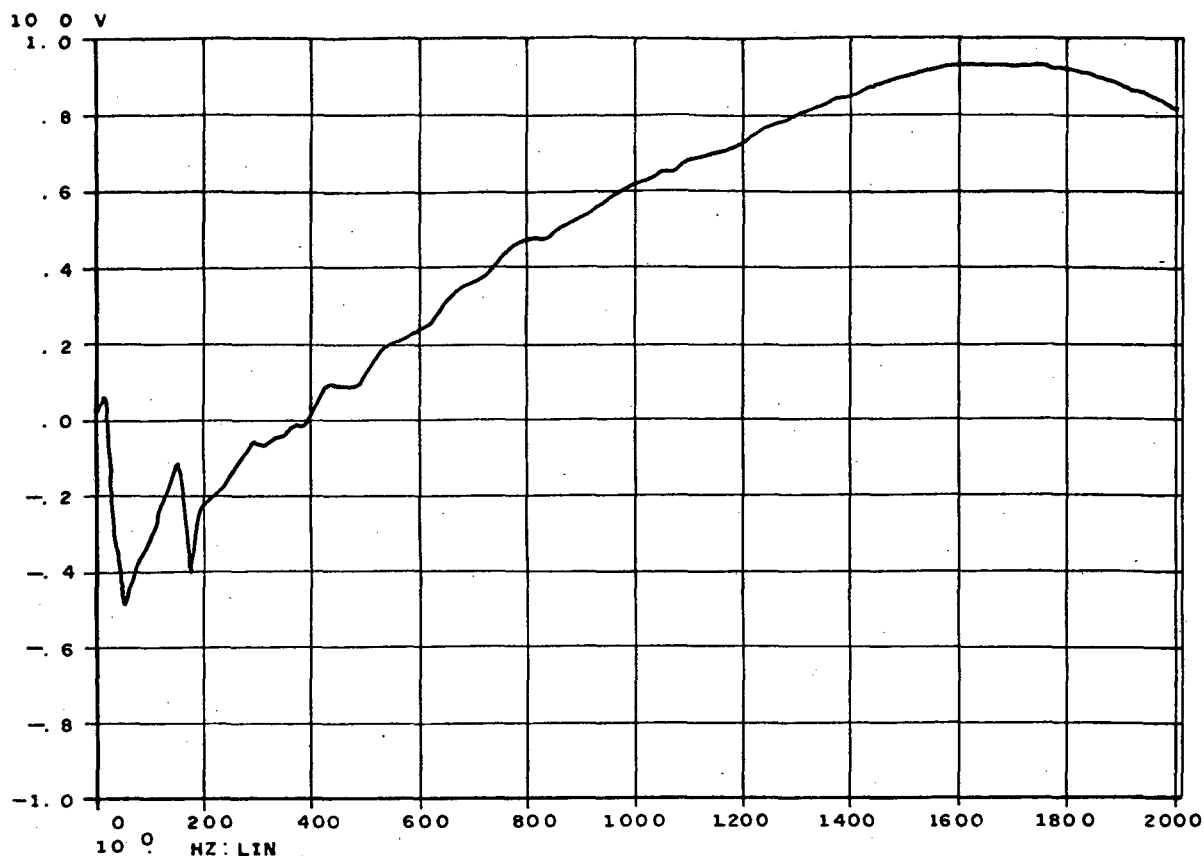


Fig. 2.4b- Absorção acústica de ladrilho fabricado com cinza de malha 30 e $h=3,0\text{cm}$ (medido com técnica de dois microfones)

Os ladrilhos fabricados com cinza têm boas propriedades de absorção acústica, podendo ter aplicação em ambientes industriais e residenciais, tendo esta última também, interessantes propriedades decorativas.

Em termos tecnológicos, seria interessante um estudo econômico de outras colas de custo menor que as de resina epoxídica, além do desenvolvimento de técnicas de colagem dos ladrilhos em paredes, para tornar possível o uso em ambientes industriais e residenciais.

2.8- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS - CAPITULO 2

- [2.01] GEOLOGIA DO BRASIL - Setembrino Petri, Vicente José Fulfaro - São Paulo: T.A. Queiroz: Editora da Universidade de São Paulo, 1983. pp.550-557 (G.Carvão Mineral).
- [2.02] GEOGRAFIA DO BRASIL - REGIÃO SUL - Vol. 5, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Rio de Janeiro, 1977.pp.314-320/439-441.
- [2.03] PLANO DE SUPRIMENTO AOS REQUISITOS DE ENERGIA ELÉTRICA ATÉ O ANO 2000-Ministério das Minas e Energia-ELETOBRAS S/A, 1982. pp.18-20/28-32.
- [2.04] PALESTRA DO PRESIDENTE DA ELETROBRAS NA ELETROSUL- Gal. Costa Cavalcanti, 25/05/82 - PLANO 2000.
- [2.05] PROJETO ESTUDO DA VULNERABILIDADE A CONTAMINAÇÃO DOS MANANCIAIS SUBTERRANEOS DECORRENTE DA EXTRAÇÃO DE CARVÃO MINERAL - MME-CPRM - Porto Alegre, 1984.
- [2.06] CENTRALES TERMOELECTRICAS - V.Ya.Rizhkin - Vol.II, Moscou - Editorial Mir, 1979. pp.222-224.
- [2.07] PLANING, ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ELECTRIC POWER GENERATION FACILITIES. Jack H. Willen Brock - H. Kandolph Thomas - John Wiley & Sons, New York, 1980. pp.135-137.
- [2.08] USINA TERMELETRICA JACUI I, Estudo de Localização da Usina ELETROSUL S/A, maio 1984.

CAPITULO 3

REVISÃO FÍSICO-MATEMÁTICA DA ABSORÇÃO E IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

3.1- GENERALIDADES

A absorção e a impedância acústica são dois parâmetros físicos que expressam importantes características acústicas dos materiais

A absorção acústica é um número adimensional, que relaciona as energias acústicas absorvidas e incidentes sobre um material, enquanto a impedância acústica expressa a resistência de uma superfície, à absorção de ondas incidentes.

A determinação destes parâmetros em termos clássicos é efetuada num aparelho denominado tubo de impedância, no qual é medida a distribuição da pressão acústica de ondas estacionárias, resultante de ondas incidentes e refletidas sobre a amostra de um determinado material, conforme indicado na figura 3.1. [3.01]

Nas medições, as ondas acústicas incidentes e refletidas são planas e paralelas à superfície da amostra.

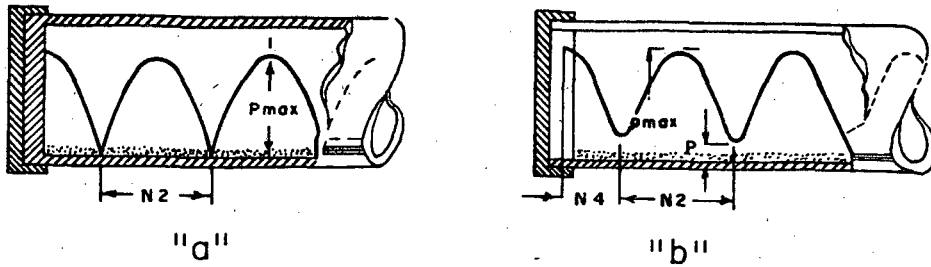


Fig. 3.1- Ondas estacionárias num tubo de impedância, resultante de ondas incidentes e refletidas ("a" - determinação rígida, "b" - amostra de material absorvedor)

A determinação destes parâmetros pode também ser efetuada, pela técnica de dois microfones, num dispositivo semelhante ao tubo de impedância, onde a medição da pressão acústica de dois microfones adequadamente situados, em locais diferentes, é usada com processamento de dados posterior, na determinação da absorção e impedância acústica de uma amostra de material submetida a ondas acústicas incidentes, conforme indicado na fig. 3.2 [3.02].

Neste capítulo, será revisada a técnica de medição em tubo de impedância clássico, sendo posteriormente deduzidas as equações necessárias para a medição com a técnica de dois microfones.

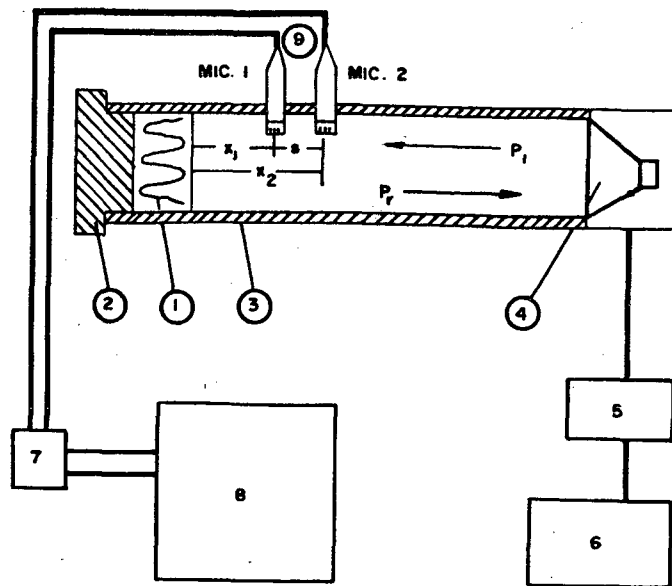


Fig. 3.2- Aparelho e instrumentação para medição acústica com a técnica de dois microfones

1. amostra de material acústico
2. terminação rígida
3. tubo de $d=10\text{cm}$
4. alto falante
5. amplificador de potência
6. gerador de sinais
7. pré-amplificador de microfones de dois canais
8. analisador Fourier digital
9. dois microfones

3.2- MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO ACÚSTICA NO TUBO DE IMPEDANCIA

Define-se a absorção acústica, para ondas normalmente incidentes sobre a superfície de um material, como a relação entre a energia acústica absorvida e a incidente, ou seja:

$$\alpha = E_a/E_i$$

$$(3.01)$$

onde: E_a = energia acústica absorvida (Watt)
 E_i = energia acústica incidente (Watt)
 α = coeficiente de absorção (adimensional)

Definindo-se ondas de pressões acústicas incidentes e refletidas $P_i(t, x)$ e $P_r(t, x)$ respectivamente como:

$$P_i(t, x) = A e^{j(\omega t + kx)} \quad (3.02)$$

$$P_r(t, x) = \underline{B} e^{j(\omega t - kx)} \quad (3.03)$$

onde: A = pressão acústica da onda incidente (N/m^2) (real)
 \underline{B} = pressão acústica da onda refletida (N/m^2) (complexo)
 e = base dos logaritmos naturais
 $j = \sqrt{-1}$
 ω = frequência circular da onda (rad/s)
 t = tempo (s)
 $k = \omega/c$ número de onda (1/m)
 c = velocidade de propagação do som no ar (m/s)
 x = distância da origem (m)

No tubo de impedância, tem-se um padrão de ondas estacionárias produzidas pela onda incidente e refletida, conforme indicado nas figuras 3.1 e 3.3.

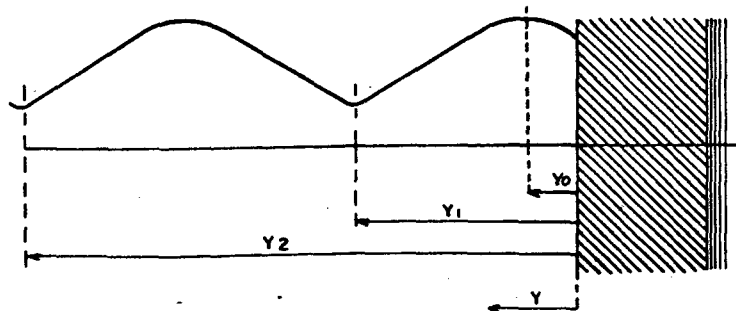


Fig. 3.3- Padrão de ondas estacionárias produzido no tubo de impedância

Pode-se provar que a absorção acústica no tubo de impedância é definida pela fórmula: [2.01]

$$\alpha = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \quad (3.04)$$

onde: $n = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \left| \frac{A+B}{A-B} \right|$

P_{\max} = pressão máxima da onda estacionária

P_{\min} = pressão mínima da onda estacionária

No tubo de impedância " P_{\max} " corresponde a sobreposição das ondas incidente e refletida, enquanto " P_{\min} " corresponde ao cancelamento de ambas.

3.3- IMPEDÂNCIA ACÚSTICA DETERMINADA NO TUBO DE IMPEDÂNCIA

Define-se a impedância acústica, como a relação complexa entre a pressão acústica e a velocidade da partícula, na superfície de um material, expressando-se matematicamente como:

$$Z = \frac{P}{Y} \quad (\text{Ns/m}^3) \quad (3.05)$$

$\underline{Z} = R + jX = \text{impedância acústica (complexa)}$

$\underline{P} = \text{pressão acústica (complexa) (N/m}^2\text{)}$

$\underline{v} = \text{velocidade da partícula (complexa) (m/s)}$

$R = \text{componente resistiva}$

$X = \text{componente reativa}$

A impedância acústica é expressa por um número complexo, pois normalmente existe diferença de fase entre a pressão acústica e a velocidade da partícula. Em termos físicos, a componente real se relaciona com a energia acústica absorvida, enquanto a imaginária com a energia armazenada.

Partindo-se das equações das ondas incidentes e refletidas (3.02 e 3.03) na origem ($x=0$), pode-se escrever que a impedância acústica é: [3.03]

$$\underline{Z} = \left(\frac{A+B}{A-B} \right) \rho c \quad (3.06)$$

Desenvolvendo-se convenientemente, chega-se a seguinte expressão da impedância acústica relativa.

$$\frac{\underline{Z}}{\rho c} = \frac{1}{1+r-2r \cos \Delta} [(1-r^2) + j2r \sin \Delta] \quad (3.07)$$

onde: $r = 1-\alpha$ - coeficiente de reflexão

$$\Delta = \left(\frac{2x_1}{x_2-x_1} - 1 \right) \pi \quad (\text{rad})$$

$x_1 = \text{distância do primeiro mínimo (m)}$

$x_2 = \text{distância do segundo mínimo (m)}$

$\rho = \text{densidade do ar (kg/m}^3\text{)}$

O ângulo da fase Δ entre a pressão acústica e a velocidade da partícula, tem seu diagrama vetorial indicado na figura 3.4, podendo

assumir valores positivos ou negativos. Um ângulo de fase negativo tem como sentido físico a ocorrência do primeiro máximo dentro da amostra do material testado, enquanto um ângulo positivo significa a ocorrência do primeiro mínimo fora da amostra do material testado.

Para a determinação da impedância acústica no tubo de impedância, é necessário a determinação da absorção da amostra e das distâncias dos dois primeiros mínimos, calculando-se o valor final com a fórmula 3.07.

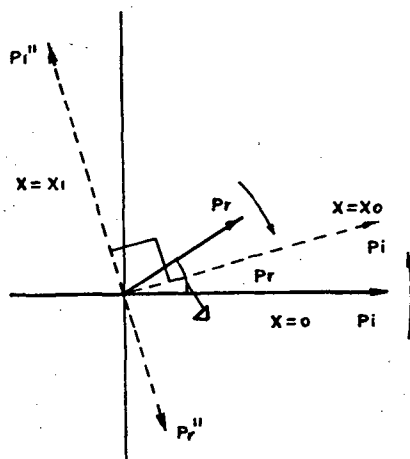


Fig. 3.4- Diagrama de fases entre a pressão acústica e a velocidade de partícula

3.4- ABSORÇÃO ACÚSTICA PELA TÉCNICA DE DOIS MICROFONES

A aparelhagem física para medições acústicas não difere substancialmente do tubo de impedância clássico. A única diferença consiste na fixação de dois microfones em posição adequada, conforme indicado na figura 3.2. [3.02].

Partindo-se das equações das ondas incidentes e refletidas (3.02) e (3.03), pode-se provar que a pressão acústica resultante das ondas incidentes e refletidas em "x₁" e "x₂" podem ser escritas respectivamente como:

$$P(x_1, t) = A e^{j\omega t} [e^{jkx_1} + (\underline{B}/A) e^{-jkx_1}] \quad (3.08)$$

$$P(x_2, t) = A e^{j\omega t} [e^{jkx_2} + (\underline{B}/A) e^{-jkx_2}] \quad (3.09)$$

Para posterior tratamento matemático, será definida uma função de transferência "H₁₂", entre os sinais captados nos microfones 1 e 2, resultante da relação entre as transformadas de Fourier de P(x₁, t) e P(x₂, t).

$$H_{12} = \frac{P(x_1, f)}{P(x_2, f)} = \frac{e^{jkx_1} + (\underline{B}/A) e^{-jkx_1}}{e^{jkx_2} + (\underline{B}/A) e^{-jkx_2}} \quad (3.10)$$

Manipulando-se adequadamente (3.10) pode-se explicitar "H₁₂", chegando-se a :

$$(\underline{B}/A) = \frac{H_{12} - e^{jk(x_1-x_2)}}{e^{-jk(x_1-x_2)} - H_{12}} e^{j2kx_2} \quad (3.11)$$

Fazendo-se "(x₂ - x₁) = s", distância entre microfones tem-se:

$$(\underline{B}/A) = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} + H_{12}} e^{-j2kx_2} \quad (3.12)$$

O módulo de (3.12) pode ser escrito como:

$$|\underline{B}/A| = \left| \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} + H_{12}} \right| \quad (3.13)$$

O quadrado de (3.13) expressa o coeficiente de reflexão (3.03)

$$r = \left| \frac{B}{A} \right|^2 \quad (3.14)$$

Conhecido o coeficiente de reflexão (3.14) e substituindo-se (3.13), tem-se que a absorção acústica pode ser escrita como:

$$\alpha = 1 - r = 1 - \left| \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} + H_{12}} \right| \quad (3.15)$$

A fórmula (3.15) em termos físicos, opera no domínio das frequências, visto "H₁₂" e e^{+jks} estarem expressas em frequência. A validade física da fórmula está condicionada a planicidade das ondas incidentes e refletidas, o que é conseguido operando-se abaixo da frequência de corte do tubo [3.02]. Um outro fator importante é a distância "s" que deve ser menor que meio comprimento de onda, para evitar que os dois microfones façam uma mesma leitura [3.02].

3.5- IMPEDANCIA ACÚSTICA SUPERFICIAL PELA TÉCNICA DE DOIS MICROFONES

Partindo-se das equações das pressões nos pontos x₁ e x₂ (3.08) e (3.09), pode-se escrever que a fórmula da pressão acústica no tubo é:

$$P(x,t) = A e^{j\omega t} [e^{jkt} + (B/A) e^{-jkx}] \quad (3.16)$$

A velocidade da partícula é definida como [3.03]:

$$v = - \frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \quad (3.17)$$

onde: ω = frequência circular (rad/s)

ρ = densidade do ar

$\frac{\partial P(x,t)}{\partial x}$ = derivada parcial de (3.16) em relação a "x".

Desenvolvendo-se 3.17, tem-se que a velocidade da partícula fica como:

$$v = - \frac{A e^{j\omega t}}{\rho c} [e^{jkx} - (B/A) e^{-jkx}] \quad (3.18)$$

Substituindo-se (3.16) e (3.18) em (3.05) tem-se que a impedância acústica em função de "x" pode ser escrita como:

$$Z(x) = - \rho c \left[\frac{e^{jkx} + (B/A) e^{-jkx}}{e^{jkx} - (B/A) e^{-jkx}} \right] \quad (3.19)$$

Na interface amostra acústica - ar do sistema considerado, tem-se "x=0", ficando então a impedância acústica da superfície como:

$$Z = \rho c \left[\frac{(B/A) + 1}{(B/A) - 1} \right] \quad (3.20)$$

Como dispõe-se no sistema de dois microfones que distam da superfície da amostra de "x₁" e "x₂" respectivamente, será necessário relacionar-se "A" e "B" em função das leituras das pressões resultantes nestes pontos.

Partindo-se da fórmula (3.10) do subcapítulo anterior e reescrevendo-a convenientemente, chega-se a uma relação de "(B/A)" em função de "H₁₂", "x₁" e "x₂", a qual resulta em:

$$(B/A) = \frac{e^{jkx_1} + H_{12}^{kx_2}}{H_{12} e^{-jkx_2} - e^{-jkx_1}} \quad (3.21)$$

Substituindo-se (3.21) em (3.20) e efetuando-se convenientemente manipulações, chega-se a uma fórmula da impedância acústica relativa da superfície da amostra em função de "H₁₂", "x₁" e "x₂"

$$\frac{Z}{\rho c} = j \frac{\text{sen } kx_1 - H_{12} \text{ sen } kx_2}{\text{cos } kx_1 - H_{12} \text{ cos } kx_2} \quad (3.22)$$

Como já foi aludido no sub-capítulo anterior, a validade da fórmula tem as mesmas condicionantes válidas para a fórmula da absorção acústica.

As duas equações (3.15) e (3.22) são confirmadas pelas deduções de Chung e Blaser, os quais partindo de funções de coerência estatística chegaram aos mesmos resultados. [3.04]

3.6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS - CAPITULO 3

- [3.01] INSTRUCTION MANUAL 4002 - Standing Wave Apparatus - Bruel & Kjaer Revision March 1979.
- [3.02] MEDIÇÃO DE ABSORÇÃO ACÚSTICA DE MATERIAIS COM A TÉCNICA DOS DOIS MICROFONES - VII COBEM - Dez. 1985. Samir N.Y. Gerges, Ednardo B. de Antunes, Renato T. Vargas, Ricardo K. Damasceno.
- [3.03] FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS - L. Kinsfer, A.R. Frey, A.B. Coppins, J.V. Sanders - John Willey & Sons, New York, 1982.
- [3.04] J.Y. CHUNG and D.A. BLASER, Transfer Function Method of Measuring In-duct Acoustical Propertics I. Theory - The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 68, n 3, 1980, pp.907-913.
- [3.05] STANDARD METHOD OF TEST FOR IMPEDANCE AND ABSORPTION OF ACOUSTICAL MATERIALS BY THE TUBE METHOD - ASTM - C384-58, reaproved 1972.

CAPITULO 4

TÉCNICAS DE MEDIÇÃO ACÚSTICA USADAS

4.1- GERAL

A essência do método de medição, consta em fazer-se para uma amostra as determinações das absorções e impedância relativa, tanto pelo método clássico como pelo de dois microfones, comparando seus resultados, visto o método clássico ser consagrado pelo uso, podendo ser empregado como referencial para aferição do método dos dois microfones.

Tendo-se em vista a grande sensibilidade da amostra de um mesmo material feita de moldes diferentes, escolheu-se duas peças de granulometria # 16 e # 30 de diâmetro = 10cm e h=3,0cm, as quais foram submetidas a ambos os métodos e comparadas.

A aparelhagem acústica para as medidas consta de um tubo de impedância clássico, ao qual foram acrescentadas algumas peças,

permitindo o uso da técnica de dois microfones.

4.2- TUBO DE IMPEDÂNCIA

4.2.1- SISTEMA ELETRO-ACÚSTICO

Para as medições pelo método clássico normalizado pela ASTM-C384, usou-se um aparelho de ondas estacionárias B&K, tipo 4002 para tubo de diâmetro de 10cm, utilizável para frequências variando de 90 Hz a 1800 Hz, conforme indicado na figura 4.1. [4.01] [4.04]

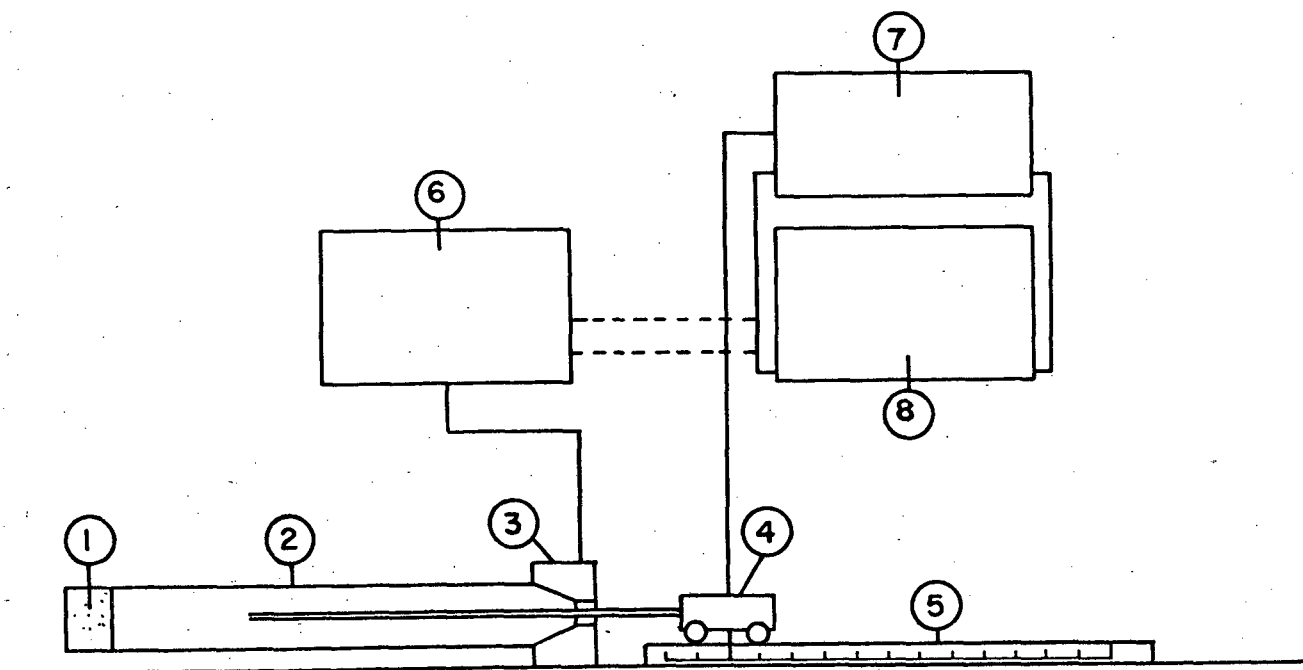


Fig. 4.1- Sistema eletro-acústico usado no método clássico

- 1- amostra de material acústico
- 2- tubo diâmetro=10cm
- 3- alto-falante
- 4- microfone móvel
- 5- escala de deslocamentos
- 6- gerador de senos B&K 1027

7- amplificador de medidas B&K 2607

8- filtro heterodino cativo B&K 2020

O conjunto consta de uma caixa com um alto-falante, o qual permite a passagem de um tubo sensor acoplado a um microfone sobre rodas o qual corre sobre uma escala, que permite medir-se o deslocamento do sensor, desde uma amostra fechada por uma terminação rígida numa extremidade do tubo até a outra. O auto-falante é excitado por um sinal gerado num gerador de senos B&K 1027, o qual também está acoplado a um filtro heterodino cativo B&K 2020. A pressão acústica medida pela haste do microfone móvel, é lida por um amplificador de medidas B&K 2607, o qual por sua vez, também é acoplado ao já citado filtro heterodino cativo B&K 2020.

A razão básica do acoplamento do gerador de senos e do amplificador de medidas ao filtro heterodino cativo, é fazer com que a medição se restrinja apenas a frequência do sinal injetado, filtrando-se qualquer distorção produzida pelo alto-falante do sistema. Deste modo entra no amplificador de medidas um sinal originário do microfone, na mesma frequência do sinal injetado no alto-falante. Tal procedimento evita flutuações nas medições garantindo maior precisão nas leituras.

4.2.2- MEDIÇÃO DA ABSORÇÃO E IMPEDANCIA

O procedimento de medição consta na geração de sinais para o alto-falante em frequências previamente selecionadas (tons puros), lendo-se no medidor do amplificador de medidas, os valores máximos e mínimos da onda estacionária gerada no tubo, movimentando-se o microfrone sobre rodas.

O aparelho dispõe de uma escala de medição adequada, a qual com alguns ajustes, permite a leitura direta da absorção, a partir da

pressão máxima da onda estacionária até o ~~primeiro mínimo.~~

Para a impedância é necessário efetuar-se adicionalmente a absorção, a leitura da posição dos dois primeiros mínimos, o que é efetuado pela posição marcada pelo microfone sobre a escala de deslocamento.

Conhecidos os valores da absorção " α " e das distâncias " x_1 " e " x_2 " calcula-se a impedância pela fórmula (3.22) citada no Capítulo 3

4.3- TÉCNICA DOS DOIS MICROFONES

4.3.1- SISTEMA ELETRO-ACÚSTICO

O Sistema eletro-acústico baseia-se em parte no tubo de impedância clássica, colocando-se na caixa dois alto-falantes distintos, além de fixar-se na outra extremidade permitindo o alojamento de dois microfones numa posição fixa, além de fixar a terminação rígida padrão com a amostra a ser medida numa posição adequada. Cada alto-falante está acoplado a um amplificador de potência, recebendo cada um, um sinal de um gerador de ruídos brancos. Os microfones estão ligados a um pré-amplificador e a uma fonte de potência, a qual liga os dois canais a um Analisador de Fourier HP-5451, conforme indicado na figura 4.2.

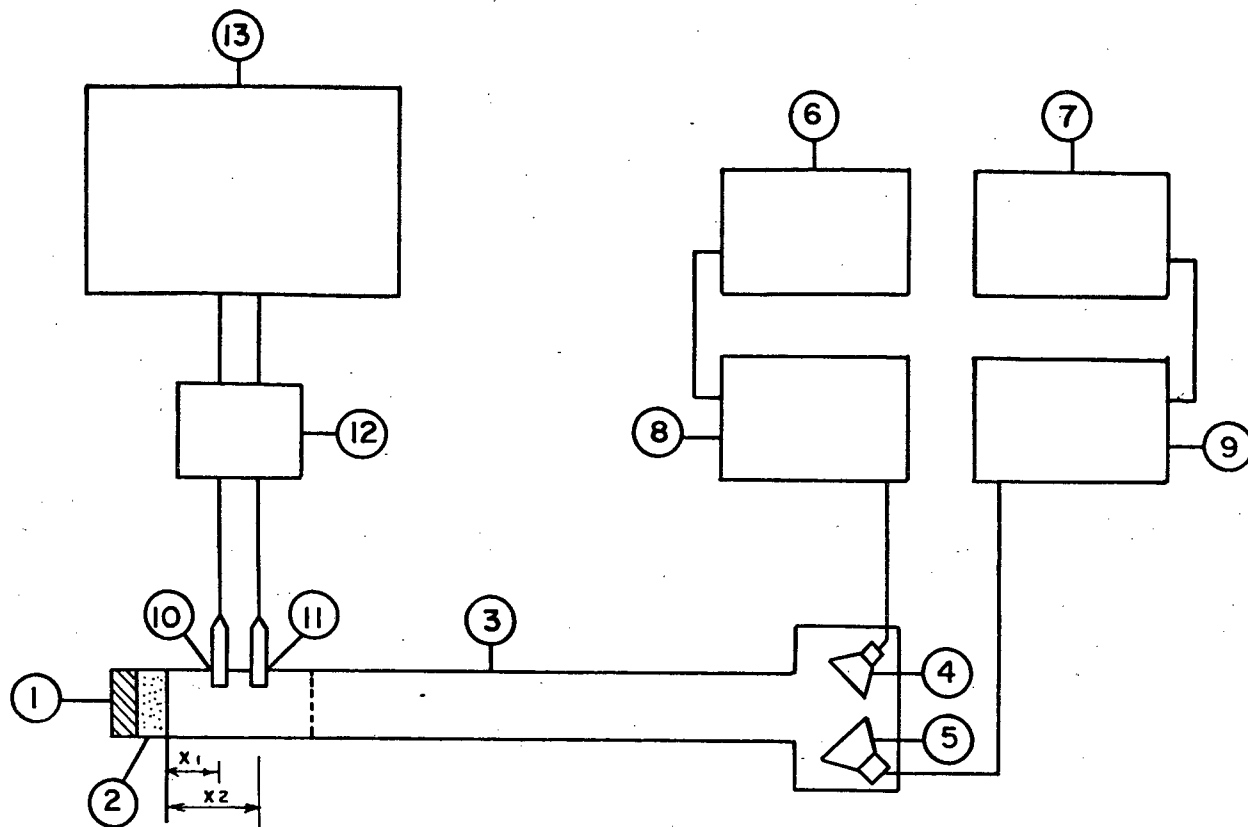


Fig. 4.2- Sistema eletro-acústico usado na técnica de dois microfones

- 1- terminação rígida
- 2- amostra de material
- 3- tubo diâmetro de 10cm
- 4 e 5- alto-falantes
- 6 e 7- geradores de sinais B&K 4205 e 1027
- 8 e 9- amplificadores de potência B&K 2706
- 10 e 11- microfones B&K 4165 mais pré-amplificador B&K 2619
- 12- fonte de tensão para microfones B&K 2807
- 13- analisador Fourier Digital HP-5451 C

4.3.2- SISTEMA COMPUTACIONAL

Para processamento dos sinais gerados no sistema eletro-acústico indicado na figura 4.2, usou-se o sistema computacional HP-5451C Fourier Analyser, que na configuração usada consta na entrada de

filtros analógicos HP-5440A, regulável para diversas frequências. Os sinais filtrados entram num conversor analógico-digital HP-5466B o qual permite a conversão simultânea de até quatro canais.

Após a conversão analógico-digital os sinais vão para o processador HP-54451, o qual dispõe de uma unidade de disco na qual residem programas fixos e variáveis, tendo uma capacidade de armazenamento de 2,6 M Bytes. Como unidades de saída dispõe-se do HP 5460 com uma tela para exibir funções, um terminal gráfico HP-7648A, para exibir funções e dados alfa-numéricos, acoplado a uma impressora térmica HP-9866 e por fim um plotador digital HP-7210A, para traçar gráficos exibidos na unidade de saída HP-5460.

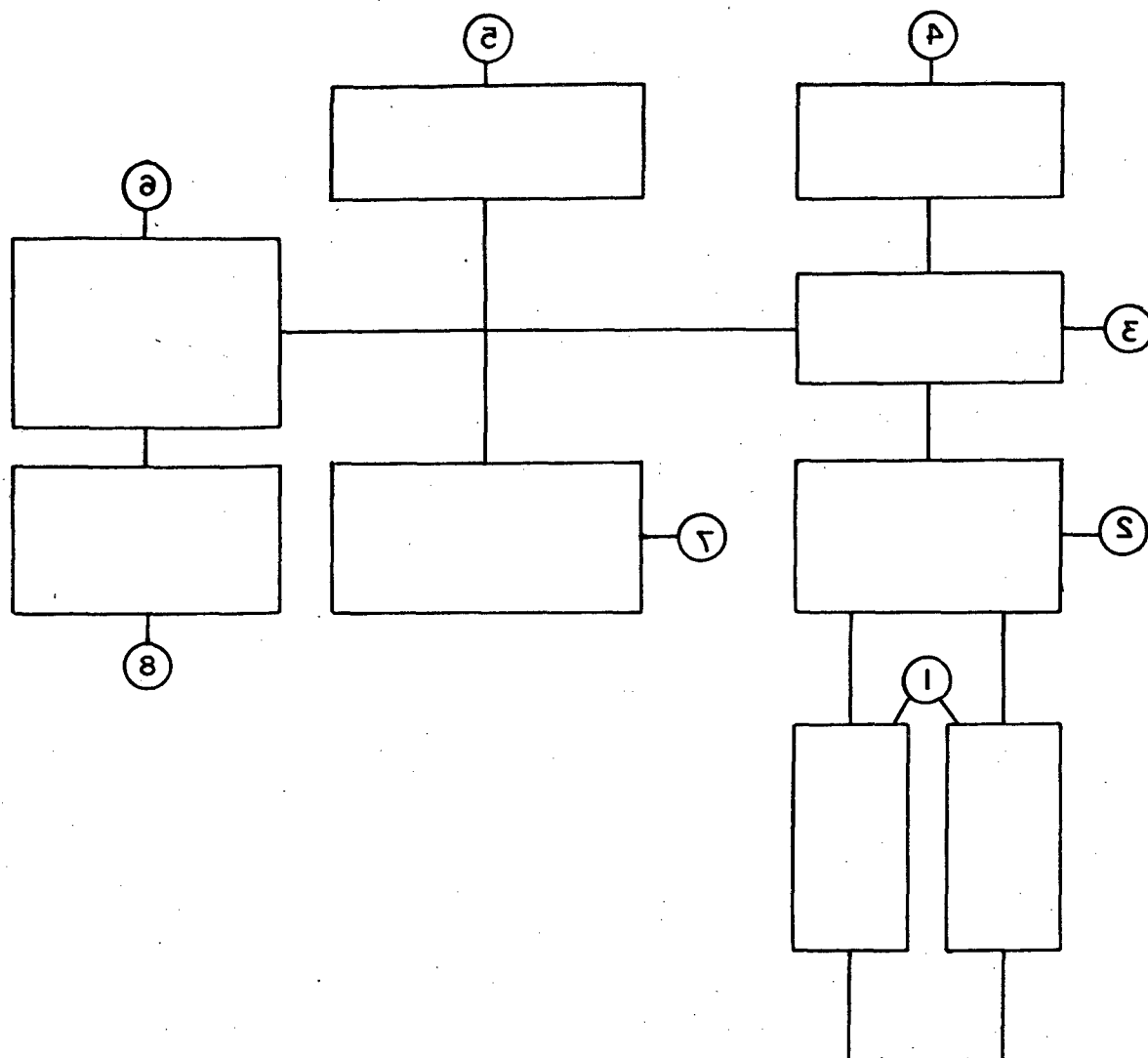


Fig. 4.3- Sistema computacional HP-5451C Fourier Analyser

1- dois filtros analógicos HP-5440 A

2- conversor analógico digital HP-5466 B

3- processador HP 54451 A

4- unidade de disco HP 7900 A

5- unidade de saída com tela HP 5460

6- terminal gráfico HP 7648 A

7- plotador digital HP 7210 A

8- impressora térmica HP 9866

O sistema HP-5451 C permite a entrada de dois canais simultaneamente, seu processamento e saída por diversas unidades, de acordo com as necessidades de operação.

O conjunto sistema eletro-acústico/computacional, foi ajustado e programado, para processar os sinais medidos nos microfones 1 e 2 de modo a calcular-se a absorção e impedância acústicas das amostras no tubo de medidas.

4.3.3- PREPARAÇÃO E AJUSTES FÍSICOS DE MEDIÇÃO

Uma vez montado o sistema de medição é necessária a execução de uma série de preparações e ajustes físicos, para que os valores digitais calculados com o sistema em funcionamento tenham sentido físico.

O procedimento para preparação e ajustes físicos de medição segue a seguinte ordem:

- escolha da faixa de frequência;
- medição do ruído de fundo;
- geração de sinal com intensidade adequada;
- equalização da resposta dos microfones;
- verificação da resposta dos microfones;
- ajuste das distâncias da amostra aos microfones.

a) Escolha da faixa de frequências:

As equações desenvolvidas nos capítulos anteriores baseiam-se no pressuposto físico das ondas incidentes e refletidas serem planas, o que é conseguido operando-se abaixo da frequência de corte do tubo. A frequência de corte em tubo de seção transversal circular é dada por: [4.03]

$$f_c = \frac{1,84 c}{\pi d} \quad (4.01)$$

onde:

c = velocidade de propagação do som no ar

d = diâmetro do tubo

Para o tubo nas medições de diâmetro = 10cm, tem-se que a frequência de corte vale:

$$f_c = \frac{1,8 * 343}{\pi * 0,1} = 2000 \text{ Hz}$$

Dai conclui-se que as medições serão feitas até 2000 Hz no tubo escolhido, visto valores superiores não terem significado físico. Usa-se então uma frequência de filtragem de 5000 Hz para evitar-se problemas de "aliasing" (alisamento).

b) Medição do ruído de fundo:

As medições acústicas sempre são afetadas pelo ruído de fundo presente no ambiente de medição, por melhor que seja o isolamento acústico do tubo. Para efetuar-se a medição do ruído, ajusta-se um dispositivo no tubo que permite a colocação dos dois microfones alinhados com a tampa, de modo que captem simultaneamente um mesmo sinal.

Ativa-se o pré-amplificador e o sistema computacional, efetuando-se a medida do espectro de potência do sinal de um dos canais, para uma média de 100 medições.

Um espectro típico obtido está indicado na Fig. 4.4 abaixo

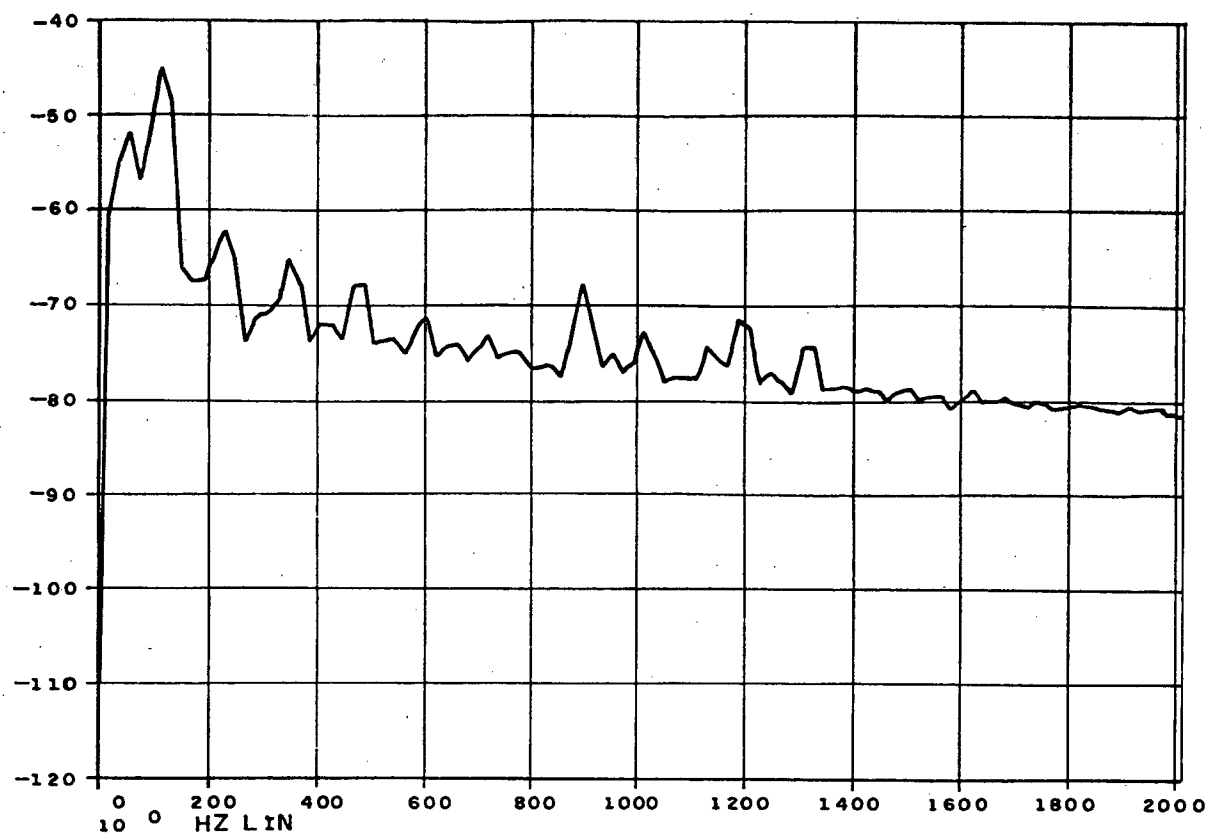


Fig. 4.4- Espectro típico do ruído de fundo dentro do tubo de medições

Colocando-se um microfone num "piston" ajustado para 124 dB, leu-se no espectro do som uma equivalência de - 3,75 dB, podendo-se deste modo aferir a intensidade acústica mostrada no computador com seu valor físico real. Na figura 4.5 está indicado o espectro obtido com a colocação de um dos microfones no "pistonphone".

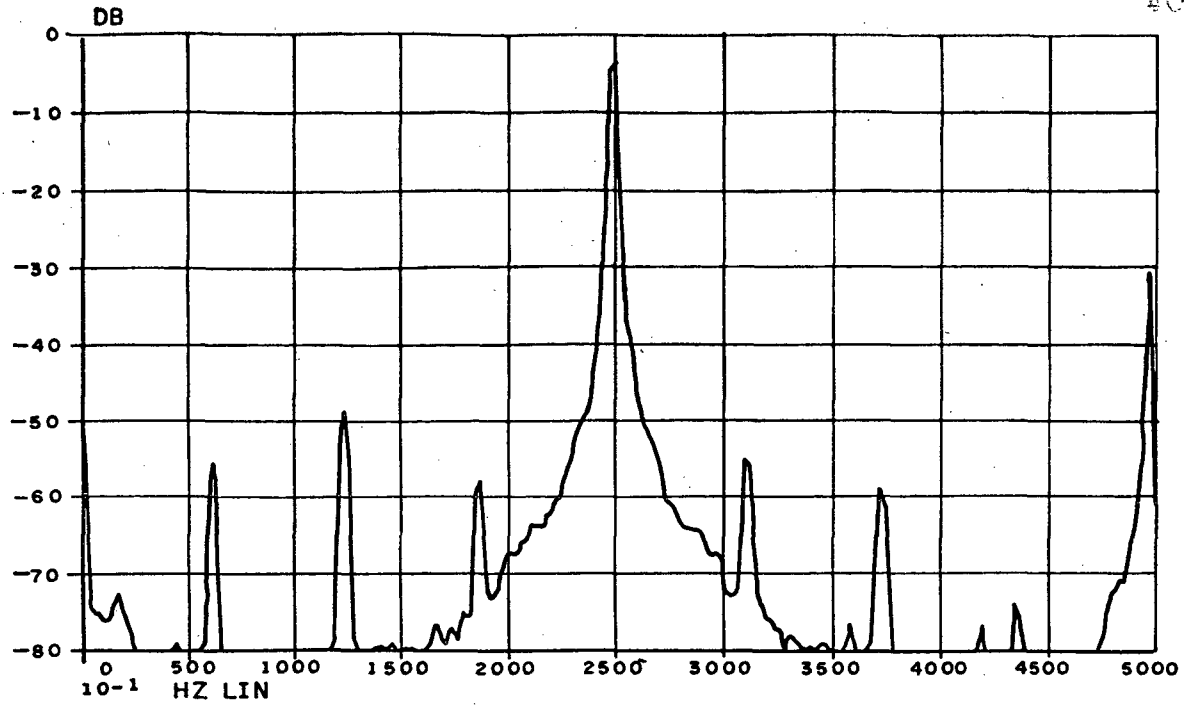


Fig. 4.5- Espectro do microfone num "pistonphone" com 124 dB de intensidade acústica.

c) Geração de sinal com intensidade adequada:

Conhecido o ruído de fundo, é necessário gerar-se nos alto-falantes um ruído branco, com uma faixa dinâmica superior ao ruído de fundo. A observação de medições acústicas indica que obteve-se bons níveis, quando a faixa dinâmica sobre o ruído de fundo tem pelo menos 30 dB.

O equipamento acústico usadonas medições conseguiu gerar um ruído branco com uma faixa de variação de 20 dB, abaixo da frequência de medida. A figura 4.6 mostra o espectro de um sinal com intensidade adequada sobre o ruído de fundo, obtido na média de 100 medições.

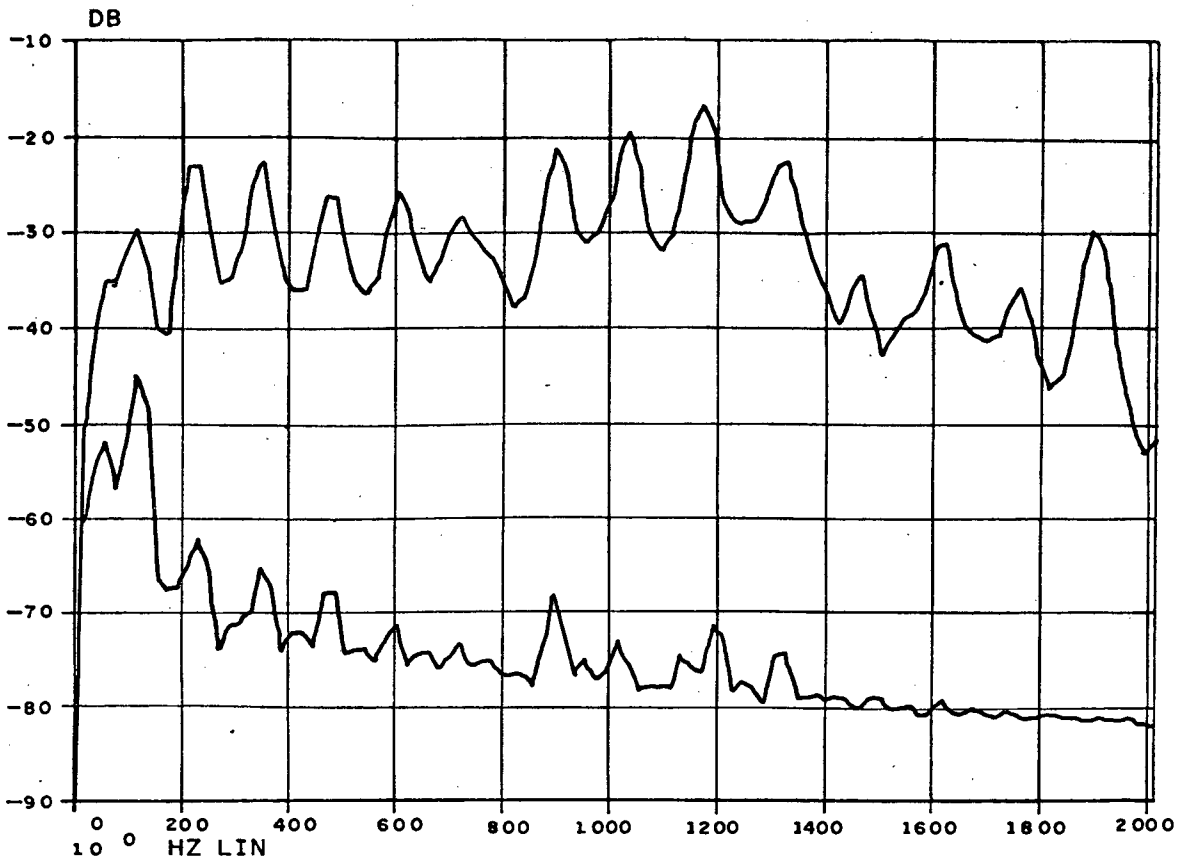


Fig. 4.6- Sinal de medição e sua relação com o ruído de fundo

Abaixo de 400 Hz a diferença entre o espectro indicado na fig. 4.6 e o ruído de fundo é de 30 dB apenas, o que irá prejudicar a precisão das medições de "α" e "z".

d) Equalização da resposta dos microfones:

Dispondo-se de um sinal adequado e usando-se as funções do sistema calcula-se a função de transferência entre os microfones 1 e 2. Caso o valor não seja muito próximo da unidade, é necessário ajustar-se a fonte de tensão para microfones B&K 2807, por girar-se os parafusos de cada canal até conseguir-se uma função de transferência ótima. A fig. 4.7 indica uma curva típica da função de transferência com resposta bem equalizada dos microfones.

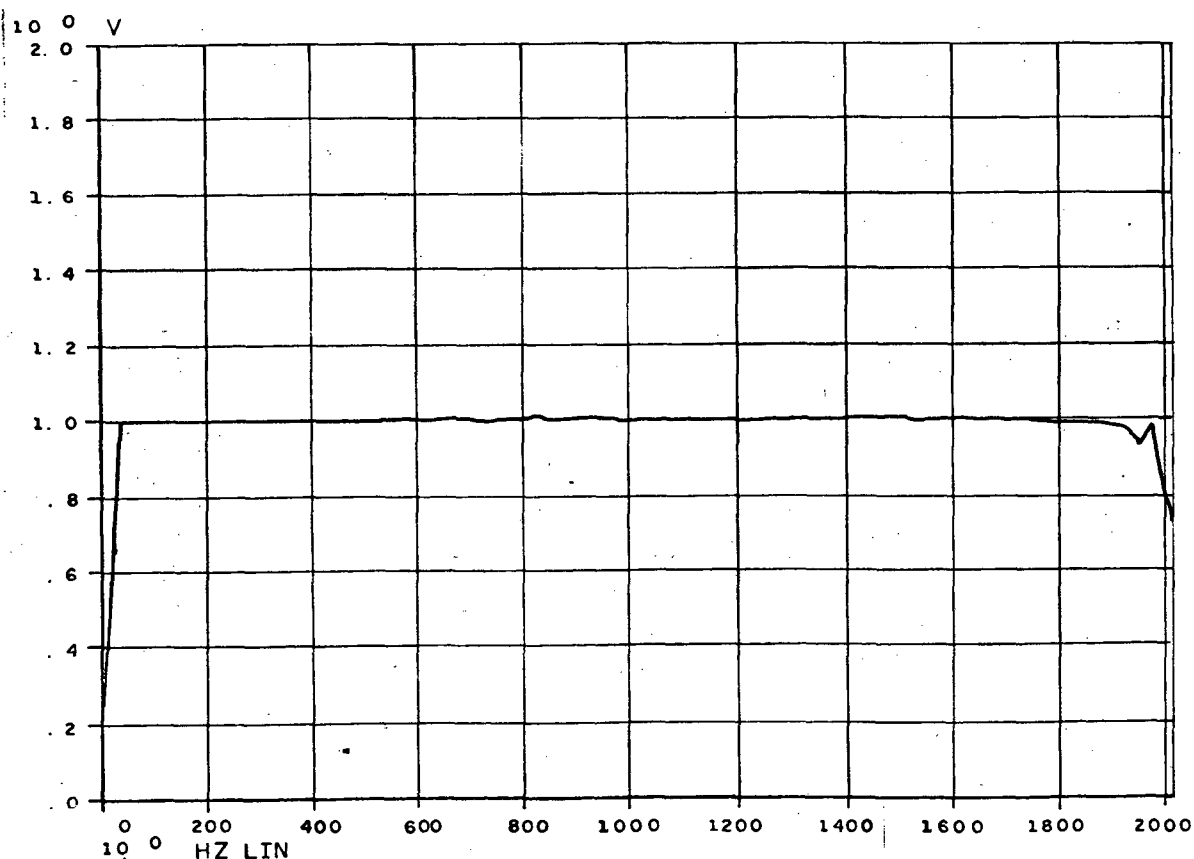


Fig. 4.7- Função de transferência para microfones alinhados, indicando boa equalização da resposta dentro da faixa de medição.

e) Verificação da fase entre os microfones:

Calculada a função de transferência, passando-se ela para coordenadas polares, a sua parte imaginária nos dá a fase entre os microfones. A figura 4.8a nos mostra a fase obtida nas medições.

Medindo-se a fase dos filtros analógicos com um mesmo sinal, observou-se que existe uma diferença de fase entre os dois canais de entrada da ordem de $\theta = 3,4609^\circ$ próximo de 5000 Hz, conforme indicado na figura 4.8b, indicando que existe a sobreposição das defasagens existentes entre os microfones e os filtros analógicos de entrada do sistema computacional.

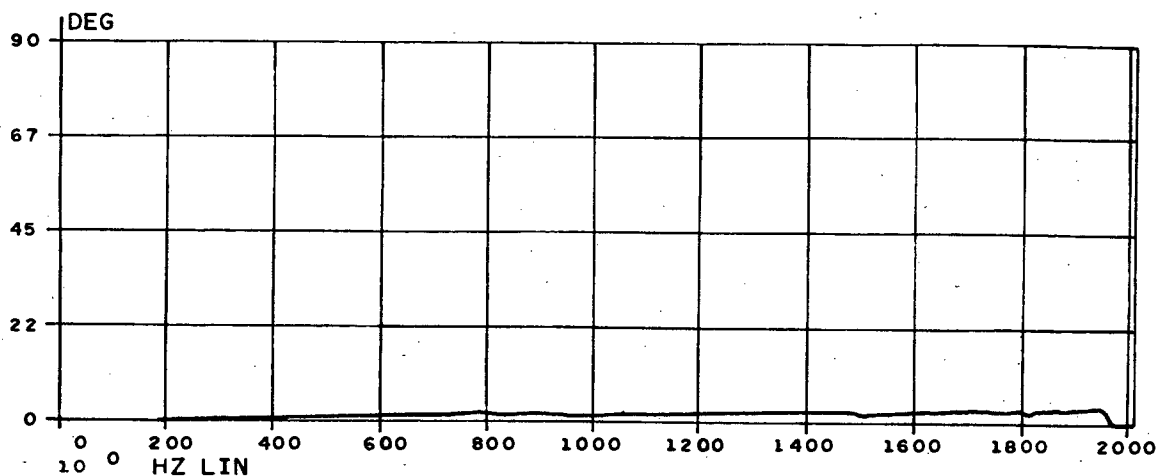


Fig. 4.8a- Fase entre os microfones alinhados sendo $\theta_{max} = 4.3893^\circ$.

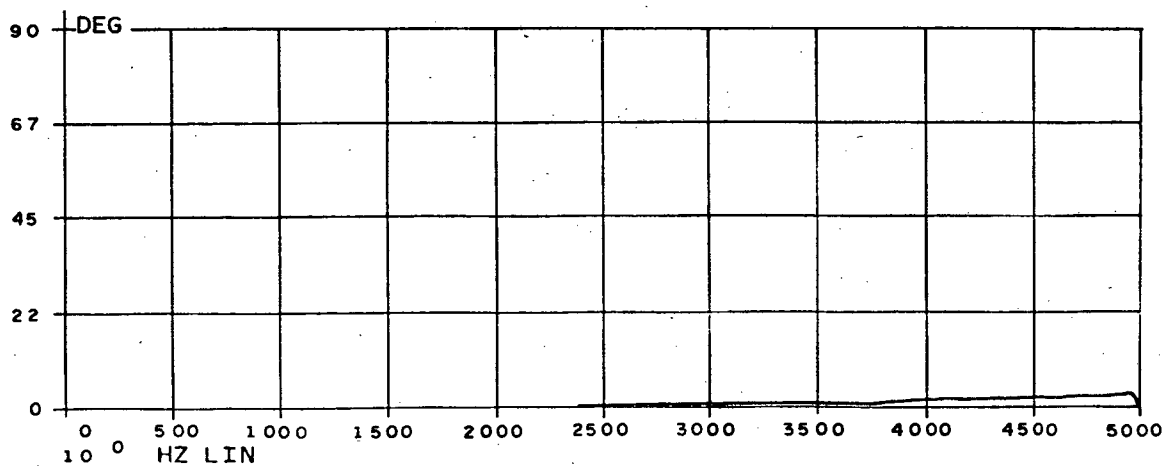


Fig. 4.8b- Fase entre os filtros de entrada do sistema computacional sendo $\theta_{max} = 3.4609^\circ$

f) Ajuste das distâncias da amostra aos microfones:

A fórmula da absorção acústica não depende da distância da amostra até os microfones, porém a impedância depende grandemente destes valores, sendo necessário escolher-se valores de kx_1 e kx_2 de modo que o intervalo de amostragem, corresponda a um deslocamento da onda acústica, múltiplo do tempo entre dois intervalos de amostragem. No caso dos experimentos efetuados para este trabalho, o intervalo entre medições no domínio do tempo digitalizado a uma taxa de $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ s, o que equivale a 17 mm de deslocamento da onda acústica.

Por facilidades físicas da terminação rígida, escolheu-se as medidas " x_1 " e " x_2 " como 68 mm e 92 mm respectivamente. Os valores das distâncias multiplicados pelo número de ondas resultaram em:

$$K \cdot 0,068 = \frac{\omega}{343} \cdot 0,068 \cong \omega 2 \times 10^{-4} \quad (x_1 = 68 \text{ mm})$$

$$K' \cdot 0,092 = \frac{\omega}{343} \cdot 0,092 \cong \omega 3 \times 10^{-4} \quad (x_2 = 92 \text{ mm})$$

Com tais valores será necessário a geração de funções auxiliares para cálculo da absorção e impedância acústica.

4.3.4- CÁLCULO DIGITAL DAS FUNÇÕES AUXILIARES

Uma vez ajustado e calibrado o sistema de medição, é necessário efetuar-se o cálculo digital das seguintes funções auxiliares:

a) $e^{\pm jkx}$ (4.02)

b) $\text{sen } kx_1$ e $\text{cos } kx_1$ (4.03)

c) $\text{sen } kx_2$ e $\text{cos } kx_2$ (4.04)

Usando-se as funções do sistema de computação, calcula-se as

seguintes funções auxiliares:

a) $e^{\pm j \omega \times 10^{-4}}$

b) $\text{sen } \omega \times 2 \times 10^{-4}$, $\text{cos } \omega \times 2 \times 10^{-4}$

c) $\text{sen } \omega \times 3 \times 10^{-4}$, $\text{cos } \omega \times 3 \times 10^{-4}$

As quais estão indicadas nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11, a seguir:

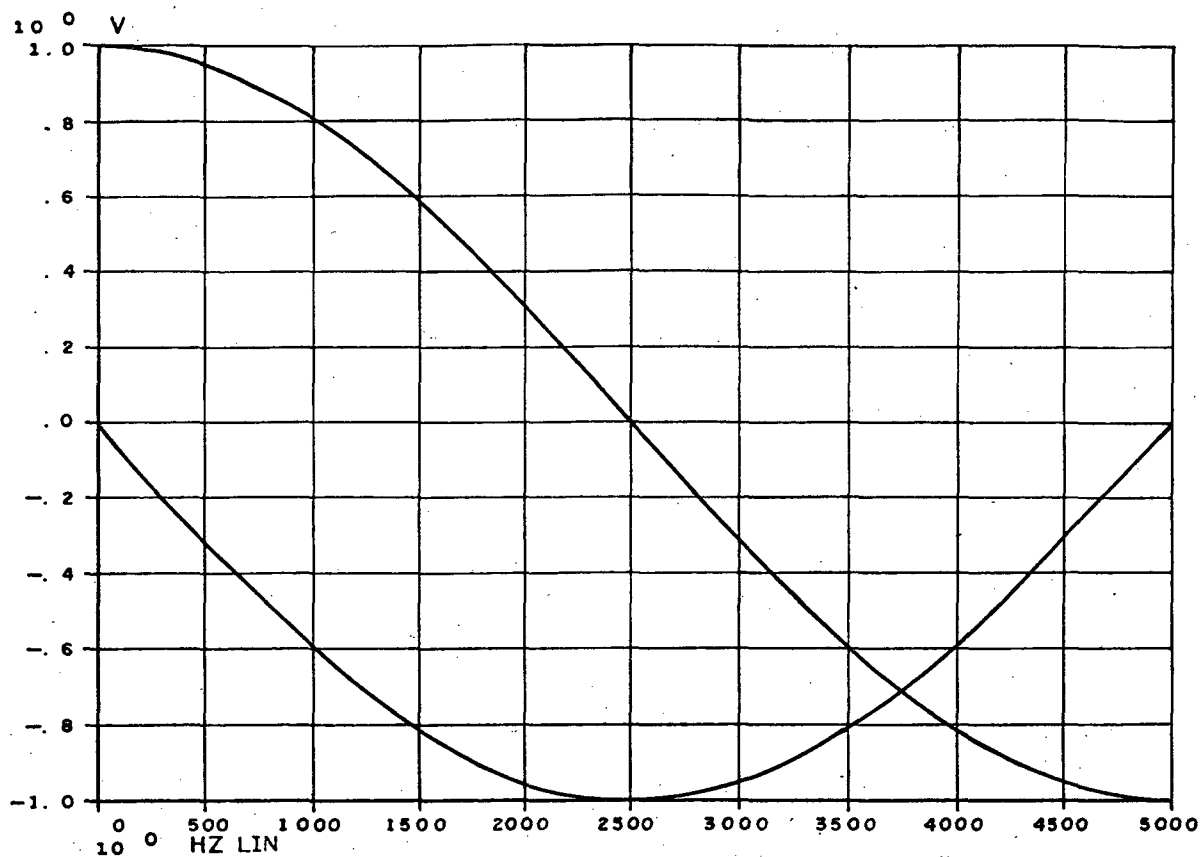


Fig. 4.9- Função auxiliar $e^{-j\omega \times 10^{-4}}$

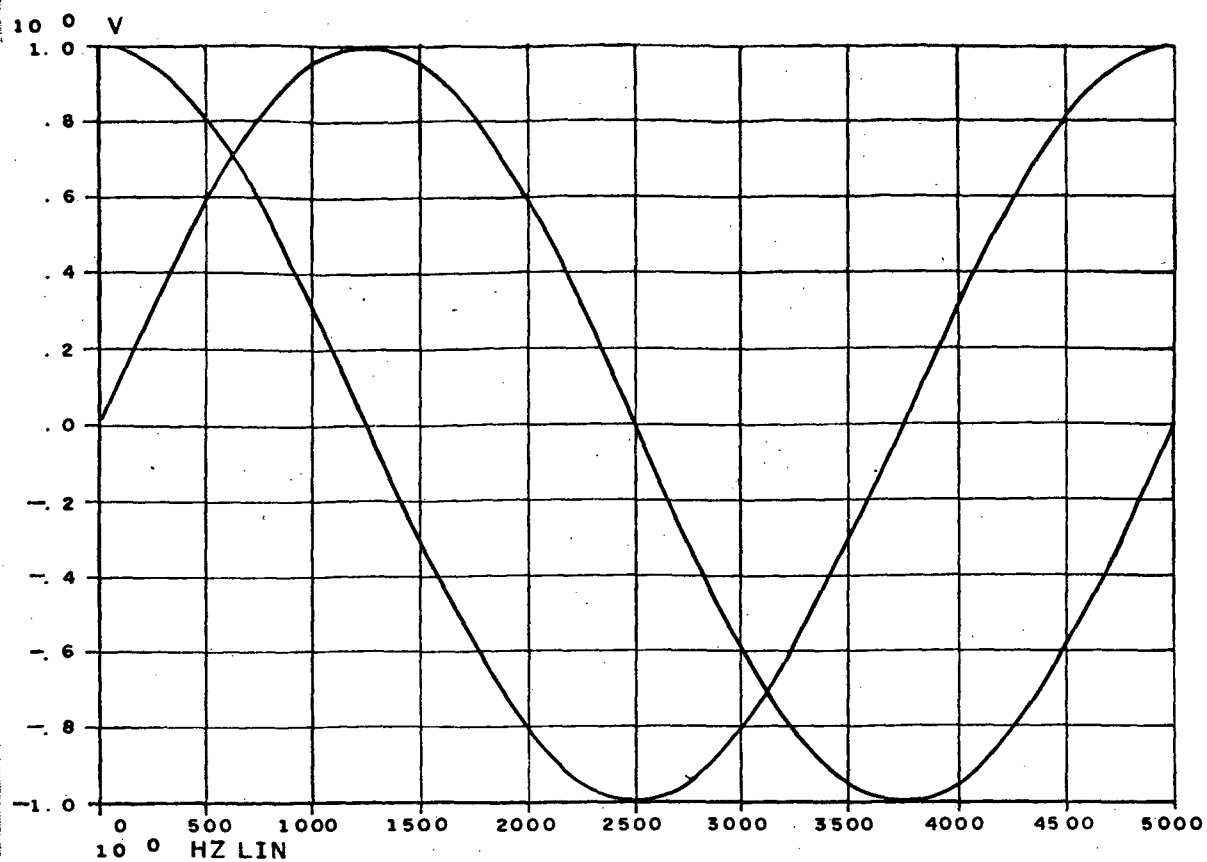


Fig. 4.10- Funções auxiliares $\sin \omega \cdot 2 \times 10^{-4}$ e $\cos \omega \cdot 2 \times 10^{-4}$

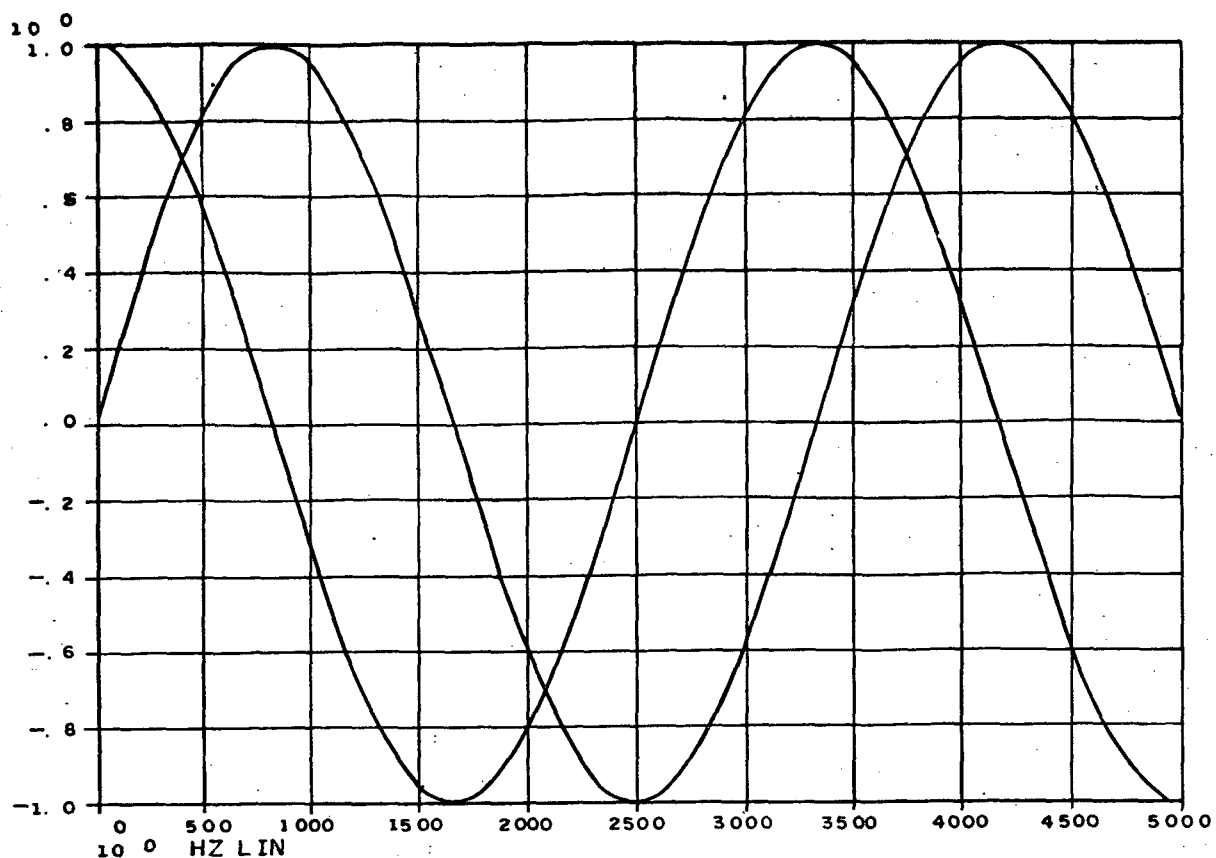


Fig. 4.11- Funções auxiliares $\text{sen } \omega 3 \times 10^{-4}$ e $\text{cos } \omega 3 \times 10^{-4}$

As funções auxiliares são armazenadas em blocos pré-determinados, ficando disponíveis para os processamentos a serem efetuados no decurso das medições.

4.3.5- MEDIÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA E CÁLCULO DA ABSORÇÃO E IMPEDÂNCIA

A essência da medição consiste na determinação da função de transferência "Hz", a qual é a única variável nas fórmulas da absorção e impedância, visto as outras serem fixas para um determinado ajuste de medições.

Utiliza-se uma rotina fixa do sistema computacional para cálculo da função de transferência. A figura 4.12 indica uma função de transferência típica com 100 leituras para uma amostra de ≈ 30 e

$h = 3,0$ cm. Nota-se que a função de transferência tem parte real e complexa, indicando a variação de fase existente na faixa de frequência de medidas.

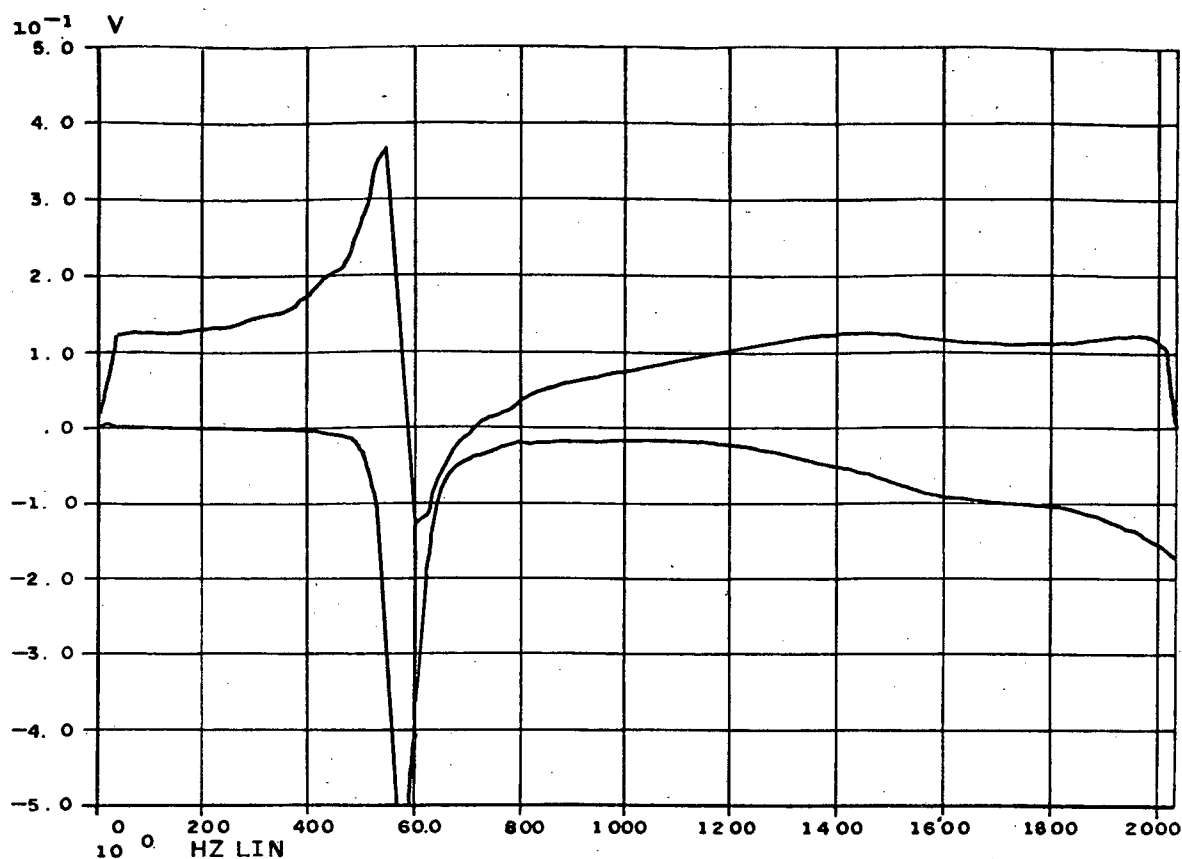


Fig. 4.12- Função de transferência típica entre os microfones 1 e 2 para uma amostra acústica de malha 30 e $h=3,0$ cm

Tendo sido determinada a função de transferência, usam-se duas sub-rotinas para cálculo da absorção e impedância acústica da amostra. As figuras 4.13 e 4.14 indicam os valores de absorção e impedância acústica, calculados com a função de transferência indicados na figura 4.12.

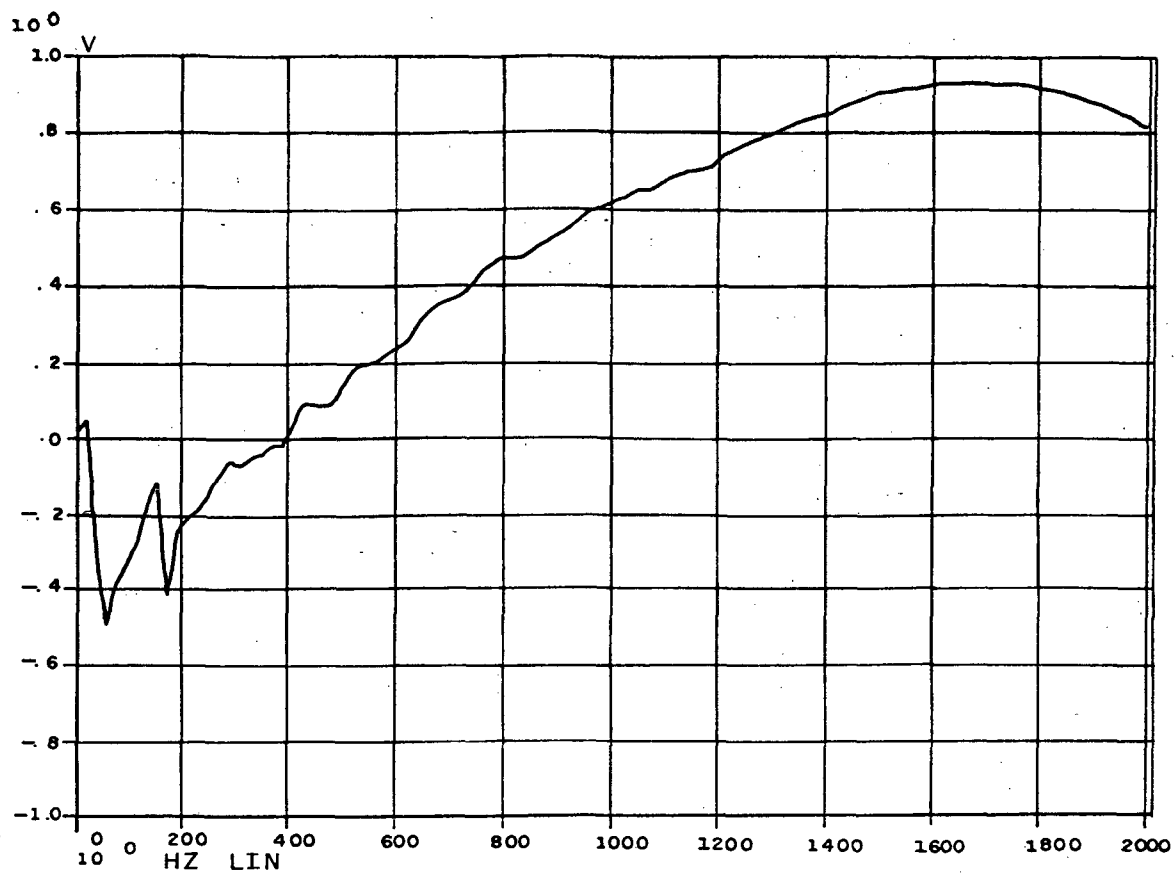


Fig. 4.13- Absorção acústica calculada com a função de transferência indicada na figura 4.12, para amostra de malha 30 e $h=3,0\text{cm}$

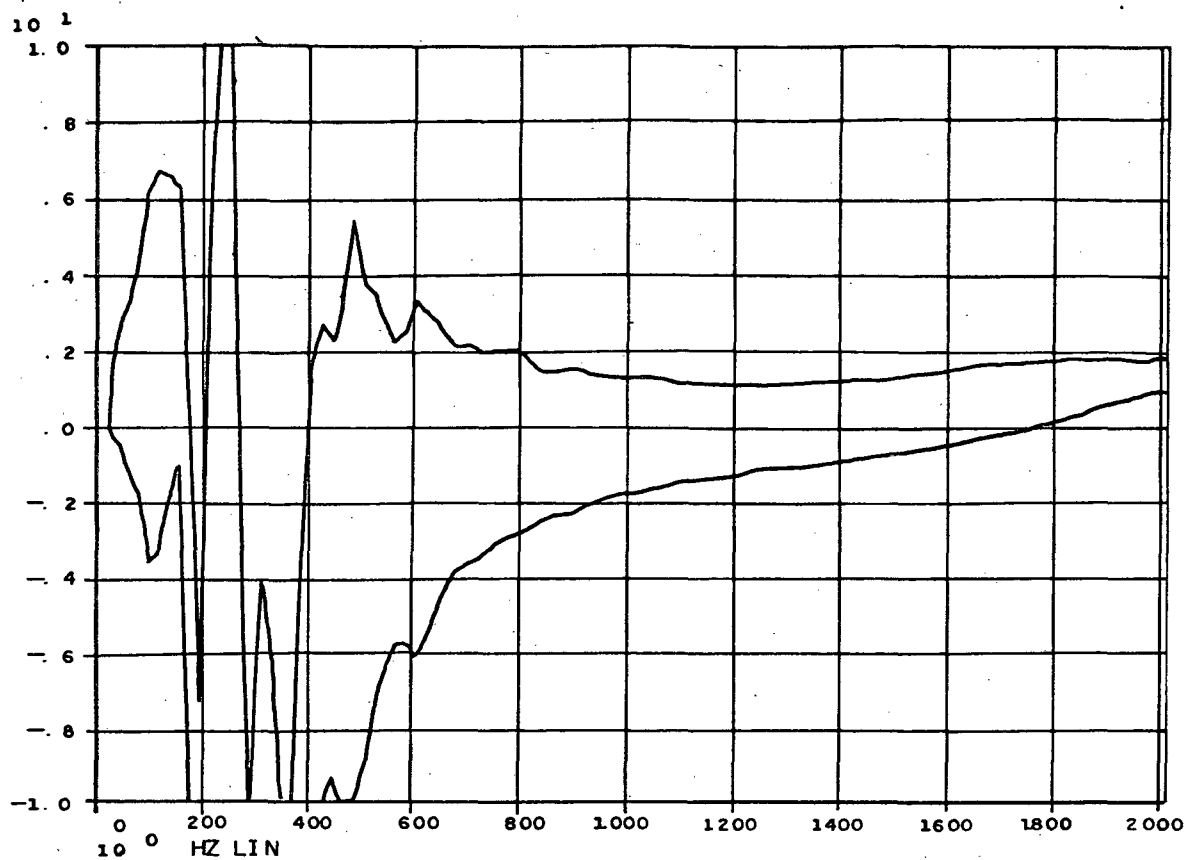


Fig. 4.14- Impedância acústica calculada com a função de transferência indicada na figura 4.12, para amostra de malha 30 e $h=3,0$ cm

No capítulo subsequente, serão discutidos todos os procedimentos usados na interpretação dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS - CAPÍTULO 4

- [4.01] Instruction Manual - Standing Wave Apparatus Type 4002 -
Brueel & Kjaer Revision; March 1979, Denamark
- [4.02] System Operating Manual - 5451 C. Fourier Analyser System -
Hewlet Pochard. March 1979 - USA
- [4.03] Medição de Absorção Acústica de Materiais com Técnica de Dois
Microfones - VIII COBEM - Dez 1985. Samir N.Y. Gerges,
Ednardo B. de Andrade, Renato T. Vargas, Ricardo K.
Damasceno
- [4.04] Standar Method of Test for IMPEDANCE AND ABSORPTION OF
ACOUSTICAL MATERIALS BY THE TUBE METHOD - ASTM C - 389-58
(REAPROVED 1972).

CAPITULO 5

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

5.1- INFLUÊNCIA DA FORMA DO ESPECTRO

Nos ensaios efetuados, foi usada uma combinação de dois alto-falantes para se conseguir um espectro com a forma mais plana possível na faixa de frequência de interesse. Os experimentos foram realizados na sala do computador onde existe um ruído de fundo gerado pelos ventiladores próprios do computador, bem como o ruído gerado pelo condicionador de ar.

Um outro fator importante é conseguir sobrepor-se o nível de pressão sonora ao ruído de fundo de modo a minimizar-se a influência deste nas medições. Observando-se o espectro da figura 4.6, nota-se que a faixa dinâmica entre o nível de ruído de fundo e o nível de pressão sonora é menor que 30 dB abaixo da frequência de 400 Hz. Observando-se o gráfico correspondente a absorção na figura 5.2 notam-se igualmente valores negativos até as proximidades de 400 Hz.

Como fisicamente não existe absorção negativa para superfícies passivas, esta discrepância pode ser atribuída a influência de ruído de fundo. No gráfico da impedância correspondente, na figura 5.3, igualmente observa-se um caráter totalmente errático, tanto da parte real como da imaginária, até as proximidades de 400 Hz.

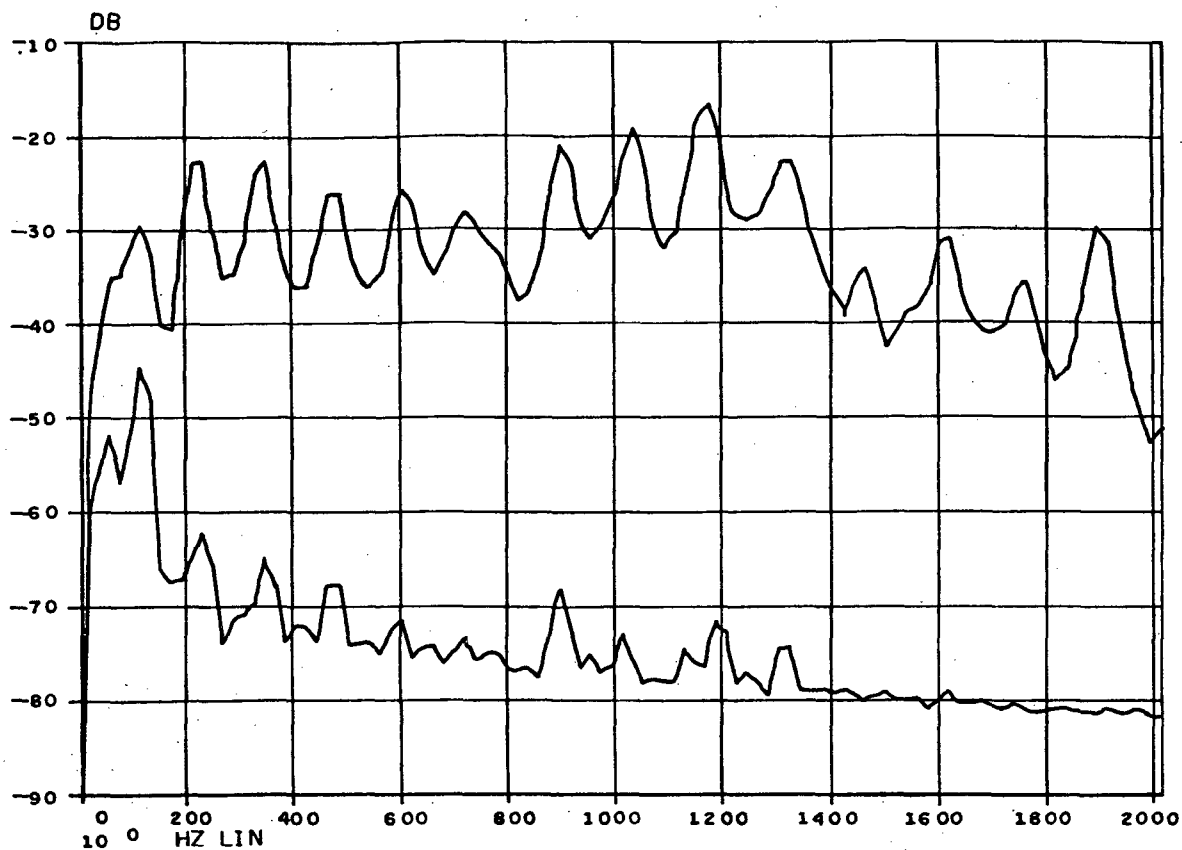


Fig. 5.1- Sobreposição do sinal de excitação ao ruído de fundo

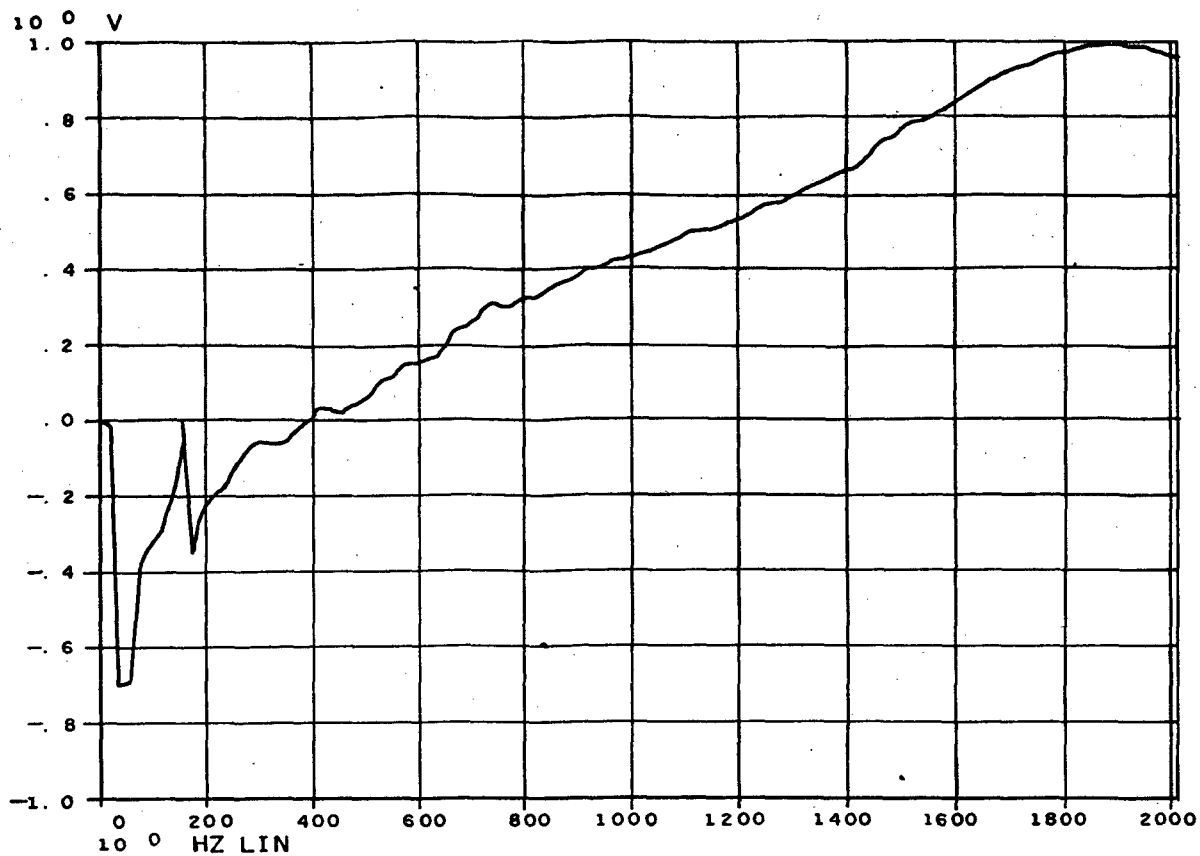


Fig. 5.2- Absorção correspondente ao espectro da fig. 5.1,

observando-se valores negativos até as proximidades de 400Hz.

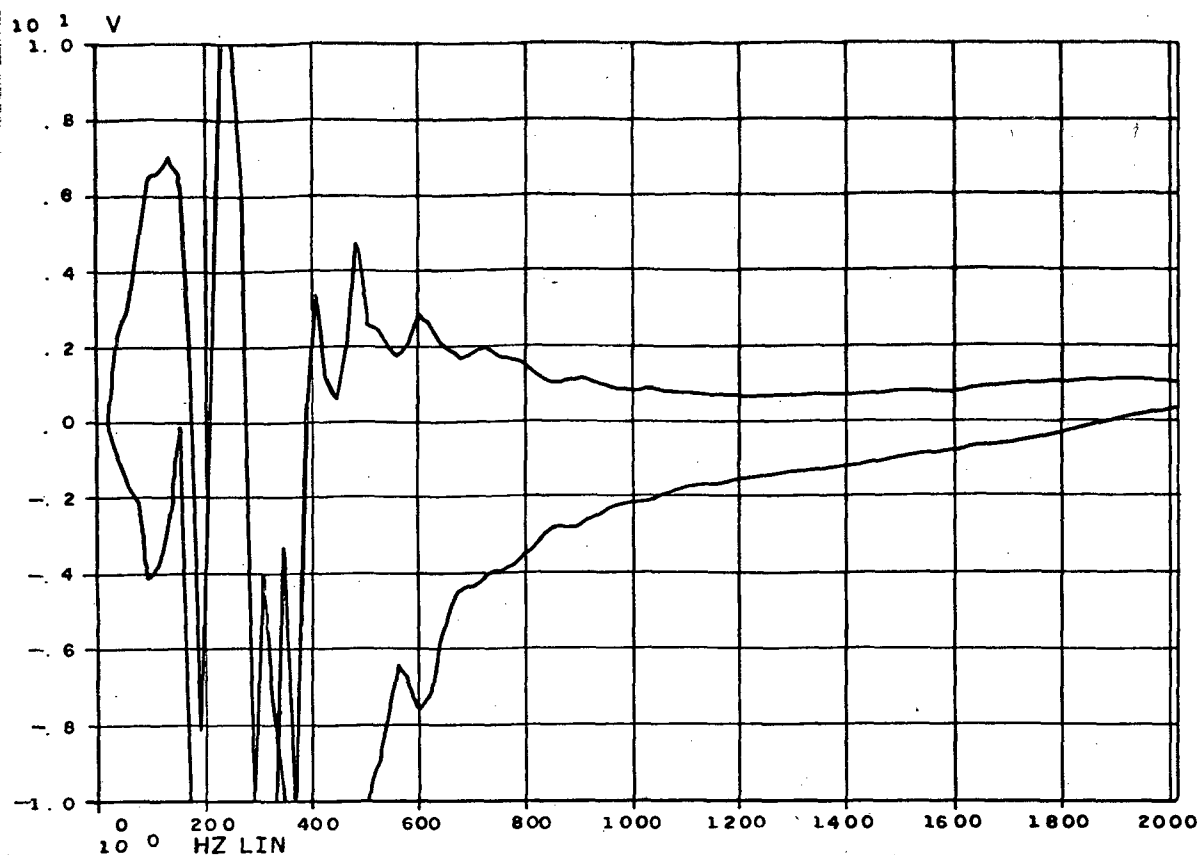


Fig. 5.3- Impedância acústica correspondente ao espectro da fig. 5.1, observando-se valores negativos até as proximidades de 400 Hz.

Para evidenciar-se a influência da forma do espectro de excitação, gerou-se um espectro de banda, com intensidade semelhante a figura 5.1 entre 1000 Hz a 1400 Hz, sobrepondo-se ao ruído de fundo como pode ser visto na figura 5.4, efetuando-se medidas de absorção e impedância.

Observando-se o gráfico da absorção acústica correspondente, indicado na figura 5.5, nota-se que igualmente a curva de absorção é regular entre a faixa que vai das proximidades de 1000 Hz a 1400 Hz. Um semelhante efeito foi observado na figura 5.6 que mostra a impedância acústica.

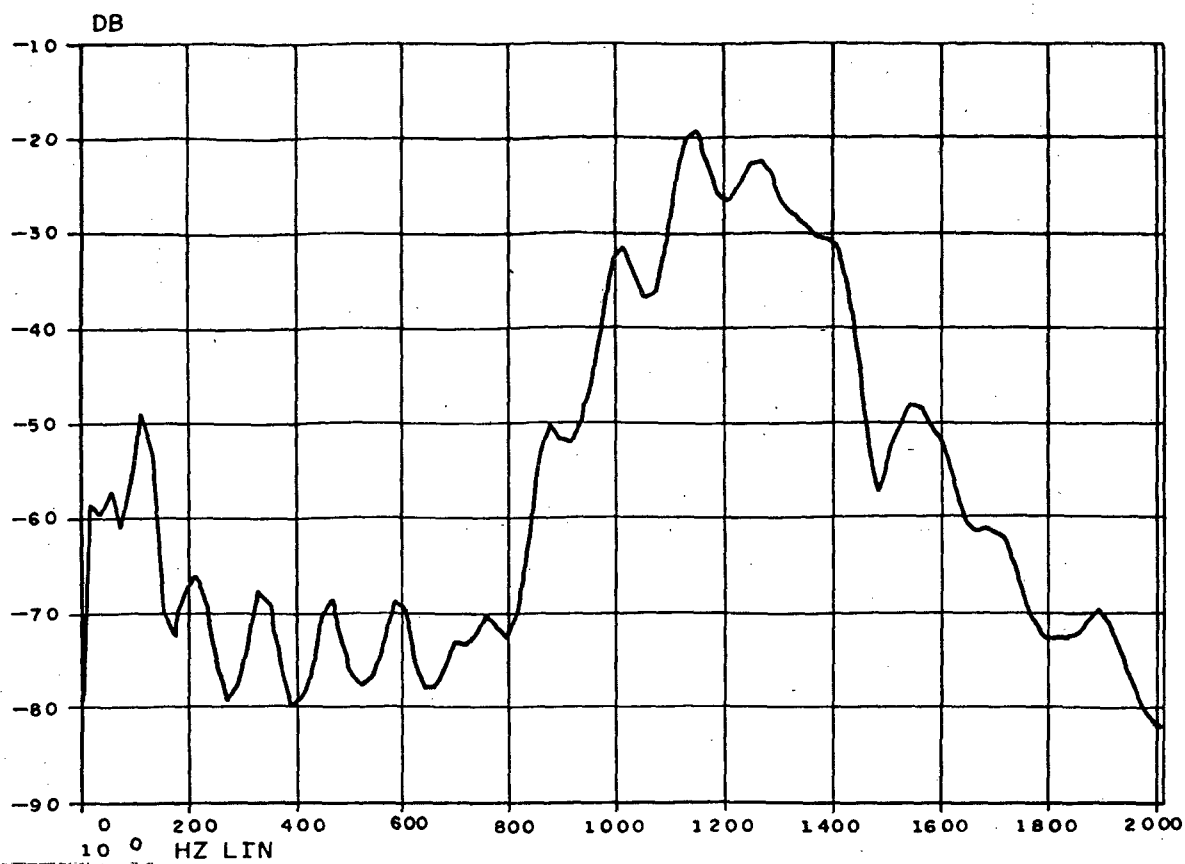


Fig. 5.4- Espectro de banda estreita entre 1000 Hz e 1400 Hz, sobrepondo-se ao ruído de fundo

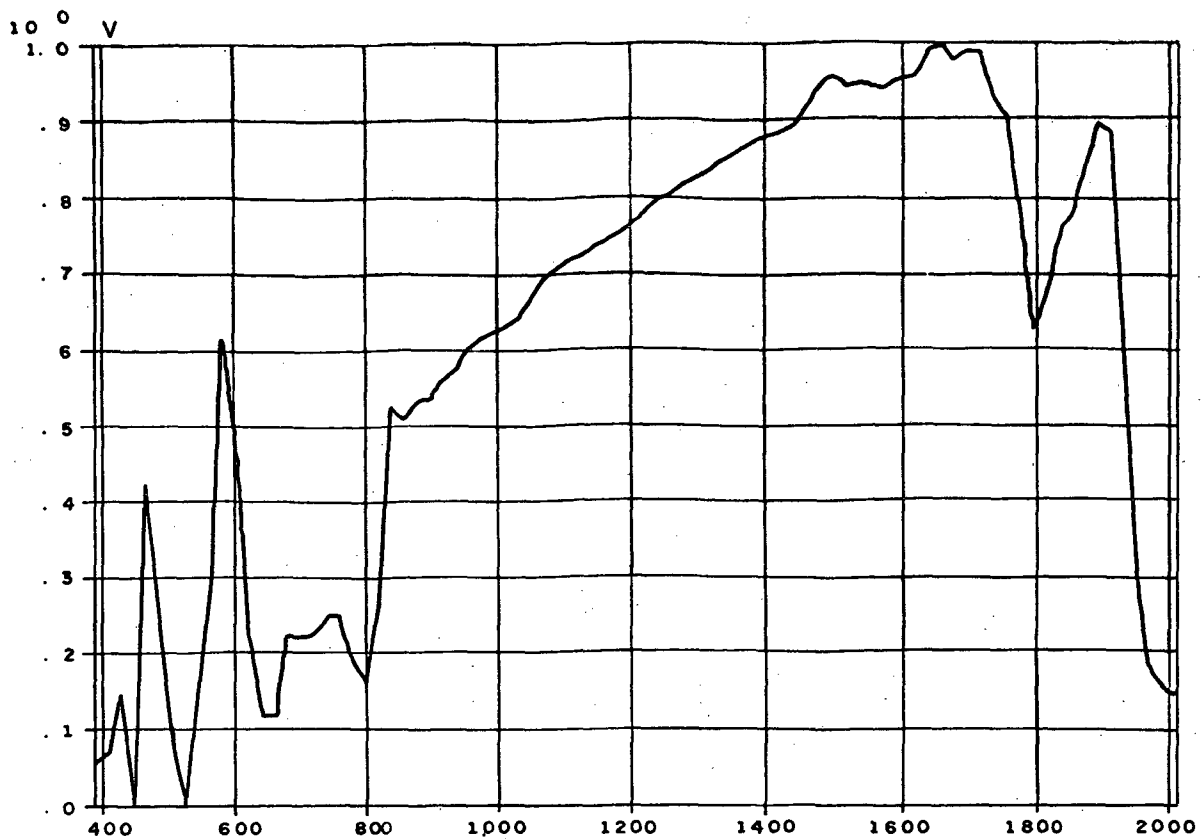


Fig. 5.5- Absorção acústica correspondente ao espectro da fig. 5.4, observando-se regularidade nas vizinhanças de 1000-1400 Hz

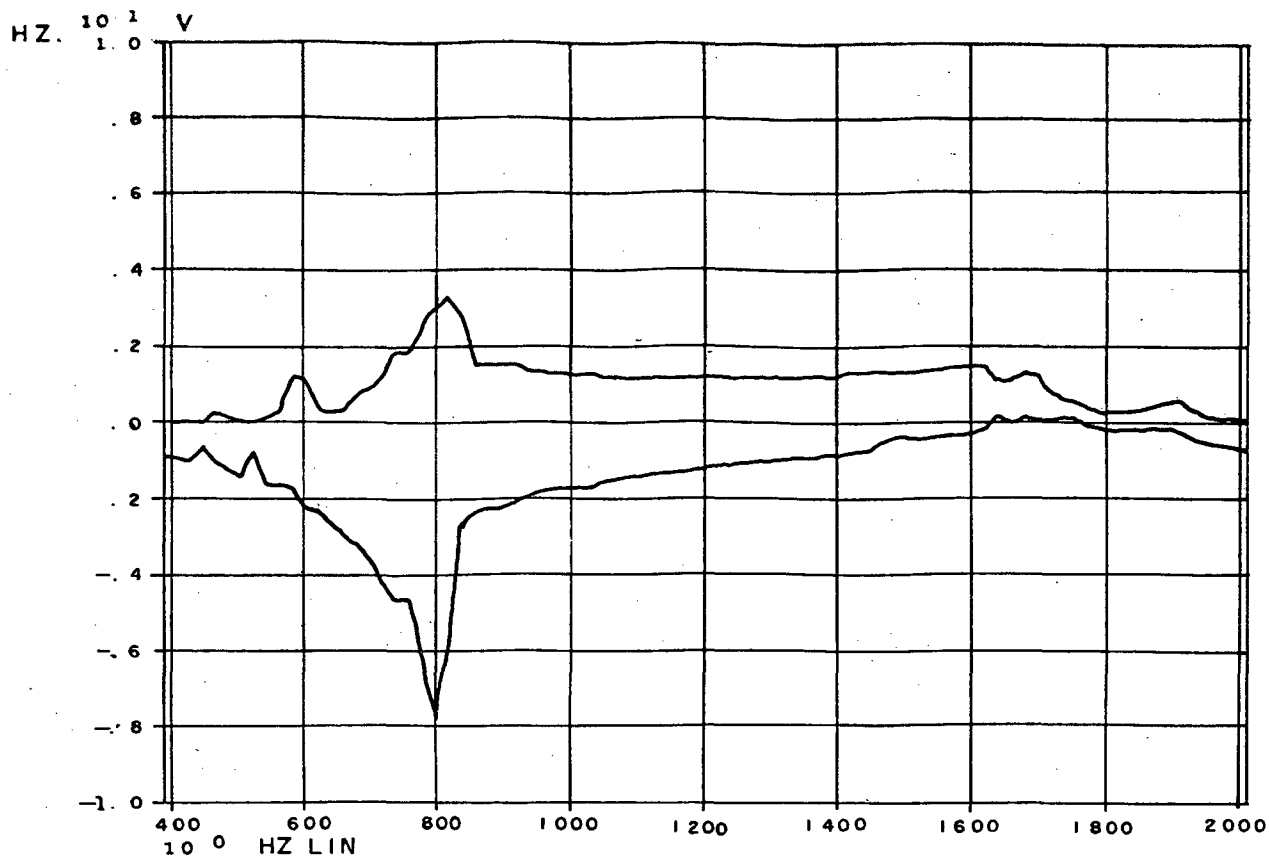


Fig. 5.6- Impedância acústica correspondente ao espectro da fig 5.4, observando-se regularidade nas vizinhanças 1000-1400 Hz.

5.2- REPETIBILIDADE

Efetuando-se medições acústicas de uma mesma amostra observa-se que qualquer pequena alteração, como colocar e retirar-se a amostra do aparelho, resulta em medições sucessivamente diferentes, as quais flutuam dentro de uma certa faixa.

Na figura 5.7 mostra-se uma sucessão de curvas de absorção para uma mesma amostra de ≈ 30 e $h = 3,0$ cm, a qual foi colocada e retirada do aparelho entre cada medição. Na figura 5.8 mostra-se a impedância acústica correspondente a mesma amostra, observando-se o mesmo fenômeno de flutuação dos valores de medições sucessivas.

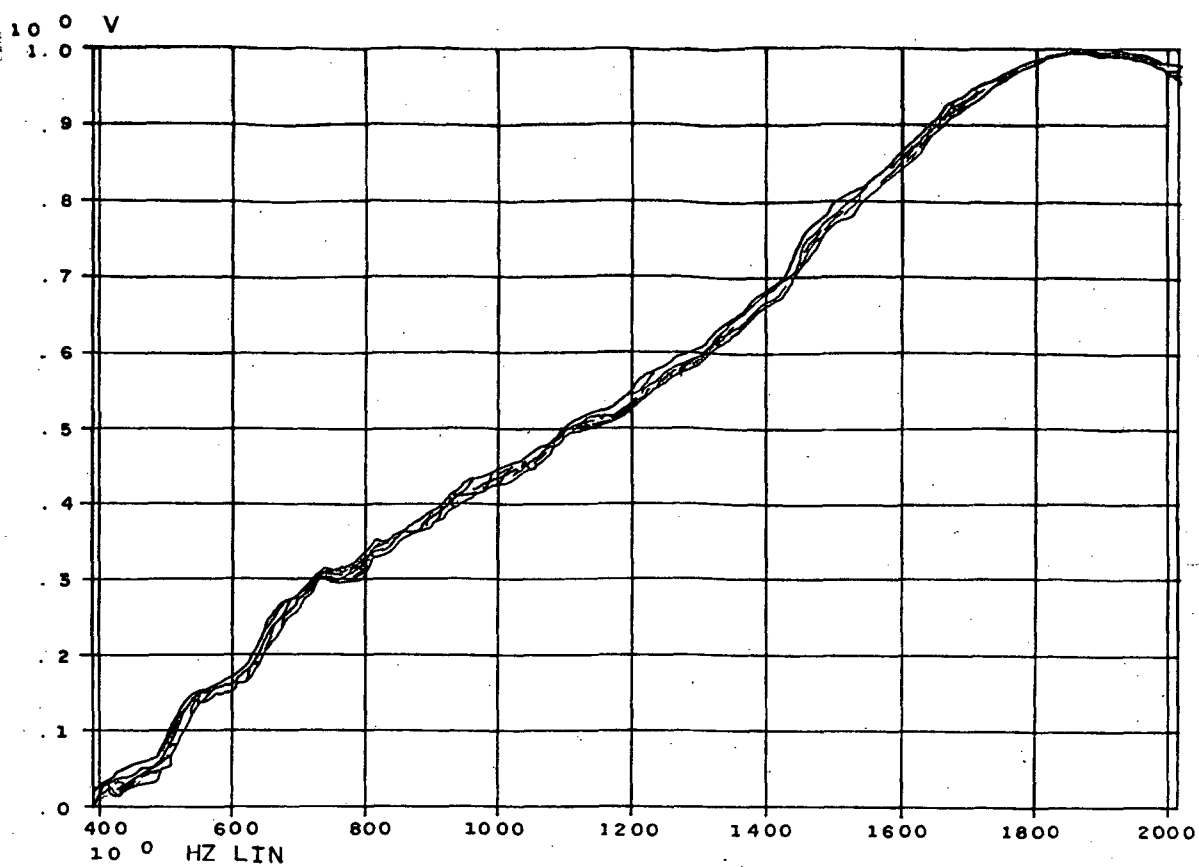


Fig. 5.7- Flutuação das medições de absorção acústica de uma mesma amostra, com retiradas e colocações sucessivas no aparelho.

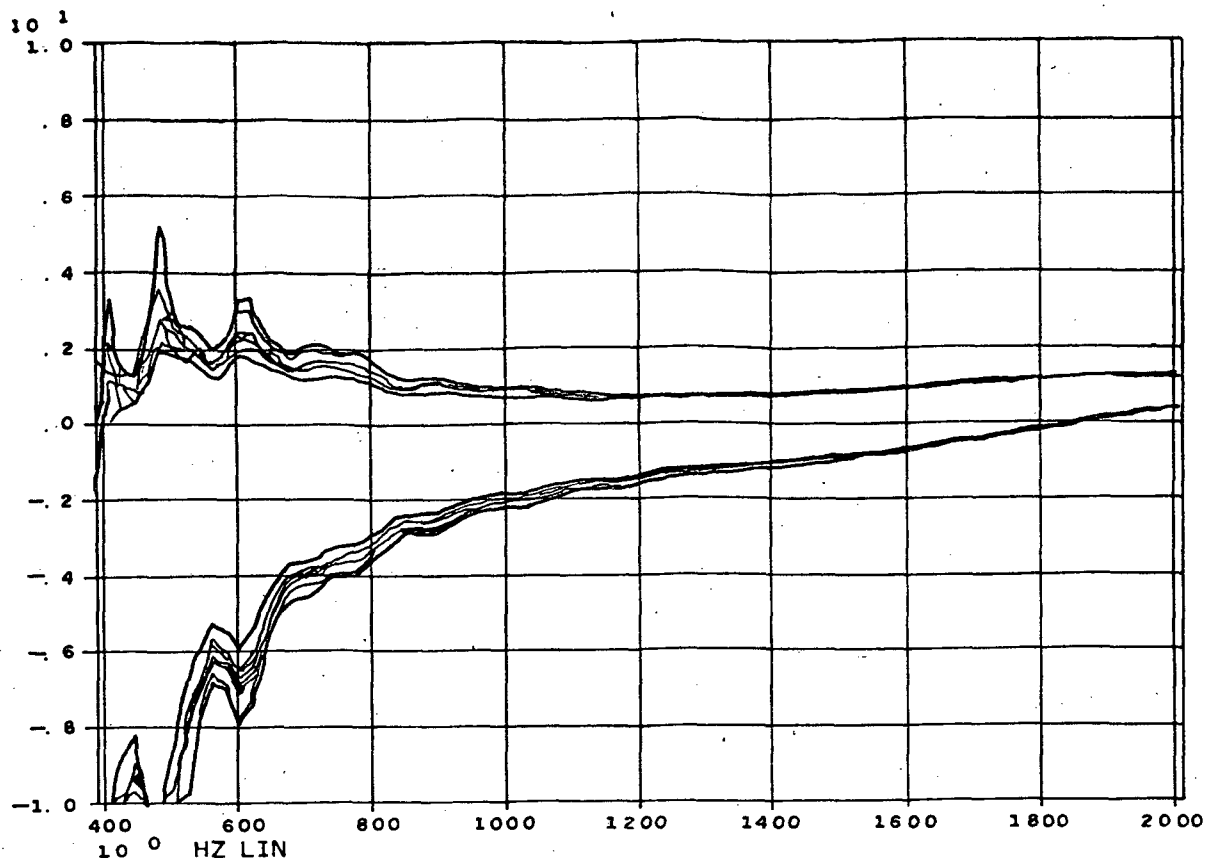


Fig. 5.8- Flutuação da impedância de uma mesma amostra, com retiradas e colocações sucessivas no aparelho

As flutuações na repetibilidade mostram existir uma grande sensibilidade, quanto a colocação e retirada de uma amostra. Tal fenômeno também é observado em medições com tubo de impedância clássico, sendo isto atribuído a perda de energia entre a amostra e a parede do tubo.

5.3- VARIACÃO DA DISTÂNCIA ENTRE OS MICROFONES E A AMOSTRA

Devido as flutuações observadas com a repetibilidade das medidas sucessivas, decidiu-se observar os resultados deslocando-se a amostra dentro de um intervalo. A figura 5.9 mostra medições da mesma amostra de $r = 30$ e $h = 3,0$ cm, a qual foi deslocada de uma distância de 130 a 65 mm, do primeiro microfone. Os valores sucessivos de

medições flutuaram mais do que na repetibilidade numa mesma distância.

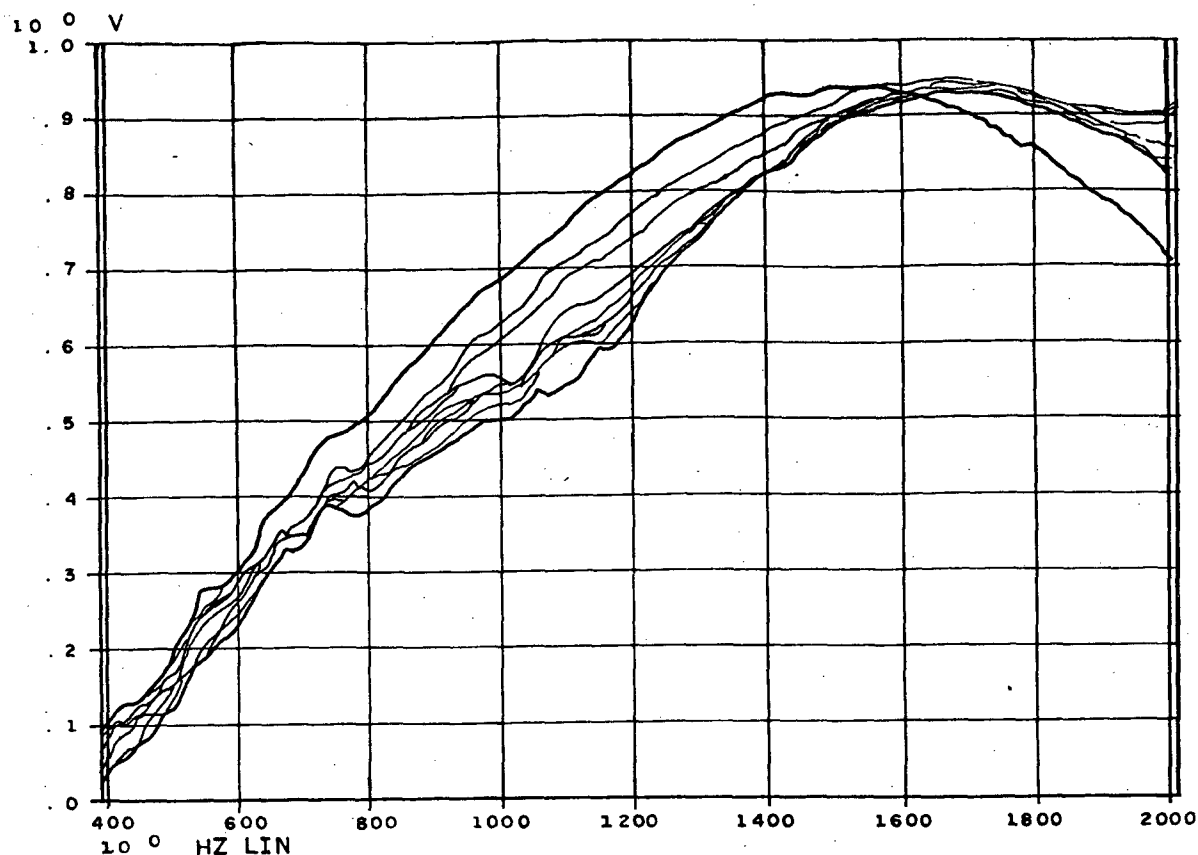


Fig. 5.9- Flutuação da medição da absorção acústica com deslocamento da amostra de 130 a 65 mm do primeiro microfone.

Embora o modelo físico-matemático da absorção independa da distância entre a amostras e os microfones (vide equação 3.15), pode-se atribuir a esta maior flutuação, como uma maior sensibilidade a mudança do comprimento do tubo nas medições. Comparando-se todavia as distâncias da fig. 5.7 e 5.9, nota-se que todas as curvas obtidas com a mudança da posição relativa, tem a mesma distância observada nas medições da amostra numa mesma posição, variando apenas a flutuação que é maior com o deslocamento da amostra.

Na amostra numa mesma posição observou-se uma flutuação máxima

de cerca de $\pm 0,03$, enquanto na variação da posição da amostra observou-se uma flutuação máxima de cerca $\pm 0,09$ nos valores da absorção acústica.

Neste ensaio não colocou-se a impedância acústica, pelo fato do sistema computacional ter sido ajustado para uma só posição.

5.4- COMPARAÇÃO COM DADOS OBTIDOS NO TUBO DE IMPEDANCIA

Comparando-se os resultados obtidos pela técnica dos dois microfones, com os obtidos na medição no tubo de impedância clássico, tanto para absorção como para a impedância acústica, nota-se uma boa concordância dentro dos limites de flutuações observados com a repetibilidade dos ensaios.

As figuras 5.10 e 5.11 indicam boa concordância, tanto para a absorção como para a impedância a partir de 500 Hz, visto as leituras na técnica dos dois terem sido prejudicados nas baixas frequências por influência do ruído de fundo como já foi aludido no sub-capítulo 5.1, enquanto no tubo de impedância clássico não se observa este fenômeno devido ao maior controle do sinal de excitação filtrado numa só frequência.

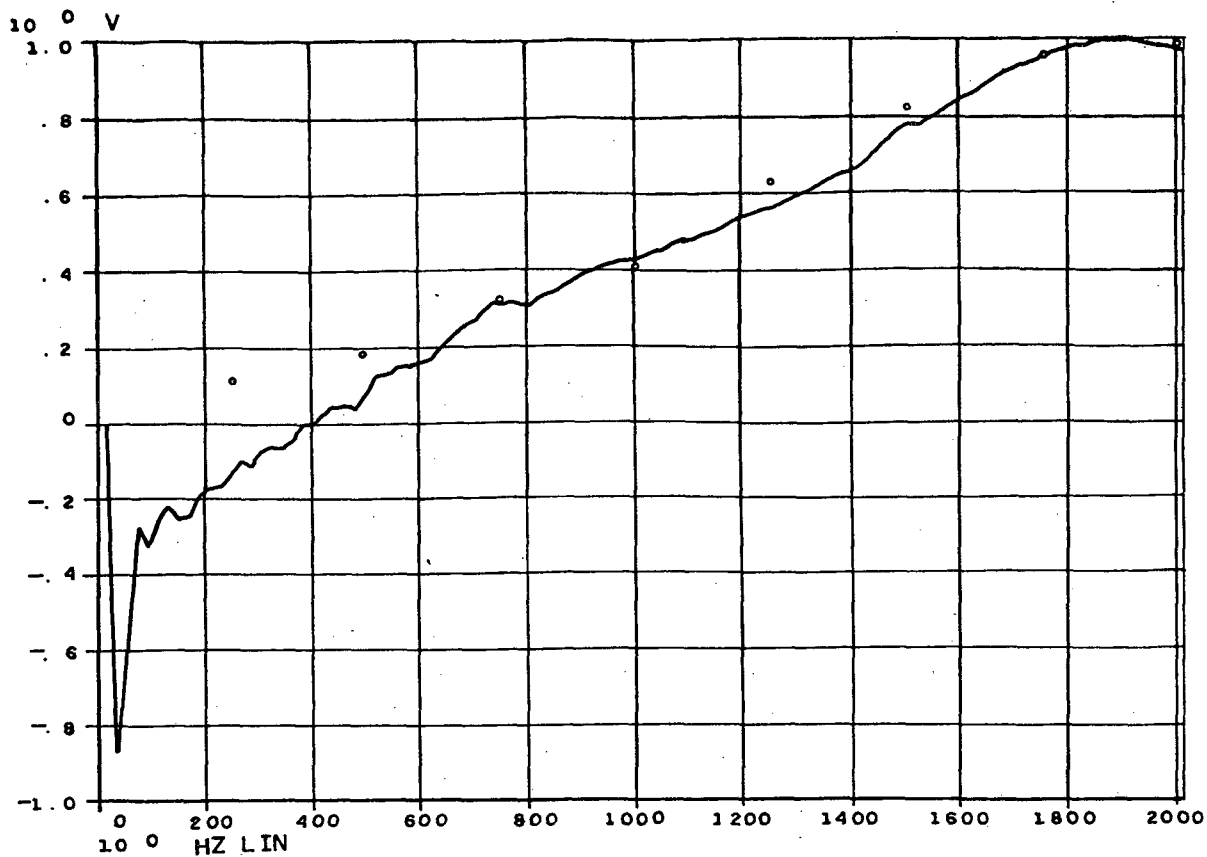


Fig. 5.10- Comparação entre a absorção acústica determinada pela técnica de dois microfones, e a medição em tubo de impedância clássico. Os pontos isolados indicam os valores determinados no tubo de impedância.

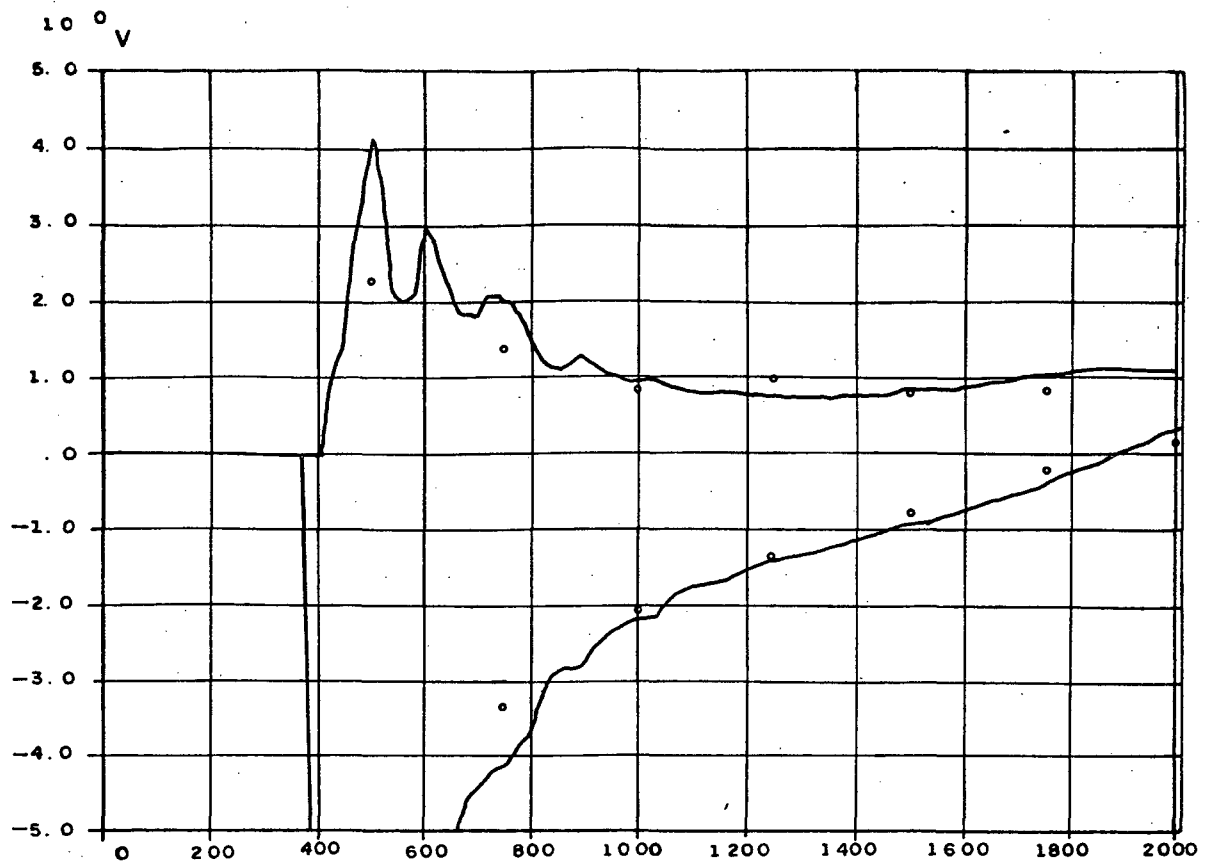


Fig. 5.11- Comparação entre a impedância acústica determinada pela técnica dos dois microfones e a medição em tubo de impedância clássico. Os pontos isolados indicam os valores determinados no tubo de impedância.

Observando-se a absorção acústica de uma terminação rígida, semelhantemente ao caso anterior, igualmente observou-se uma boa concordância entre os valores obtidos com a técnica dos dois microfones, e as medições no tubo de impedância clássico. A figura 5.12 mostra os resultados obtidos por ambos métodos, notando-se tal qual nos casos anteriores as deficiências de medição nas baixas frequências com a técnica dos dois microfones. Nas altas frequências a maior discrepância pode ser atribuída a diferença de fase entre os dois canais conforme mostrado na figura.

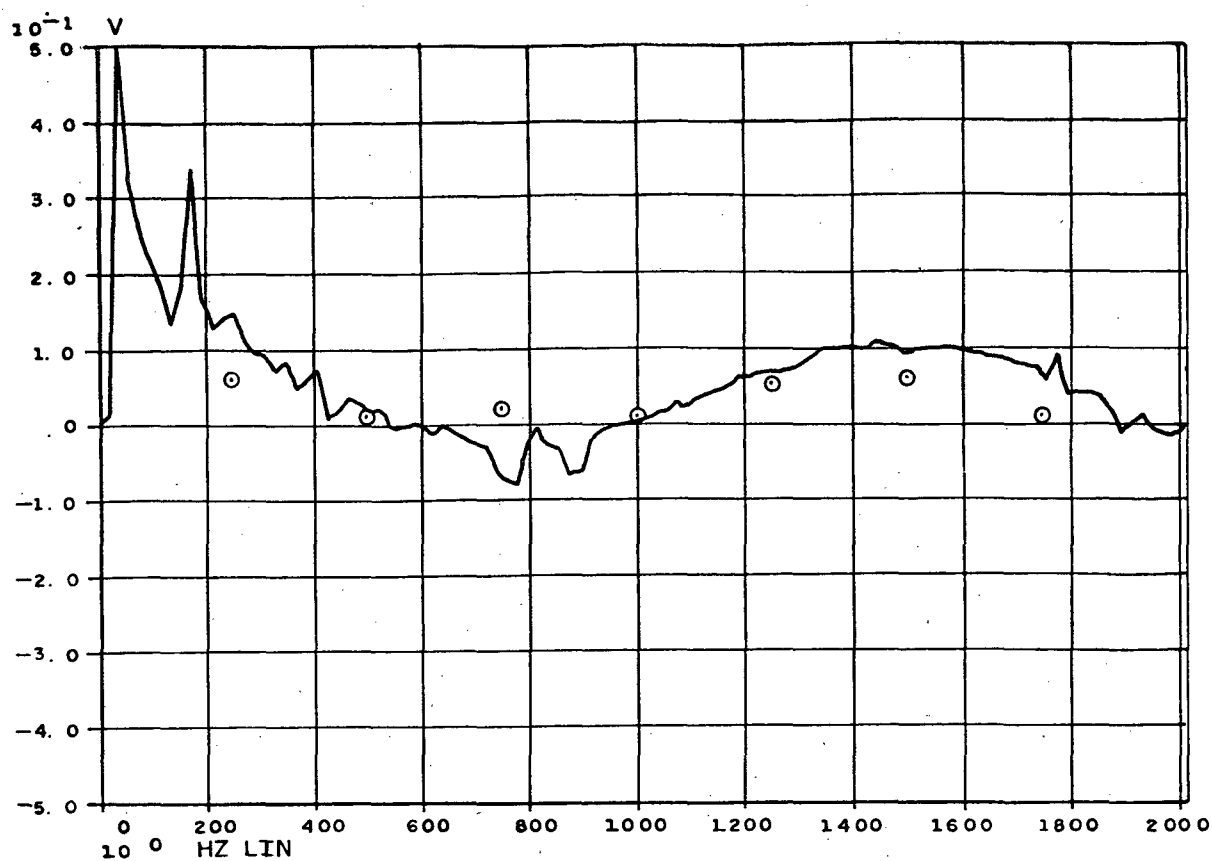


Fig. 5.12- Comparação entre a absorção acústica de uma terminação rígida, medida pela técnica dos dois microfones e o tubo de impedância. Os pontos indicam os valores obtidos pelo tubo de impedância.

Dentro da faixa de frequência válida para a instrumentação obteve-se uma boa concordância entre medições com a técnica dos dois microfones e o método clássico do tubo de impedância.

CAPITULO 6

RESUMO E CONCLUSÕES

6.1- RESUMO

O objetivo deste estudo foi desenvolver-se uma material de absorção acústica, feito de cinzas de carvão, abrindo o leque de possibilidades do uso de cinzas pesadas.

Foram fabricados ladrilhos acústicos, feitos com cinzas de diversas granulometrias e aglomerados com cola de resina epoxídica em diversas espessuras. Junto com cada série de ladrilhos foram fabricados amostras em dimensões que coubessem em um tubo de impedância clássico e um dispositivo especial para uso da técnica dos dois microfones. Foram testadas algumas amostras, demonstrando o novo material ter boas propriedades de absorção acústica.

Numa segunda etapa foi efetuada uma revisão da teoria usada em medições no tubo de impedância clássico e desenvolvendo-se fórmulas para medições de absorção e impedância acústica pela técnica dos dois microfones a partir da equação da onda acústica plana, chegando-se as

mesmas equações desenvolvidas por outros autores que participaram de outros pressupostos. Descreveu-se a tecnologia de medições empregada, bem como efetuou-se uma série de ensaios para verificação da exatidão da técnica de medição por dois microfones, discutindo-se diversos aspectos dos resultados obtidos bem como comparando-se os resultados obtidos no tubo de impedância clássico, obtendo-se boa concordância entre ambos métodos. No fim sugerem-se alguns estudos posteriores para maior aprofundamento dos conhecimentos do novo método.

6.2- MATERIAIS ACÚSTICOS FEITOS DE CINZAS DE CARVÃO

Conforme já abordamos no Capítulo 2, as amostras de materiais acústicos, tem propriedades acústicas interessantes, devendo todavia ser desenvolvido ainda um trabalho de pesquisa tecnológica, para uso de colas alquídicas, as quais tem custos inferiores aos de colas de resinas epoxídicas, usados na fabricação de ladrilhos acústicos, o que teria como consequência a redução do custo final do produto, e conseqüentemente uma maior atratividade comercial.

Além do aspecto da fabricação econômica do ladrilho acústico, seria igualmente necessária uma pesquisa tecnológica quanto a materiais e métodos econômicos, da fixação destes em paredes e tetos, bem como a pesquisa do tamanho ideal das peças que levem em conta o transporte, manuseabilidade e resistência física, de modo a ter-se um produto tecnologicamente maduro para aplicação em grande escala.

6.3- TÉCNICA DOS DOIS MICROFONES

6.3.1- VANTAGENS DA TÉCNICA DOS DOIS MICROFONES

O novo método tem como grande vantagem a grande rapidez na medição da absorção e impedância acústica, tanto na simples leitura do resultado como na apresentação dos dados, visto ser totalmente automático, o que não ocorre no método do tubo de impedância clássico, onde os aparelhos tem que ser ajustados para cada frequência de leitura, e onde os dados finais são lidos após uma série de tentativas na procura de mínimos e máximos, sendo os resultados finais obtidos por cálculos posteriores.

Além das vantagens operacionais, a técnica dos dois microfones permite a leitura contínua do espectro das propriedades acústicas das amostras em teste, permitindo ampla elasticidade na escolha da faixa de leitura, bem como o detalhamento de certos trechos de maior interesse, permitindo igualmente uma apresentação de dados de modo claro e preciso.

No tubo de impedância clássico, em casos da necessidade de maior resolução, tem-se um grande dispendio de tempo pela leitura individual em cada frequência de muitos pontos isolados, sendo, a técnica dos dois microfones 30 vezes mais rápida do que a técnica convencional.

6.3.2- GRAU DE PRECISAO

O grau de precisão observado na técnica dos dois microfones é idêntico ao método clássico do tubo de impedância, o qual já é empregado a muito tempo, mostrando o confronto dos resultados de

ambos métodos da existência uma boa concordância, dentro da precisão inerente a cada método.

6.3.3- FONTES DE IMPRECISÃO

A técnica dos dois microfones tem sua precisão altamente dependente da forma do espectro gerado nos alto-falantes do aparelho de medida, bem como do isolamento acústico do aparelho de medida, para minimizar-se a influência do ruído de fundo. Neste aspecto existe uma grande dependência da qualidade de reprodução dos alto-falantes, principalmente nas baixas frequências onde o nível do ruído de fundo é menor que 20 dB da emissão dos alto-falantes.

A construção de dispositivos com grande isolamento acústico, ou a localização da aparelhagem em ambiente com baixo ruído de fundo, certamente irão diminuir esta perniciosa influência, aumentando a precisão das leituras principalmente nas baixas frequências.

Um outro fator que influi na precisão das medidas é a unicidade da função de transferência nas frequências, além da diferença de fase entre os dois canais de medição. Observando-se que os resultados são aceitáveis até uma defasagem de cerca de 2° .

Foi também verificado que a precisão é influenciada pela folga da amostra com o suporte, recomendando-se sempre a menor folga tecnicamente possível nestes casos.

6.3.4- SUGESTÕES DE ESTUDOS POSTERIORES

Para aperfeiçoamento da técnica dos dois microfones, sugere-se o desenvolvimento posterior de estudos que visem o aperfeiçoamento do modelo teórico levando-se em conta o comprimento físico do aparelho e a distância da amostra até os microfones, bem como a verificação do

afastamento entre os microfones e suas possíveis influências no grau de precisão das medições.