

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ACÚSTICA EM CÂMARAS REVERBERANTES:
UM ESTUDO SOBRE A CONTRIBUIÇÃO PARA A POTÊNCIA ACÚSTICA DEVIDO
A POSIÇÃO DA FONTE DE RUÍDO PRÓXIMA AOS CONTORNOS

MARCO ANTONIO NABUCO DE ARAUJO

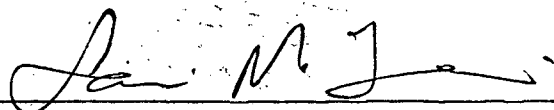
FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
NOVEMBRO-1980

MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ACÚSTICA EM CÂMARAS REVERBERANTES:
UM ESTUDO SOBRE A CONTRIBUIÇÃO PARA A POTÊNCIA ACÚSTICA DEVIDO
A POSIÇÃO DE FONTE DE RUÍDO PRÓXIMA AOS CONTORNOS

MARCO ANTONIO NABUCO DE ARAUJO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.

Orientador



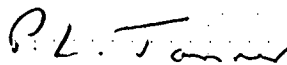
Prof. Arno Blass, Ph.D.

Coordenador

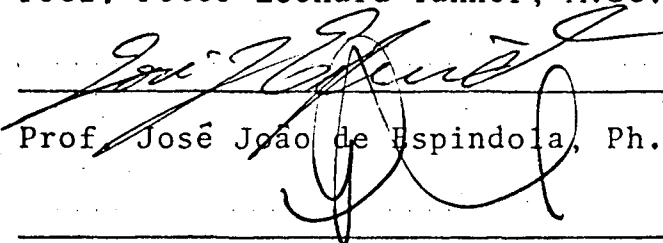
BANCA EXAMINADORA




Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.



Prof. Peter Leonard Tanner, M.Sc.



Prof. José João de Espindola, Ph.D.



Prof. Guilherme M. de La Penha, Ph.D.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, pela paciência e orientação neste trabalho.
- À Verinha pela datilografia e iniciativa acima de qualquer crítica.
- Ao Prof. Peter Leonard Tanner, Parú (Adilto), João, Maneca (Manoel) e Baldoíno pela força e apoio na parte experimental.
- Aos Profs. José João de Espíndola, Roberto Heidrich, Renan Roberto Brazzalle e Roberto Jordan pela colaboração indispensável.
- Ao Olímpio e à Marilda pelo apoio.
- Ao IMETRO pelo apoio financeiro.
- Aos demais colegas e professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

RESUMO

A potência acústica tem um papel muito importante na redução do ruído sonoro uma vez que é uma característica da fonte de ruído como radiador sonoro.

E os métodos utilizados para a sua medição tem criado sérias controversias com relação aos resultados obtidos.

A medição da potência acústica em câmaras reverberantes leva a resultados menores do que aqueles obtidos segundo o método de campo livre, ou seja, realizado em câmaras anecóicas.

Uma das razões para isto é o fato da fonte de ruído ser colocada somente na região central da câmara quando realizada a medição da potência acústica emitida, embora o correto, nas im praticável, seria colocar em todas as posições possíveis no interior da câmara.

Este trabalho tem por finalidade quantificar o efeito da proximidade dos contornos à fonte de ruído.

Dois modelos matemáticos foram utilizados teoricamente, no primeiro, o método da imagem foi empregado para calcular a potência acústica emitida pela fonte de ruído localizada próxima à uma parede infinita, à uma aresta formada por dois planos infinitos e à um canto formado por três planos infinitos.

No segundo modelo a câmara foi considerada como um todo, isto é, com as superfícies refletoras, os modos de vibração e a absorção sonora.

Em seguida foi construído um modelo reduzido de uma câmara reverberante retangular e de uma fonte de ruído com a finalidade de comprovar a teoria.

Os resultados obtidos podem ser considerados bons e tal comprovação levou a sugestão de um novo fator de correção a ser inserido nas normas internacionais sobre a medição da potência acústica.

ABSTRACT

Sound power plays an important role in noise control because it is the only acoustic characteristics of the noisy equipment that can be used for assessment of noise levels.

In general, sound power measured in reverberation rooms are somewhat smaller than those measured in anechoic rooms.

One of the reasons for this discrepancy is the fact that the source is normally positioned at few positions in the central region of the reverberation chamber.

The purpose of this work is to quantify the effect of source position near reverberation chamber boundaries.

Two mathematical models have been used here. In the first one, the image method has been used for the calculation of sound power radiated by a source located near an infinite wall, near an edge formed by two infinite planes and near a corner formed by three infinite planes.

In the second method the chamber was considered as a whole, that is, with all its reflecting surfaces, its acoustic modes and acoustic absorption.

A small rectangular chamber model has been built in order to confirm the theory experimentally.

The results are considered good and a new correction factor is proposed to improve sound power measurements techniques in reverberation chambers.

| | |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| c | Velocidade do som no meio. |
| I | Intensidade acústica (W/m^2). |
| j | $\sqrt{-1}$ |
| k | Número de onda (ω/c). |
| L_x, L_y, L_z | Dimensões de uma sala retangular . |
| ℓ, m, n | Números inteiros de 0 a ∞ (números dos modos). |
| p | Pressão sonora (N/m^2). |
| p^2 | Pressão sonora média quadrática (N/m^2) ² . |
| Q | Eficácia de uma fonte de ruído (m^3/s). |
| TL | Perda na transmissão em dB. |
| W_b | Potência acústica emitida por uma fonte de ruído da região de contorno de uma câmara reverberante. |
| W_c | Potência acústica emitida por uma fonte de ruído da região de contorno da parede de uma câmara reverberante. |
| W_{in} | Potência acústica emitida por uma fonte de ruído da região central da câmara reverberante. |
| W_o | Potência acústica de campo livre. |
| W | Potência acústica emitida por uma fonte de ruído da região de contorno da aresta de uma câmara reverberante. |
| W_t | Potência acústica emitida por uma fonte de ruído de uma posição genérica no interior de uma câmara reverberante. |
| W_w | Potência acústica emitida por uma fonte de ruído da região de contorno de uma parede da câmara reverberante. |
| β | Admitância acústica das superfícies refletoras da câmara reverberante. |

$$\epsilon_0 = 1; \epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_4 = \dots \epsilon_l = 2$$

ψ Função característica.

ω Frequência angular (rad/s).

$\langle \rangle$ Média espacial.

\sim Quantidade complexa.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

| | |
|------------------------------------------|-----|
| INTRODUÇÃO | 001 |
| 1.1 - A Potência Acústica | 001 |
| 1.2 - Medição da Potência Acústica | 002 |
| 1.3 - O Problema | 002 |
| 1.4 - Objetivo | 003 |
| 1.5 - Método de Ataque do Problema | 003 |

CAPÍTULO II

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CONTRIBUIÇÃO PARA A POTÊNCIA ACÚSTICA DEVIDO À PROXIMIDADE DE UMA FONTE DE RUÍDO AOS CONTORNOS DE UMA CÂMARA REVERBERANTE .. | 007 |
| 2.1 - Introdução | 007 |
| 2.2 - Potência Acústica Emitida por Uma Fonte de Ruído da Re- gião de Contorno - MÉTODO DA IMAGEM | 009 |
| 2.2.a - Fonte de Ruído Próximo a Uma Parede Infinita ... | 009 |
| 2.2.b - Fonte de Ruído Próximo a Uma Aresta Formada por Dois Planos Infinitos | 013 |
| 2.2.c - Fonte de Ruído Próximo a Um Canto Formado por Três Planos Infinitos | 014 |
| 2.2.d - Potência Acústica Emitida Pela Fonte de Ruído da Região de Contorno | 014 |
| 2.3 - Potência Acústica Emitida por Uma Fonte de Ruído da Re- gião de Contorno Considerando a Câmara Reverberante e nas Propriedades | 016 |
| 2.3.a - Fonte de Ruído Próximo a Uma Parede da Câmara .. | 017 |
| 2.3.b - Fonte de Ruído Próximo a Uma Aresta da Câmara .. | 023 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3.c - Fonte de Ruído Próximo a Um Canto da Câmara ... | 024 |
| 2.3.d - Conclusões | 026 |
| 2.4 - Variância da Potência Acústica Emitida por Uma Fonte de Ruído da Região de Contorno | 029 |
| 2.5 - Conclusões | 035 |

CAPÍTULO III

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS TEÓRICAMENTE NO CAPÍTULO II | 045 |
| 3.1 - Introdução | 045 |
| 3.2 - O Modelo da Câmara Reverberante | 045 |
| 3.3 - O Modelo da Fonte de Ruído | 046 |
| 3.4 - Testes do Modelo | 047 |
| 3.5 - Técnica de Medição | 050 |
| 3.5.a - Método Para a Medição do Valor Médio Espacial do Nível de Pressão Sonora no Interior do Modelo | 052 |
| 3.5.b - Adaptação do Método Prático ao Teórico | 054 |
| 3.5.c - Método Experimental | 060 |
| 3.6 - Fontes de Erro | 062 |
| 3.7 - Resultados Obtidos | 065 |
| 3.8 - Conclusões | 065 |

CAPÍTULO IV

| | |
|--------------------------------------------|-----|
| SUMÁRIO E CONCLUSÕES | 092 |
| APÊNDICE A | |
| MEDIÇÃO DA PERDA NA TRANSMISSÃO (TL) | 096 |

APÊNDICE B

LEVANTAMENTO DO DIAGRAMA DE DIRETIVIDADE 100

APÊNDICE C

TERMINOLOGIA ACÚSTICA 104

APÊNCIDE D

CÓPIA DE TRABALHO PUBLICADO NO CONGRESSO INTERNACIONAL DE CONTRO-
LE DE RUÍDO - MIAMI - EUA107

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - A POTÊNCIA ACÚSTICA

Quando se deseja avaliar uma máquina ou equipamento ruidoso, tanto quantitativamente quanto qualitativamente, o nível de pressão sonora (SPL-Pressão sonora medida em um determinado ponto e expressa em escala logarítmica (dB)) pode não ser a quantidade física adequada.

Isto porque o valor medido para o SPL varia muito de acordo com o tipo de recinto em que a fonte se encontra, com a posição relativa entre o microfone e a fonte e com outras características inerentes à fonte de ruído.

O nível de potência acústica emitida por uma fonte de ruído é uma propriedade fundamental da mesma, uma vez que é uma quantidade que independe do local onde é medida. Por isso, a potência acústica é um parâmetro absoluto importante, que é usado para:

- 1 - Avaliar uma fonte de ruído como radiador sonoro;
- 2 - Auxiliar no desenvolvimento de máquinas e equipamentos silenciosos;
- 3 - Calcular o nível de pressão sonora a uma dada distância da máquina operando no meio específico.

1.2 - MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ACÚSTICA

Dois métodos diferentes podem ser utilizados para a medição da potência acústica em laboratório. Um é aquele que utiliza as medições em campo livre (W_0) que pode ser realizado em uma câmara anecóica, enquanto que o outro envolve medidas no campo difuso, que é encontrado em uma câmara reverberante.

A medição da potência acústica em câmaras anecóicas fornece resultados mais precisos do que os obtidos em câmaras reverberante, mas o custo de uma câmara anecóica é muito alto e o método utilizado muito complicado, o que justifica a tentativa de se melhorar a precisão no método que utiliza câmaras reverberantes.

Para o cálculo da potência acústica em câmaras reverberantes, várias posições da fonte de ruído no interior da câmara são utilizados. A potência acústica calculada de cada uma dessas posições da fonte de ruído é então, computada para o valor médio da potência acústica $\langle W_t \rangle$. Está demonstrado nas Ref. [1.1] a [1.5] que quando todas as posições possíveis no interior da câmara são considerados para a fonte de ruído no cálculo de $\langle W_t \rangle$, este valor se iguala ao de campo livre para a potência acústica W_0 .

1.3 - O PROBLEMA

O que ocorre é que na prática se encontra valores

mais altos para W_0 do que para $\langle W_t \rangle$ [1.6].

As normas internacionais [1.7 e 1.8] recomendam que a fonte não deve estar próxima meio comprimento de onda $\lambda/2$ (1.5 m) de qualquer um dos contornos da câmara, isto é, paredes, teto e assoalho, porque poucos valores medidos com a fonte próximo a parede podem resultar em um erro no valor médio da potência acústica e em um valor alto para o desvio padrão.

Estas posições não utilizadas da fonte de ruído próxima aos contornos pode ser um dos motivos para a discrepância nos valores de W_0 e $\langle W_t \rangle$.

1.4 - OBJETIVO

Na maioria das vezes, como já foi dito, a potência acústica é medida com a fonte de ruído situada somente na região central da câmara reverberante.

A finalidade deste trabalho é determinar uma maneira prática de corrigir este valor medido para o valor correto.

1.5 - MÉTODO DE ATAQUE DO PROBLEMA

Dois modelos matemáticos são considerados para resolver o problema.

No primeiro os contornos analisados são considera-

dos infinitos, isto é, uma parede infinita, um canto formado por dois planos infinitos e um canto formado por 3 planos infinitos. A sala é considerada ter 6 paredes, 12 arestas e 8 cantos.

O segundo modelo considera a sala como um todo, isto é, com seus modos, a absorção das superfícies da sala, e etc.

No final uma comparação dos resultados é apresentada.

Para comparação da teoria, um modelo reduzido de uma câmara retangular foi construído em madeira e um alto falante de pequenas dimensões é utilizado como fonte de ruído.

Os resultados teóricos obtidos foram aceitos para apresentação no Congresso Internacional de Controle de Ruído (INTERNOISE 80), Miami, Florida, EUA, dezembro 1980 [1.9].

LISTA DE REFERÊNCIA

[1.1] - SAMIR N. YOUSRI GERGES e FRANK J. FAHY, Journal of Sound and Vibration 1972, 25, pp. 39-50. "An analysis of the acoustic power radiated by a point dipole source into a rectangular reverberation chamber".

[1.2] - SAMIR N. YOUSRI GERGES e FRANK J. FAHY, Journal of Sound and Vibration, 1974, 32, pp 311-325. "An analysis of the acoustic power radiated into a reverberation chamber by a transversely vibrating slender bar".

[1.3] - SAMIR N. YOUSRI GERGES, International Noise Engineering Conference (INTER-NOISE) setembro 1979, Warszawa. "An analysis of the acoustic power radiated by quadrupole source into a reverberation chamber".

[1.4] - SAMIR N. YOUSRI GERGES, Journal of Sound and Vibration, 1980, 72(1). "The variance of sound power radiated by higher order sources in a reverberation chamber".

[1.5] - G.C. MALING, Jr. 1967 - The Journal of Acoustical Society of America 42, 859-865. Calculation of the acoustic power radiated by a monopole in a reverberation chamber.

[1.6] - TECHNICAL REVIEW - B & K - 1978 nº 3 - Discrepancies between sound power measurements in an anechoic chamber and a reverberation chamber.

[1.7] - ISO 3742 (1975) - Precision Methods for Discrete - Frequency and narrow-band sources in reverberation rooms.

[1.8] - ANSI - S1.21 - 1972 - Methods for the determination of sound power levels of small sources in reverberation rooms.

[1.9] - S.N. YOUSRI GERGES e M.A.N. DE ARAUJO, INTERNOISE 80 Acoustic power contribution due to source near the reverberation chamber boundaries. Congresso Internacional de Controle de Ruído Miami - EUA. - DEZEMBRO - 1980.

CAPÍTULO II

CONTRIBUIÇÃO PARA A POTÊNCIA ACÚSTICA DEVIDO À PROXIMIDADE DE
UMA FONTE DE RUÍDO AOS CONTORNOS DE UMA CÂMARA REVERBERANTE2.1 - INTRODUÇÃO

A finalidade deste capítulo é apresentar os métodos utilizados para o cálculo da potência acústica emitida por uma fonte de ruído nas proximidades dos contornos de uma câmara reverberante.

Segundo as referências [2.1 a 2.5], a potência acústica normalizada média emitida por uma fonte de ruído no interior de uma câmara reverberante, pode ser escrita como:

$$\frac{1}{W_0} \int_V W_t(x,y,z) dV = \left\langle \frac{W_t(x,y,z)}{W_0} \right\rangle = 1 \quad \dots (2.1)$$

onde

W_t é a potência acústica emitida pela fonte de ruído no interior de uma sala reverberante para uma posição genérica (x,y,z) da fonte.

W_0 é o valor de campo livre para a potência acústica emitida pela fonte de ruído.

O símbolo $\langle \rangle$ significa média espacial.

Partindo da equação (2.1), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{W_t(x,y,z)}{W_0} \right\rangle &= \frac{1}{V} \int_V \left[\frac{W_b(x,y,z) + W_{in}(x_2,y_2,z_2)}{W_0} \right] dV = \\ &= \frac{1}{V} \int_{V_1} \frac{W_b(x_1,y_1,z_1)}{W_0} dV_1 + \frac{1}{V} \int_{V_2} \frac{W_{in}(x_2,y_2,z_2)}{W_0} dV_2 = \\ &= \left\langle \frac{W_b(x_1,y_1,z_1)}{W_0} \right\rangle + \left\langle \frac{W_{in}(x_2,y_2,z_2)}{W_0} \right\rangle = 1 \quad \dots (2.2) \end{aligned}$$

onde

$W_b(x_1,y_1,z_1)$ é a potência acústica emitida pela fonte de ruído na posição (x_1,y_1,z_1) , próxima aos contornos da sala reverberante na região compreendida entre $\lambda/2$ e esses contornos (ver figura (2.1)).

$W_{in}(x_2,y_2,z_2)$ é a potência acústica emitida pela fonte de ruído na posição genérica (x_2,y_2,z_2) , situada na região central da sala reverberante (ver figura (2.1)).

$\left\langle \frac{W_b(x_1,y_1,z_1)}{W_0} \right\rangle$ é o valor médio de $W_b(x_1,y_1,z_1)/W_0$ normalizado se

gundo o volume total da câmara V .

$\left\langle \frac{W_{in}(x_2,y_2,z_2)}{W_0} \right\rangle$ é o valor médio de $W_{in}(x_2,y_2,z_2)/W_0$ normalizado

segundo o volume total da sala V .

Uma série de integrais foram resolvidas por integrações numéricas, e para isso foi desenvolvida uma subrotina (INT) que resolve integrais simples, duplas e triplas (Item 2.2d e 2.3).

2.2 - POTÊNCIA ACÚSTICA EMITIDA POR UMA FONTE DE RUÍDO DA REGIÃO DE CONTORNO - MÉTODO DA IMAGEM

2.2.a - FONTE DE RUÍDO PRÓXIMA A UMA PAREDE INFINITA

Ref. [2.1, 2.12 e 2.13] mostra que, quando um monopolo está próximo às paredes e aos cantos de uma sala reverberante, estes contornos podem ser considerados infinitos para efeito de cálculo da potência acústica emitida pela monopolo nesta região. A fim de que fosse encontrada uma expressão para esta potência acústica, utilizou-se o método da imagem neste ítem, e no ítem (2.3), um outro modelo, considerando a sala e suas características.

Segundo o método da imagem, uma fonte pontual próxima a uma superfície refletora possui uma imagem que pode ser entendida como sendo uma outra fonte de mesma eficácia e em fase.

A figura (2.2) ilustra o problema considerando no caso uma parede rígida infinita.

Tomando-se o corte da figura (2.2), podemos encontrar a expressão para a pressão sonora (rms) em um ponto qualquer $P(r, \psi)$ e em seguida a potência acústica emitida pela fonte S em

função da distância desta à parede em consideração (ver figura (2.3)).

A pressão sonora complexa \tilde{P} no ponto (r, ψ) é dada por |2.7|:

$$\tilde{P} = \frac{j\rho_0 ckQ}{4\pi} e^{j\omega t} \left[\frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{jkr_2}}{r_2} \right] \quad \dots (2.3)$$

onde

$\rho_0 c$ = impedância específica do meio (rayl)

k = número de onda (ω/c)

Q = eficácia (m^3/s).

Se na figura (2.3) for considerado r grande, comparado com x , pode-se escrever:

$$r_1 \approx r - x \cos\psi \quad \dots (2.4)$$

$$r_2 \approx r + x \cos\psi \quad \dots (2.5)$$

Substituindo as expressões (2.4) e (2.5) em (2.3), chega-se a:

$$\tilde{P} = \frac{j\rho_0 ckQ}{4\pi} e^{j(\omega t - kr)} \left[\frac{2r \cos(kx \cos\psi) + j2x \cos\psi \operatorname{sen}(kx \cos\psi)}{r^2 - x^2 \cos^2\psi} \right] \quad \dots (2.7)$$

Sabe-se das referências [2.1 a 2.8] que a intensidade sonora I é:

$$I = \frac{\rho^2}{2\rho_0 c} \quad \dots (2.8)$$

onde p é o módulo da pressão sonora (rms).

Calculando o módulo da expressão (2.7) tem-se:

$$|p| \approx \left(\frac{\rho_0 c k Q}{4\pi} \right)^2 \left[\frac{4r^2 \cos^2(kx \cos\psi) + 4x^2 \cos^2\psi \sin^2(kx \cos\psi)}{(r^2 - x^2 \cos^2\psi)^2} \right] \dots (2.9)$$

Como $r \gg x$ e $r^2 \gg x^2$, pode-se fazer algumas aproximações em (2.9), e tem-se:

$$|p| \approx p^2 = \left(\frac{\rho_0 c k Q}{4\pi} \right)^2 \left[\frac{4 \cos^2(kx \cos\psi)}{r^2} \right] \dots (2.10)$$

Colocando-se (2.10) na expressão da intensidade sonora (2.8), chega-se a:

$$I = \frac{\rho_0 c k^2 Q^2}{34\pi^2} \left[\frac{4 \cos^2(kx \cos\psi)}{r^2} \right] \dots (2.11)$$

A potência acústica emitida por uma fonte sonora pode ser calculada no campo afastado [2.6 a 2.8] segundo a seguinte expressão

$$W = \int_s I ds \dots (2.12)$$

onde

s é uma superfície fechada que envolve a fonte

W é potência acústica emitida

Da figura (2.4) podemos encontrar a expressão para o elemento de área ds

$$ds = 2\pi r^2 \sin\psi \, d\psi \dots (2.13)$$

A expressão (2.12) passa então a ser

$$W_W(x) = \int_0^{\pi/2} \frac{\rho_0 c k^2 Q^2}{4\pi} \cos^2(kx \cos\psi) \sin\psi \, d\psi \quad \dots (2.14)$$

onde $W_W(x)$ é a potência acústica emitida por um monopolo próximo a uma parede infinita, em função da distância desta à parede (ver figura (2.3)).

Na integração da expressão (2.14), a variável é ψ , portanto pode-se utilizar um artifício matemático de modo a facilitar sua solução.

Fazendo:

$$y = kx \cos\psi \quad \dots (2.15)$$

$$d\psi = - \frac{dy}{kx \sin\psi} \quad \dots (2.16)$$

ψ varia de 0 a $\pi/2$ e assim desse modo y varia de kx a 0.

Logo:

$$W_W(x) = - \frac{\rho_0 c k^2 Q^2}{4\pi} \int_{kx}^0 \cos^2 y \cdot \frac{dy}{kx}$$

$$W_W(x) = \frac{\rho_0 c k^2 Q^2}{4\pi kx} \int_0^{kx} \cos^2 y \, dy$$

$$W_W(x) = \frac{\rho_0 c k^2 Q^2}{8\pi} \left[1 + \frac{\sin 2kx}{2kx} \right] \quad \dots (2.17)$$

Segundo as referências [2.6 e 2.7] a potência acústica emitida por um monopolo no campo livre é

$$W_o = \frac{\rho_o c k^2 Q^2}{8\pi}$$

e a potência acústica normalizada segundo W_o , emitida por um monopolo próximo a uma parede infinita rígida, é

$$\frac{W_w(x)}{W_o} = 1 + \frac{\text{sen } 2kx}{2kx} \quad \dots (2.18)$$

Algumas aproximações fizeram-se necessárias para se chegar à expressão (2.18). Estas aproximações advem do fato de se ter considerado a parede infinita. Se na prática houver uma sala cujas dimensões sejam grandes comparadas com λ , os resultados não ficarão comprometidos.

2.2.b - FONTE DE RUÍDO PRÓXIMA A UMA ARESTA FORMADA POR DOIS PLANOS INFINITOS

O resultado encontrado em (2.18) é idêntico aquele encontrado por Waterhouse [2.9]. Agora serão utilizadas, as demais expressões encontradas no mesmo trabalho para os outros contornos que tiveram sua validade demonstrada em [2.13].

A figura (2.5) ilustra o problema com a fonte de ruído localizada nas proximidades de um canto infinito.

De acordo com Waterhouse, a expressão para a potência acústica emitida por um monopolo próximo a um canto é

$$\frac{W_e(x,y)}{W_o} = 1 + \frac{\text{sen}2kx}{2kx} + \frac{\text{sen}2ky}{2ky} + \frac{\text{sen}2k\sqrt{x^2 + y^2}}{2k\sqrt{x^2 + y^2}} \dots (2.19)$$

2.2.c - FONTE DE RUÍDO PRÓXIMA A UM CANTO FORMADO POR TRÊS PLANOS INFINITOS

De modo análogo, isto é, utilizando o resultado encontrado em [2.9], tem-se

$$\begin{aligned} \frac{W_c(x,y,z)}{W_o} = & 1 + \frac{\text{sen}2kx}{2kx} + \frac{\text{sen}2ky}{2ky} + \frac{\text{sen}2kz}{2kz} + \frac{\text{sen}2k\sqrt{x^2 + y^2}}{2k\sqrt{x^2 + y^2}} + \\ & \frac{\text{sen}2k\sqrt{x^2 + z^2}}{2k\sqrt{x^2 + z^2}} + \frac{\text{sen}2k\sqrt{y^2 + z^2}}{2k\sqrt{y^2 + z^2}} + \frac{\text{sen}2k\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{2k\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \\ & \dots (2.20) \end{aligned}$$

As expressões (2.18), (2.19) e (2.20) foram demonstradas também por W.T CHU onde é desenvolvido um modelo matemático para representar uma câmara reverberante [2.12] e [2.13].

2.2.d - POTÊNCIA ACÚSTICA MÉDIA EMITIDA POR UMA FONTE DE RUÍDO SITUADA NA REGIÃO DE CONTORNO

Fazendo-se algumas considerações com relação às dimensões da sala e o comprimento de onda λ , pode-se utilizar as

expressões (2.18), (2.19) e (2.20) para que se encontre a potência acústica média emitida pela fonte de ruído da região de contorno.

Desse modo pode-se escrever a seguinte expressão para a potência acústica média emitida por uma fonte de ruído na região dos contornos:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{W_b}{W_o} \right\rangle = & \frac{2A}{V} \left[(L_x - \lambda)(L_y - \lambda) + (L_x - \lambda)(L_z - \lambda) + (L_y - \lambda)(L_z - \lambda) \right] + \\ & \frac{4B}{V} \left[L_x + L_y + L_z - 3\lambda \right] + \frac{8C}{V} \quad \dots (2.21) \end{aligned}$$

onde

$$A = \int_0^{\lambda/2} \frac{W_w(x)}{W_o} dx \quad \dots (2.22)$$

$$B = \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \frac{W_e(x,y)}{W_o} dx dy \quad \dots (2.23)$$

$$C = \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \frac{W_c(x,y,z)}{W_o} dx dy dz \quad \dots (2.24)$$

L_x ; L_y ; L_z são as dimensões da sala.

λ é o comprimento de onda

V é o volume da sala.

Para um melhor entendimento da expressão (2.21), ver figura (2.6 - a. b. c.).

Para se resolver as integrais das expressões (2.22), (2.23) e (2.24), foi utilizada uma subrotina FORTRAN para integração numérica.

Desse modo foram obtidos os seguintes resultados :

$$A = 0.61285 \lambda \quad \dots (2.25)$$

$$B = 0.36698 \lambda^2 \quad \dots (2.26)$$

$$C = 0.21271 \lambda^3 \quad \dots (2.27)$$

e a expressão (2.21) torna-se

$$\left\langle \frac{W_b}{W_o} \right\rangle = \frac{1}{L_x L_y L_z} \left[1.2257 \lambda \left[(L_x - \lambda)(L_y - \lambda) + (L_y - \lambda)(L_z - \lambda) + (L_x - \lambda)(L_z - \lambda) \right] + 1.46992 \lambda^2 \left[L_x + L_y + L_z - 3\lambda \right] + 1.70968 \lambda^3 \right] \quad \dots (2.28)$$

2.3 - POTÊNCIA ACÚSTICA EMITIDA POR UMA FONTE DE RUÍDO DA REGIÃO DE CONTORNO CONSIDERANDO A CÂMARA REVERBERANTE E SUAS PROPRIEDADES.

Até o momento a sala e suas características são ignoradas no cálculo da potência acústica, uma vez que se está trabalhando com paredes e cantos infinitos.

Neste ítem e nos seguintes o problema será resolvido como um todo considerando os modos de vibração e a absorção da sala em questão.

2.3.a - FONTE DE RUÍDO PRÓXIMA À UMA PAREDE DA CÂMARA.

Segundo as referências [2.1] a [2.6], pode-se escrever a expressão para a potência acústica emitida por um monopolo no interior de uma câmara reverberante retangular, ou seja,

$$\frac{W_t(x_o, y_o, z_o)}{W_o} = \frac{\beta \pi s}{V^2} \sum_{\ell, m, n} \frac{(\epsilon_\ell \epsilon_m \epsilon_n)^2 \psi^2(x_o, y_o, z_o)}{(K^2 - K_o^2)^2 + 4k_o^2 \beta^2 \left(\frac{\epsilon_\ell}{L_x} + \frac{\epsilon_m}{L_y} + \frac{\epsilon_n}{L_z} \right)^2} \dots (2.29)$$

onde

β é a admitância normal das superfícies da sala. β será considerado real, embora seja uma quantidade complexa.

$$K_o^2 = \left(\frac{\ell \pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{m \pi}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n \pi}{L_z} \right)^2 \dots (2.30)$$

ℓ, m, n são números inteiros positivos (0, 1, 2, 3 ...)

k = número de onda do sinal da fonte

ω = frequência (rad/s)

C = velocidade do som no meio

$\epsilon_\ell = 1; (\ell=0)$

$\epsilon_\ell = 2; (\ell \neq 0)$

(x_0, y_0, z_0) = coordenadas da fonte sonora

$\psi(x_0, y_0, z_0)$ = função característica da câmara

$$\psi(x_0, y_0, z_0) = \cos \frac{\ell \pi x_0}{L_x} \cdot \cos \frac{m \pi y_0}{L_y} \cos \frac{n \pi z_0}{L_z} \quad \dots (2.31)$$

V = volume da sala de dimensões L_x, L_y e L_z

e a potência acústica média é

$$\left\langle \frac{W_t}{W_0} \right\rangle = \frac{1}{V} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \frac{W_t(x_0, y_0, z_0)}{W_0} dz_0 dy_0 dx_0 \quad \dots (2.32)$$

Se forem consideradas as frequências altas, quando ℓ, m e n são diferentes de zero, ter-se-á:

$$\epsilon_\ell = \epsilon_m = \epsilon_n = 2 \quad e$$

$$(\epsilon_\ell \epsilon_m \epsilon_n)^2 = 8^2$$

$$\frac{\epsilon_\ell}{L_x} + \frac{\epsilon_m}{L_y} + \frac{\epsilon_n}{L_z} = \frac{S}{V}$$

onde S é a área de toda a superfície interna da sala.

$$S = 2 (L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z) \quad \dots (2.33)$$

Desse modo pode-se reescrever a expressão. (2.29)

como:

$$\left\langle \frac{W_t}{W_0} \right\rangle = \frac{\beta \pi S \ 8^2}{V^2} \sum_{\ell, m, n} \frac{\frac{1}{V} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \psi^2(x_0, y_0, z_0) \ dz_0 \ dy_0 \ dx_0}{\left[(k^2 - k_0^2)^2 + \frac{4\beta^2 S^2}{V^2} K_0^2 \right]} \dots (2.34)$$

É demonstrado [2.2] que a expressão (2.34) é igual à unidade.

De maneira análoga pode-se calcular a potência a cústica emitida pela fonte de ruído de cada posição (x_0, y_0, z_0) em uma região próxima a uma parede, conforme a figura (2.7), e em seguida calcula-se a média espacial destas potências, que serão chamadas de $\left\langle \frac{W_w}{W_0} \right\rangle$.

Ou seja

$$\left\langle \frac{W_w}{W_0} \right\rangle = \frac{1}{V} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{\lambda/2} \frac{W_t(x_0, y_0, z_0)}{W_0} \ dz_0 \ dy_0 \ dx_0 \dots (2.35)$$

No caso o valor médio foi encontrado integrando-se a expressão (2.34) nos limites mostrados acima, e normalizado segundo o volume total da sala.

Resolvendo a integral em (2.35), obtem-se

$$\left\langle \frac{W_w}{W_o} \right\rangle = \frac{\beta \pi S \ 8^2}{V^2} \sum_{\ell, m, n} \frac{\left[\frac{L_x L_y}{4V} \frac{\lambda}{4} + \frac{\text{sen } K_z \lambda}{4k_z} \right]}{(k^2 - k_o^2) + \frac{4\beta^2 S^2}{V^2} k_o^2} \quad \dots (2.36)$$

onde $k_z = \frac{n\pi}{L_z}$; $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

O trabalho supõe que se esteja trabalhando em altas frequências, e por conseguinte os modos de vibração, ou seja, as frequências características do sistema estão muito próximas uma da outra e o somatório em (2.36) pode ser transformado em uma integração, como será apresentado a seguir.

É demonstrado [2.6, 2.7] que o número de modos de vibração (N) existente abaixo de um determinado valor de k_o é aproximadamente

$$N \approx \frac{k_o^3 V}{6\pi^2} \quad \dots (2.37)$$

e que o número de modos compreendidos entre k_o e $k_o + dk_o$ é

$$dN = \frac{k_o^2 V dk_o}{2\pi^2} \quad \dots (2.38)$$

Desse modo a expressão (2.36) pode ser transformada para:

$$\left\langle \frac{W_w}{W_o} \right\rangle = \frac{\beta \pi S \ 8^2}{V^2} \int_0^{\infty} \frac{\frac{L_x L_y}{4V} \left[\frac{\lambda}{4} + \frac{\text{sen } k_z \lambda}{4k_z} \right] dN}{\left[(k^2 - k_o^2) + \frac{4\beta^2 S^2}{V^2} k_o^2 \right]} \quad \dots (2.39)$$

Como o numerador do integrando é função de k_0 , pode-se em seu lugar utilizar o valor médio desta função de modo a facilitar a integração.

Observando a figura (2.8), torna-se mais fácil visualizar o que vem a ser o valor médio do numerador do integrando.

A partir da figura (2.8) pode-se escrever:

$$k_x = k_0 \operatorname{sen} \theta \cos \psi \quad \dots (2.40.a)$$

$$k_y = k_0 \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \psi \quad \dots (2.40.b)$$

$$k_z = k_0 \cos \theta \quad \dots (2.40.c)$$

S_0 é a área do octante em cuja superfície vai ser calculado o valor médio em questão.

$$S_0 = \frac{\pi k_0^2}{2} \quad \dots (2.41)$$

ds = elemento de área

$$ds = k_0^2 \operatorname{sen} \theta \, d\psi \, d\theta \quad \dots (2.42)$$

Z_{wo} = valor médio do numerador

$$Z_{wo} = \frac{1}{S_0} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \frac{L_x L_y}{4V} \left[\frac{\lambda}{4} + \frac{\operatorname{sen} k_z \lambda}{4k_z} \right] k_0^2 \operatorname{sen} \theta \, d\psi \, d\theta \quad \dots (2.42)$$

Considerando somente as frequências em que $k \approx k_0$, isto é, os modos de vibração cujas frequências estão próximas a da fonte, a expressão (2.42) torna-se:

$$Z_{w_0} = \frac{k_o^2 L_x L_y \lambda}{16VS_o} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \left[1 + \frac{\text{sen}(2\pi\cos\theta)}{(2\pi\cos\theta)} \right] \text{sen}\theta \, d\psi \, d\theta$$

Resolvendo a integral por métodos numéricos temos:

$$Z_{w_0} = \frac{L_x L_y}{.8V\pi} 0.6128\pi\lambda \quad \dots (2.43)$$

Está demonstrado em [2.1] que

$$\frac{\beta\pi S}{V^2} \int_0^{\infty} \frac{dN}{\left[(K^2 - K_o^2)^2 + \frac{4\beta^2 S^2 k_o^2}{V^2} \right]} = 1 \quad \dots (2.44)$$

Pode-se então escrever:

$$\left\langle \frac{W_w}{W_o} \right\rangle = 8 Z_{w_0} \quad \dots (2.45)$$

Segundo as três últimas expressões,

$$\left\langle \frac{W_w}{W_o} \right\rangle = \frac{L_x L_y}{V} 0.6128 \lambda \quad \dots (2.46)$$

Multiplicando (2.46) por $\frac{V}{L_x L_y}$, deve-se encontrar

o resultado obtido para A na expressão (2.25), o que comprova o método utilizado nos itens anteriores.

$$A_s = \left\langle \frac{W_w}{W_o} \right\rangle \frac{V}{L_x L_y} = 0.6128 \lambda \quad \dots (2.47)$$

2.3.b - FONTE DE RUÍDO PRÓXIMA À UMA ARESTA DA CÂMARA.

Analogamente, levando em consideração os novos limites de integração segundo a figura (2.9), tem-se

$$\left\langle \frac{W_e}{W_o} \right\rangle = 8 Z_{eo} \quad \dots (2.48)$$

onde

$\left\langle \frac{W_e}{W_o} \right\rangle$ é a medida espacial da potência acústica emitida por um monopolo de cada posição (x_o, y_o, z_o) de uma região próxima a um canto aresta, conforme a figura (2.7).

$$Z_{eo} = \frac{1}{S_o} \left\{ \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{1}{V} \int_0^{L_x} \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \psi^2(x_o, y_o, z_o) dz_o dy_o dx_o \right\} \cdot k_o^2 \operatorname{sen} \theta d\theta d\psi \right\}$$

ou ainda:

... (2.49)

$$Z_{eo} = \frac{L_x k_o^2 \lambda^2}{32 S_o V} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \left[1 + \frac{\text{sen}(2\pi \cos\theta)}{2\pi \cos\theta} + \frac{\text{sen}(2\pi \text{sen}\theta \text{ sen}\psi)}{2\pi \text{sen}\theta \text{ sen}\psi} + \frac{\text{sen}(2\pi \cos\theta)}{2\pi \cos\theta} \frac{\text{sen}(2\pi \text{sen}\theta \text{ sen}\psi)}{2 \text{sen}\theta \text{ sen}\psi} \right] \text{sen}\theta \, d\theta \, d\psi$$

Integrando obtem-se

$$Z_{eo} = 0.367 \lambda^2 \frac{L_x}{8V}$$

e assim:

$$\left\langle \frac{W_e}{W_o} \right\rangle = 0.367 \lambda^2 \frac{L_x}{V} \quad \dots (2.50)$$

Multiplicando-se (2.50) por $\frac{V}{L_x}$ obtem-se B_s ou:

$$B_s = \frac{V}{L_x} \left\langle \frac{W_e}{W_o} \right\rangle = 0.367 \lambda^2 \quad \dots (2.51)$$

2.3.c - FONTE DE RUÍDO PRÓXIMO À UM CANTO DA CÂMARA.

Tomando como base os itens (2.3.a e b), e observando os limites de integração segundo a figura (2.10), pode-se escrever:

$$\left\langle \frac{W_c}{W_o} \right\rangle = 8 \cdot Z_{co} \quad \dots (2.52)$$

onde

$\langle \frac{W_c}{W_o} \rangle$ é a média espacial da potência acústica emitida por um monopolo de cada posição (x_o, y_o, z_o) na região de contorno conforme figura (2.10).

$$Z_{co} = \frac{1}{\dot{S}_o} \left\{ \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{1}{V} \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \psi^2(x_o, y_o, z_o) dz_o dy_o dx_o \right\} \right. \\ \left. k_o^2 \text{sen} \theta d\theta d\psi \right\}$$

$$Z_{co} = \frac{k_o^2 \lambda^2}{64 S_o V} \left\{ \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \left[1 + \frac{\text{sen}(2\pi \text{sen} \theta \cos \psi)}{2\pi \text{sen} \theta \cos \psi} + \right. \right.$$

$$+ \frac{\text{sen}(2\pi \text{sen} \theta \text{sen} \psi)}{(2\pi \text{sen} \theta \text{sen} \psi)} + \frac{\text{sen}(2\pi \text{sen} \theta \cos \psi) \text{sen}(2\pi \text{sen} \theta \text{sen} \psi)}{(4\pi^2 \text{sen}^2 \theta \cos \psi \text{sen} \psi)}$$

$$+ \frac{\text{sen}(2\pi \cos \theta)}{(2\pi \cos \theta)} + \frac{\text{sen}(2\pi \text{sen} \theta \cos \psi) \text{sen}(2\pi \cos \theta)}{4\pi^2 \text{sen} \theta \cos \theta \cos \psi}$$

$$+ \frac{\text{sen}(2\pi \text{sen} \theta \text{sen} \psi) \text{sen}(2\pi \cos \theta)}{4\pi^2 \text{sen} \theta \text{sen} \psi \cos \theta}$$

$$\left. + \frac{\text{sen}(2\pi \text{sen} \theta \cos \psi) \text{sen}(2\pi \text{sen} \theta \text{sen} \psi) \text{sen}(2\pi \cos \theta)}{8\pi^3 \text{sen}^2 \theta \cos \theta \text{sen} \psi \cos \psi} \right] \text{sen} \theta d\theta d\psi \left. \right\}$$

... (2.53)

Resolvendo a integral e, (2.53), tem-se

$$Z_{CO} = 0.02696 \lambda^3 \quad \dots (2.54)$$

e

$$\left\langle \frac{W_C}{W_O} \right\rangle = \frac{0.21586 \lambda^3}{V} \quad \dots (2.55)$$

Multiplicando (2.55) por V, tem-se

$$C_S = 0.21586 \lambda^3 \quad \dots (2.56)$$

2.3.d - CONCLUSÕES

A tabela abaixo fornece os valores encontrados para A, B, C, A_S, B_S e C_S, isto é, os valores através dos dois métodos (itens a-b-c e E) utilizados.

A expressão final para $\left\langle \frac{W_b}{W_O} \right\rangle$ é:

$$\left\langle \frac{W_b}{W_O} \right\rangle = \frac{A_1 \lambda}{V} \left[(L_x - \lambda)(L_y - \lambda) + (L_x - \lambda)(L_z - \lambda) + (L_y - \lambda)(L_z - \lambda) \right] + \frac{A_2 \lambda^2}{V} [L_x + L_y + L_z - 3\lambda] + \frac{A_3 \lambda^3}{V} \quad \dots (2.21)$$

| | A ₁ | A ₂ | A ₃ |
|-------------|----------------|----------------|----------------|
| 1º Método | 1.2257 | 1.46792 | 1.70968 |
| 2º Método | 1.2256 | 1.468 | 1.72688 |
| Diferença/% | 0.0082 | 0.0054 | 0.99 |

A expressão (2.21) pode ser apresentada em forma de curvas, de acordo com as dimensões da sala em consideração.

Para isto será empregado o seguinte artifício:

Plotar-se-ã os valores de $\left\langle \frac{W_b}{W_o} \right\rangle$ versus $\frac{L_x}{\lambda}$ onde

L_x será a maior dimensão da sala.

Fazendo-se $\frac{L_y}{L_x} = a_1$ e $\frac{L_z}{L_x} = a_2$, a expressão

(2.21) torna-se:

$$\left\langle \frac{W_b}{W_o} \right\rangle = \frac{1}{a_1 a_2} \frac{\lambda^3}{L_x^3} \left\{ A_1 \left[\frac{L_x}{\lambda} - 1 \left(a_1 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) + \frac{L_x}{\lambda} - 1 \left(a_2 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) + a_1 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \left(a_2 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) \right] + A_2 \left[\frac{L_x}{\lambda} - 1 + a_1 + a_2 - 3 \right] + A_3 \right\} \dots (2.57)$$

Na expressão (2.57), os valores de a_1 e a_2 foram escolhidos segundo relação apresentada nas referências [2.11] e [2.12], de modo a otimizar as dimensões de uma câmara reverberante.

A figura (2.11) apresenta três curvas para a

expressão (2.57).

Uma das condições para que a expressão (2.21) seja válida é:

$$\left\langle \frac{W_b}{W_o} \right\rangle \ll 1 \quad (2.58)$$

e desse modo pode-se encontrar a frequência mínima aproximada para que (2.58) seja verdadeira.

Tomando-se como base uma sala cúbica, $L_x = L_y = L_z = L$ tem-se:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{W_b}{W_o} \right\rangle &= \frac{1}{L^3} \left\{ A_1 \lambda \left[3 (L-\lambda)^2 \right] + A_2 \lambda^2 \left[3 (L-\lambda) \right] + A_3 \lambda^3 \right\} = \\ &= \frac{1}{L^3} \left\{ 3A_1 \left[L^2 \lambda - 2L\lambda^2 + \lambda^3 \right] + 3A_2 \left[L\lambda^2 - \lambda^3 \right] + A_3 \lambda^3 \right\} = \\ &= \left\{ 3A_1 \left[\frac{\lambda}{L} - 2 \frac{\lambda^2}{L^2} + \frac{\lambda^3}{L^3} \right] + 3A_2 \left[\frac{\lambda^2}{L^2} - \frac{\lambda^3}{L^3} \right] + A_3 \frac{\lambda^3}{L^3} \right\} = \\ &= 3A_1 \frac{\lambda}{L} - 6A_1 \frac{\lambda^2}{L^2} + 3A_1 \frac{\lambda^3}{L^3} + 3A_2 \frac{\lambda^2}{L^2} - 3A_2 \frac{\lambda^3}{L^3} + A_3 \frac{\lambda^3}{L^3} = \\ &= \left[A_3 - 3A_2 + 3A_1 \right] \frac{\lambda^3}{L^3} + \left[3A_2 - 6A_1 \right] \frac{\lambda^2}{L^2} + 3A_1 \frac{\lambda}{L} \end{aligned}$$

Substituindo agora os valores de A_1 , A_2 e A_3 , tem-se

$$\left\langle \frac{W_b}{W_o} \right\rangle = 0.99968 \frac{\lambda^3}{L^3} - 2.9496 \frac{\lambda^2}{L^2} + 3.6768 \frac{\lambda}{L} \quad \dots (2.59)$$

Para:

$$\left\langle \frac{W_b}{W_o} \right\rangle = 1 \quad \text{tem-se que:}$$

$$\frac{\lambda}{L} \approx 0.36625 \quad \text{ou} \quad \frac{L}{\lambda} \approx 2.73$$

ou ainda:

$$f \approx \frac{928.33}{L} \quad \dots (2.60)$$

A expressão (2.60) apresenta o valor mínimo da frequência f para a qual a expressão (2.21) é válida. Desse modo deve-se trabalhar com " f " ligeiramente maior, pelo menos para que se tenha uma boa aproximação.

2.4 - VARIÂNCIA DA POTÊNCIA ACÚSTICA EMITIDA POR UMA FONTE DE RUÍDO DA REGIÃO DE CONTORNO

Com o valor médio da potência acústica emitida por uma fonte de ruído em uma câmara reverberante, necessita-se de outro parâmetro que forneça informações a respeito da confiabilidade dos resultados, por exemplo, em uma certa frequência.

Estes parâmetros são a variância e o desvio padrão que serão normalizados segundo o volume total da sala como no cálculo da média.

A variância pode ser escrita como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{V} \int_0^{L_z} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \left[\frac{W_t(x,y,z)}{W_0} - \left\langle \frac{W_t(x,y,z)}{W_0} \right\rangle \right]^2 dx dy dz \quad \dots (2.61)$$

onde:

V = volume da sala

$W_t(x,y,z)$ = potência acústica emitida pela fonte de ruído no interior de uma câmara reverberante para uma posição genérica (x,y,z) .

$$\left\langle \frac{W_t(x,y,z)}{W_0} \right\rangle \approx 1 \quad \text{ver figura (2.1)}$$

Pode-se separar a integral da expressão (2.61) em duas partes e, utilizando-se o resultado da expressão (2.1), pode-se escrever:

$$\sigma^2 = \frac{1}{V} \int_V \left[\frac{W_t(x,y,z)}{W_0} - 1 \right]^2 dV = \frac{1}{V} \int_{V_1} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} - 1 \right]^2 dV_1 + \frac{1}{V} \int_{V_2} \left[\frac{W_{in}(x,y,z)}{W_0} - 1 \right]^2 dV_2 = \sigma_b^2 + \sigma_{in}^2 \quad \dots (2.62)$$

onde

σ_{in}^2 é a variância calculada a partir de N posição da fonte na região central da câmara

V_1 é o volume correspondente à região de contorno e

V_2 é o volume correspondente à região central (figura (2.1))

$$V_1 = L_x L_y L_z - (L_x - \lambda)(L_y - \lambda)(L_z - \lambda)$$

Se o objetivo é encontrar uma expressão para a primeira parcela de (2.62), que será chamada de σ_b^2 , logo

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{V} \int_{V_1} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} - 1 \right]^2 dV_1 = \frac{1}{V} \left[\int_{V_1} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} \right]^2 dV_1 - 2 \int_{V_1} \frac{W_b(x,y,z)}{W_0} dV_1 + \int_{V_1} dV_1 \right] \quad \dots (2.63)$$

ou ainda

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{V} \int_{V_1} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} \right]^2 dV_1 + \frac{V_1}{V} - \frac{2}{V} \int_{V_1} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} \right] dV_1 \quad \dots (2.64)$$

$$\text{Sabendo que } V_1 = V_w + V_e + V_c \quad \dots (2.65)$$

onde

V_w = volume correspondente à região próxima as paredes (figura 2.6-a).

V_e = volume correspondente à região próxima aos cantos arestas (figura 2.6-b).

V_c = volume correspondente à região próxima aos cantos (Figura 2.6-c)

pode-se então escrever

$$\frac{1}{V} \int_{V_1} \left[\frac{W_t(x,y,z)}{W_0} \right]^2 dV_1 = \frac{1}{V} \int_{V_w} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} \right]^2 dV_w +$$

$$\frac{1}{V} \int_{V_e} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} \right]^2 dV_e + \frac{1}{V} \int_{V_c} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} \right]^2 dV_c \quad \dots (2.66)$$

Utilizando-se agora as expressões (2.18), (2.19) e (2.20), pode-se escrever:

$$\frac{1}{V} \int_{V_w} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} \right]^2 dV_w = 2 \left[(L_x - \lambda)(L_y - \lambda) + (L_x - \lambda)(L_z - \lambda) + \right.$$

$$\left. (L_y - \lambda)(L_z - \lambda) \right] \int_0^{\lambda/2} \left[\frac{W_w(x)}{W_0} \right]^2 dx_1 \quad \dots (2.67)$$

$$\frac{1}{V} \int_{V_e} \left[\frac{W_b(x,y,z)}{W_0} \right]^2 dV_e = 4 [L_x + L_y + L_z - 3\lambda] \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \left[\frac{W_e(x,y)}{W_0} \right]^2 dx dy$$

$$\dots (2.68)$$

$$\frac{1}{V} \int_{V_c} \left[\frac{W_b(x, y, z)}{W_o} \right]^2 dV_c = 8 \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \left[\frac{W_c(x, y, z)}{W_o} \right]^2 dx dy dz \quad \dots (2.69)$$

A integral $\frac{1}{V} \int_{V_1} \left[\frac{W_b(x, y, z)}{W_o} \right] dV_1$ foi calculada no ítem 2.2 e

é dada pela expressão (2.21).

Para se resolver as integrais das expressões (2.67), (2.68) e (2.69), foi utilizada a subrotina de integração e foram obtidos os seguintes valores:

$$\int_0^{\lambda/2} \left[\frac{W_w(x)}{W_o} \right]^2 dx = 0.84443\lambda \quad \dots (2.70)$$

$$\int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \left[\frac{W_e(x, y)}{W_o} \right]^2 dx dy = 0.6905\lambda^2 \quad \dots (2.71)$$

$$\int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \int_0^{\lambda/2} \left[\frac{W_c(x, y, z)}{W_o} \right]^2 dx dy dz = 0.54657\lambda^3 \quad \dots (2.72)$$

Agrupando as expressões de (2.64) a (2.72), tem-se:

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{V} V_1 - 0.76234\lambda \left| (L_x - \lambda)(L_y - \lambda) + (L_y - \lambda)(L_z - \lambda)(L_z - \lambda)(L_x - \lambda) \right|$$

$$- 0.174\lambda^2 |L_x + L_y + L_z - 3\lambda| + 0.9188\lambda^3 \quad \dots (2.73)$$

Pode-se então plotar as curvas para σ_b^2 da mesma forma que para $\langle \frac{W_b}{W_o} \rangle$ em (2.57). Ver figura (2.12).

$$\sigma_b^2 = 1 - \left[\left(\frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) \left(a_1 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) \left(a_2 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) / \left(\left(\frac{L_x}{\lambda} \right)^3 a_1 a_2 \right) \right] -$$

$$- \frac{1}{\left(\left(\frac{L_x}{\lambda} \right)^3 a_1 a_2 \right)} \left\{ A_4 \left[\left(\frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) \left(a_1 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) + \left(a_1 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) \left(a_2 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \left(a_2 \frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) \left(\frac{L_x}{\lambda} - 1 \right) \right] + A_5 \left[\frac{L_x}{\lambda} + a_1 \frac{L_x}{\lambda} + a_2 \frac{L_x}{\lambda} - 3 \right] + A_6 \right\} \dots (2.74)$$

onde:

$$A_4 = 0.76234; \quad A_5 = 0.174; \quad A_6 = 0.9188$$

2.5 - CONCLUSÕES

As expressões (2.57) e (2.74) fornecem as informações necessárias para inferirmos a respeito do cálculo da potência acústica média emitida por uma fonte de ruído em uma câmara reverberante, retangular.

Os resultados podem também ser observados nas curvas das figuras (2.11) e (2.12).

LISTA DE REFERÊNCIAS

[2.1] - G.C. MALING, Jr. 1967 - Journal of the Acoustical Society of America 42,859-865 - Calculation of the acoustic power radiated by a monopole in a reverberant chamber.

[2.2] - S.N. YOUSRI GERGES, and F.J. FAHY 1972 - Journal of Sound and Vibration 25,39-50 An analysis of the acoustic power radiated by a point dipole source into a rectangular reverberation chamber.

[2.3] - S.N. YOUSRI GERGES, INTER-NOISE 79 - An Analysis of the acoustic power radiated by a quadrupole source into a reverberation chamber.

[2.4] - S.N. YOUSRI GERGES, and F.J. FAHY 1974, Journal of Sound and Vibration 32, 34-325. An analysis of acoustic power radiated into a reverberation chamber by a transversely vibrating slender Bar.

[2.5] - S.N. YOUSRI GERGES, Journal of Sound and Vibration 1980, 72(8) The variance of sound power radiated by high order sources in a reverberation chamber.

[2.6] - P.M. MORSE 1948 - Vibration and Sound New York: Mc Graw-Hill Co; second edition.

[2.7] - L.E. KINSLER & A.R. FREY - Fundamentals of acoustics - 1962 JOHN WILEY & SONS, INC. second edition.

[2.8] - Edited by Leo L. Beranek, 1971 - Noise and Vibration Control . Mc Graw-Hill Co.

[2.9] - R.V.WATERHOUSE' 1958 Jounal of Acoustical Society of America 27,247-258 - Interference Patters in Reverberant Sound Fields.

[2.10] - B.P. DEMIDOVICH, I.A. MARON, 1976 - Computational Mathematics - 2^a Edição- Mir Publishers - Moscou.

[2.11] - ANSI S1.21 - 1972 American National Standard, Method for the determination of Sound Power Levels for small sources in re_uverberation rooms.

[2.12] - W.T. CHU, "Computer studies of reverberant sound fields in rectangular rooms - eigenmode model"- National Research Council of Canada 97th Meeting of ASA, 11-15 June 1979.

[2.13] - W.T. CHU, "Eigenmode analysis of the interference patterns in reverberation sound fields". Journal of the acoustic society of America, 1980. 68(1), 184 - 190.

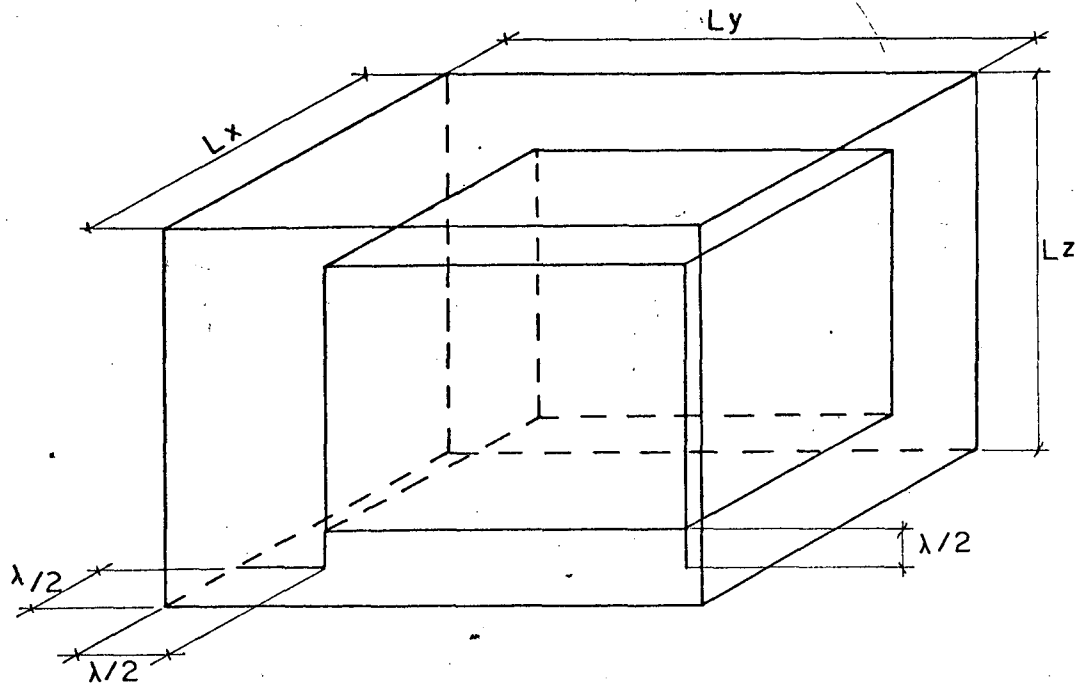


Figura (2.1)

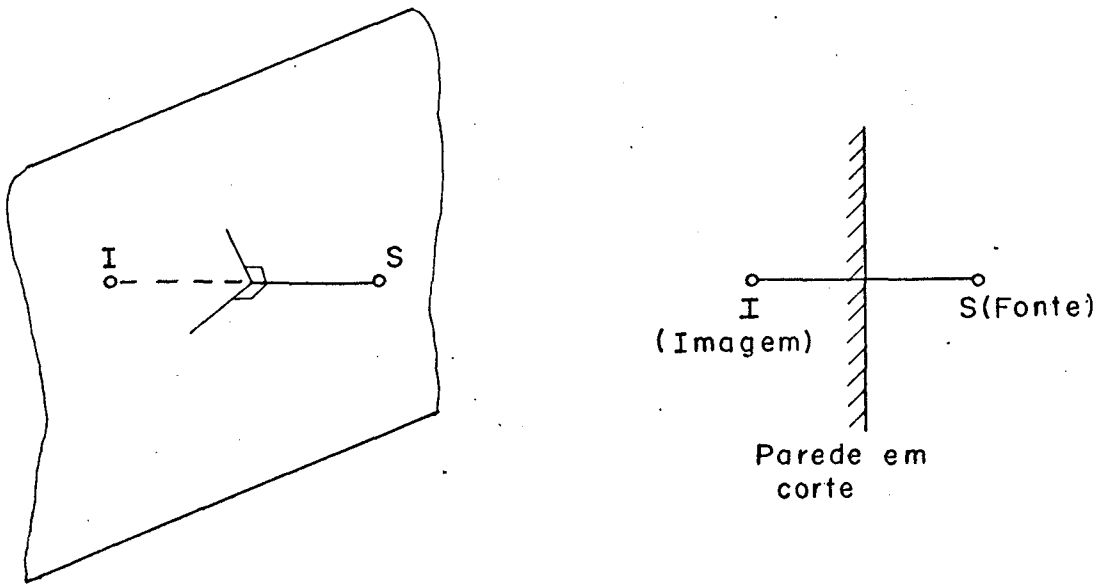
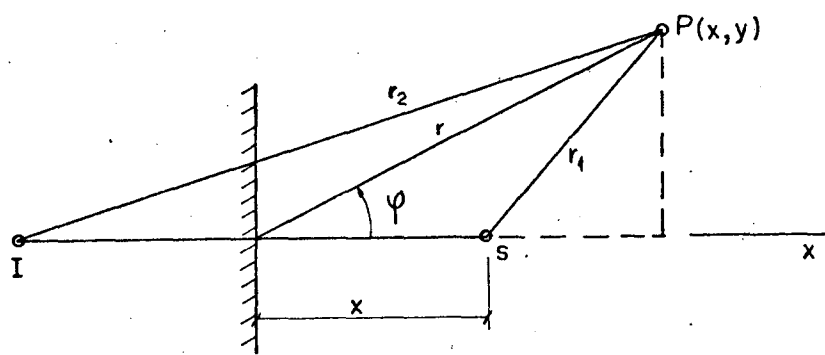
Região dos contornos ($\lambda/2$)

Figura (2.2)

Vista de uma parede com a fonte de sua imagem



PLANO y-z

Figura (2.3)

Vista em corte da Fonte, Imagem, Parede e um Ponto genérico P(x,y) onde foi calculada a pressão sonora

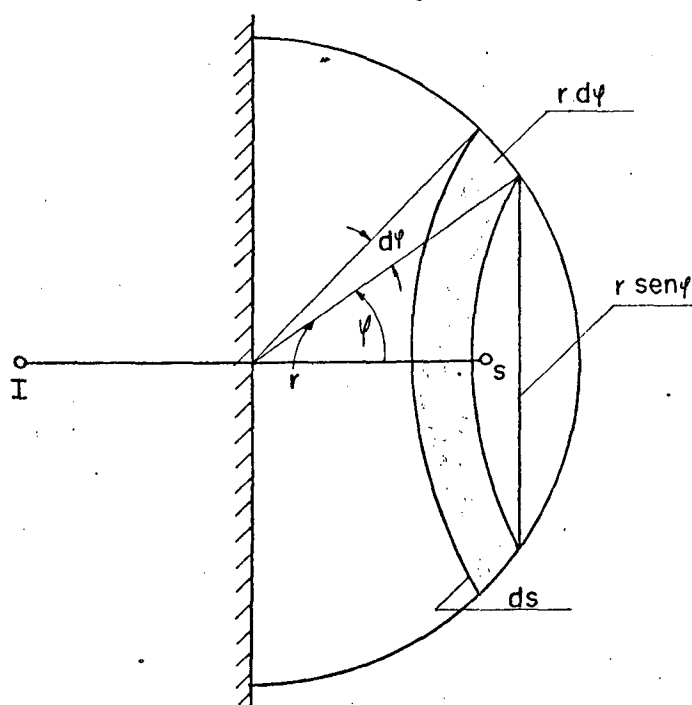
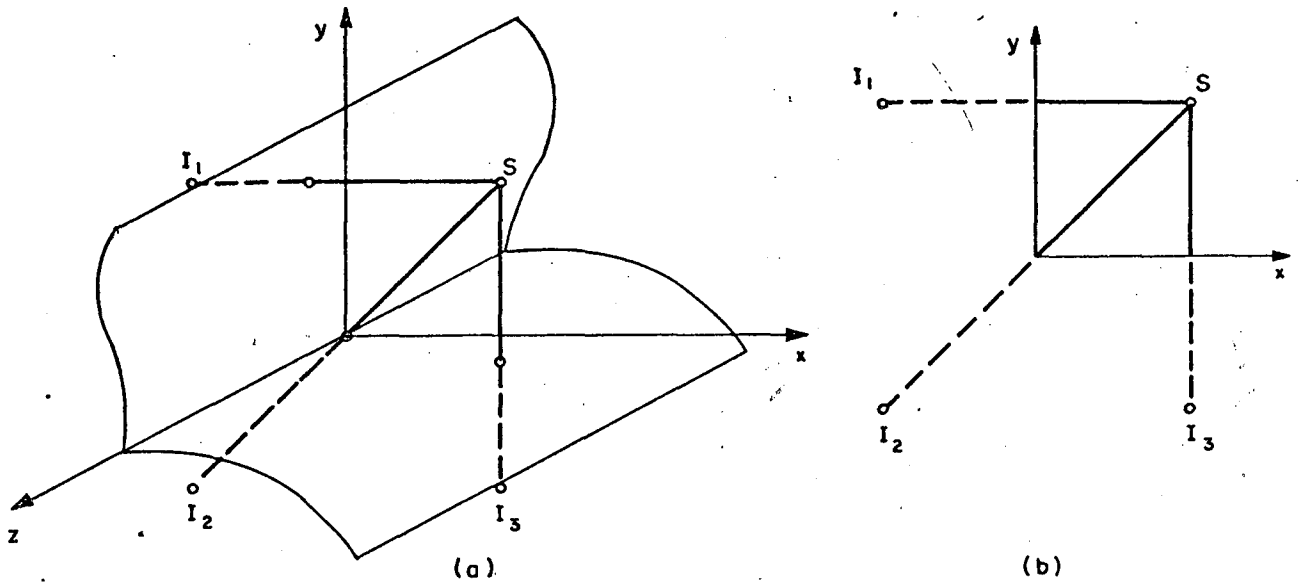


Figura (2.4)

Superfície de integração da intensidade sonora



VISTA DE UMA ARESTA COM A FONTE E SUAS IMAGENS

Figura (2.5)

Vista de uma aresta com a fonte e suas imagens

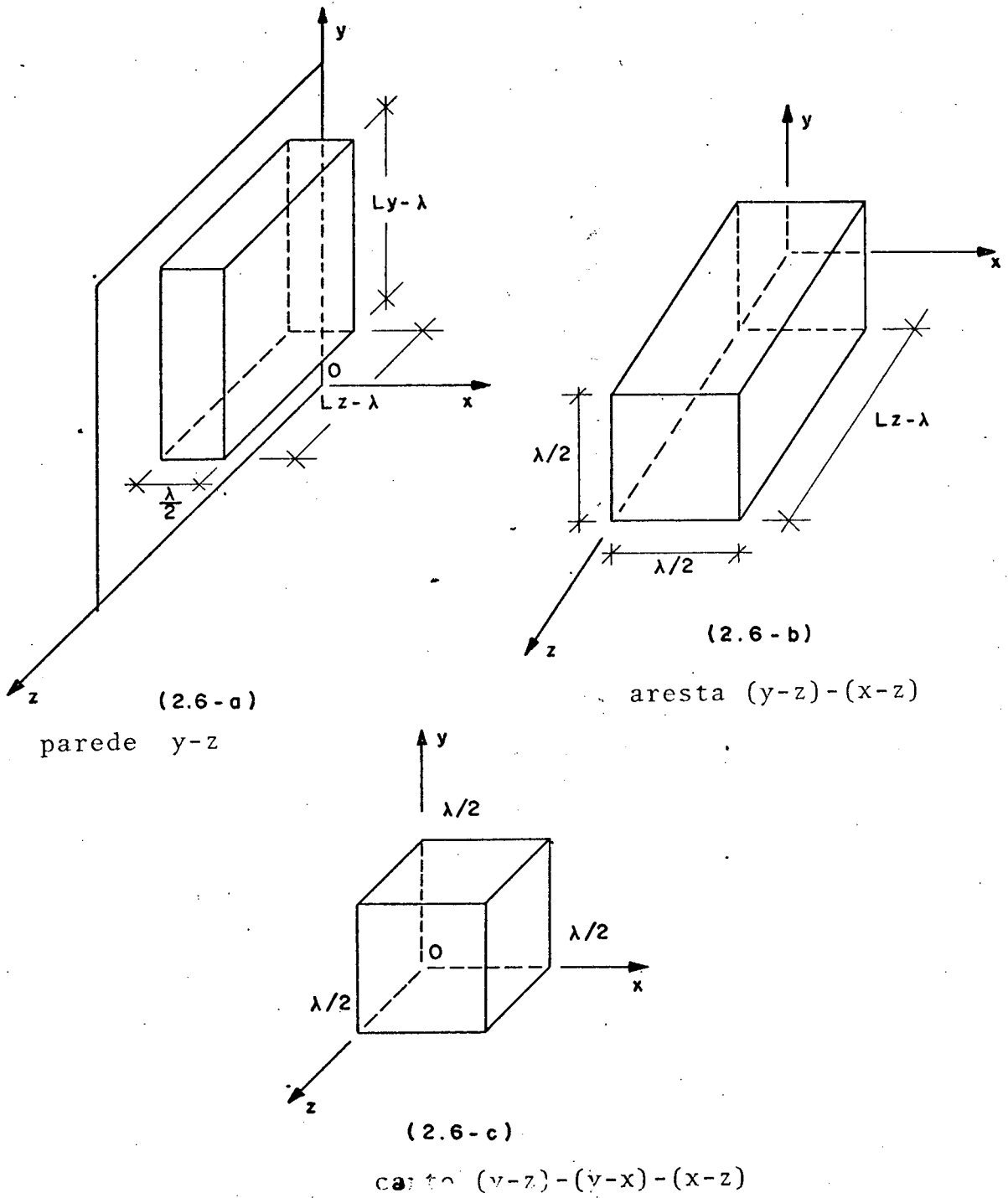


Figura (2.6)

Vistas de uma parede, aresta e um canto de uma sala

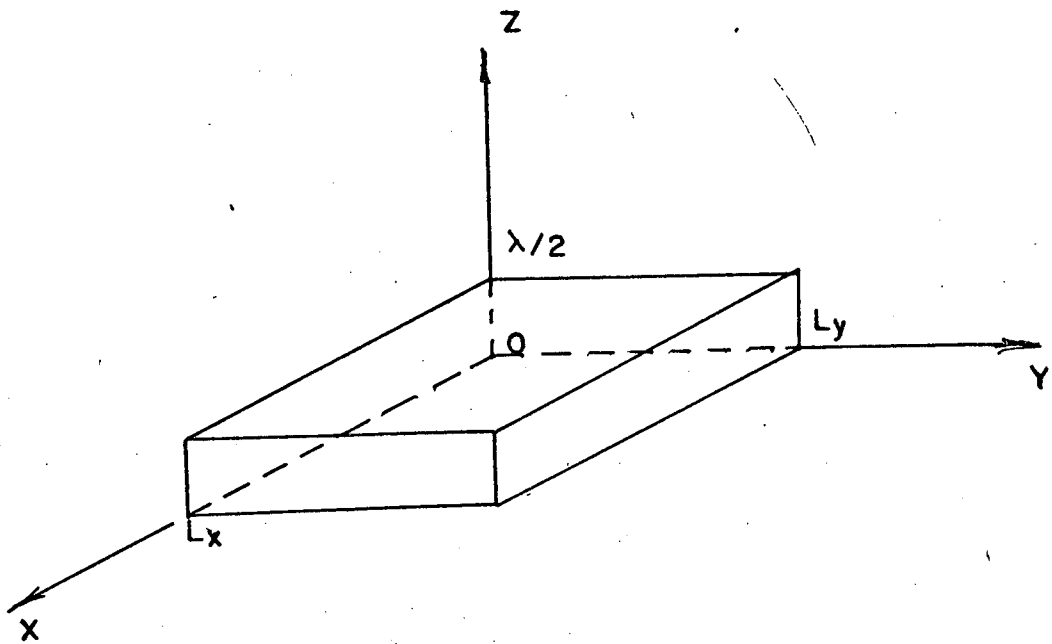


Figura (2.7)
Parede X-Y

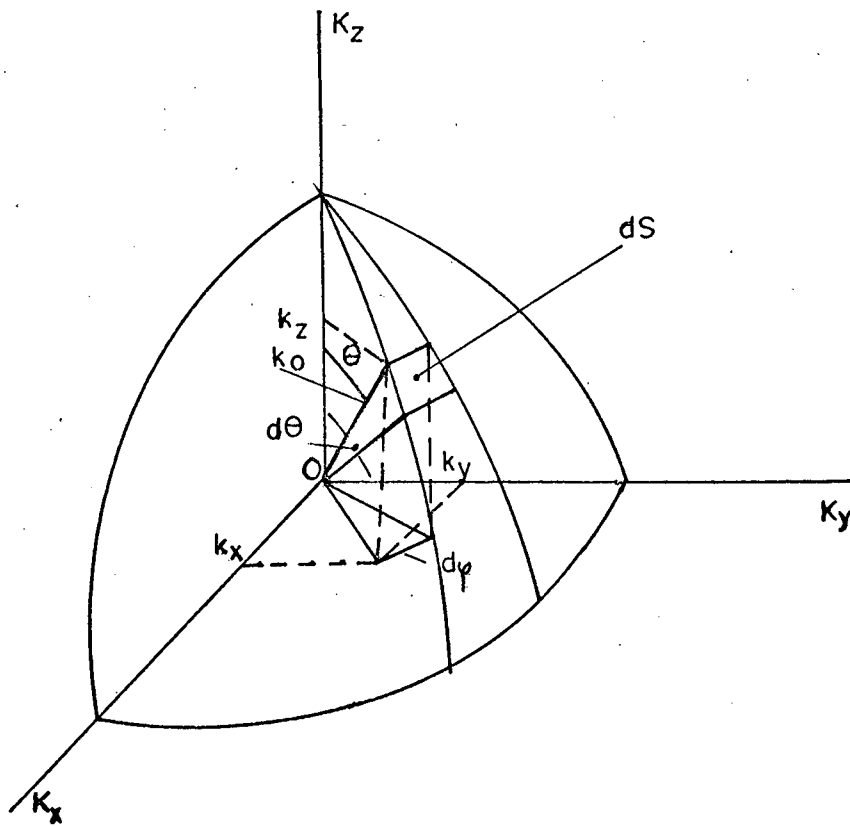


Figura (2.8)
Representação de um octante de raio K_0

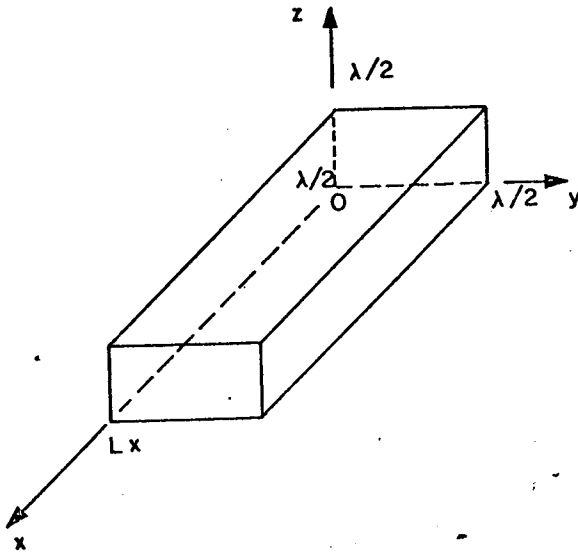


Figura (2.9)

Aresta formada pelas paredes x-z e x-y

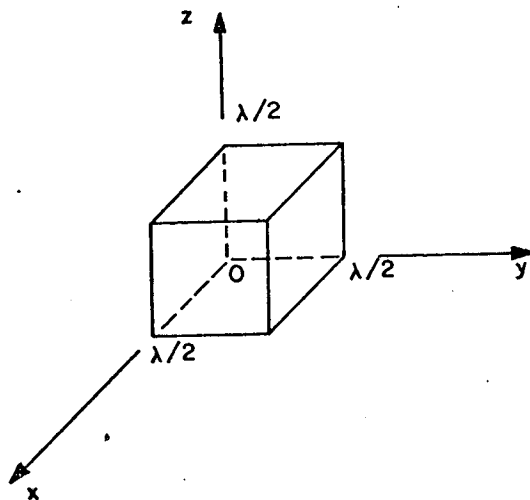


Figura (2.10)

Canto

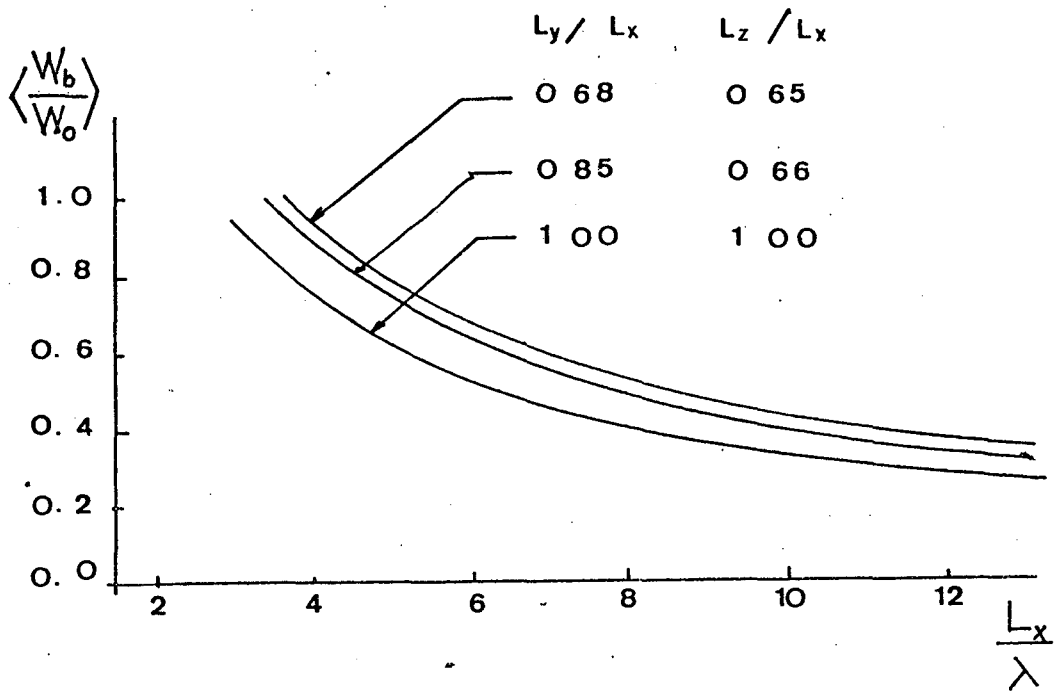


Figura (2.11)
Curva teórica de W_b/W_0 para algumas relações diferentes entre os lados da câmara reverberante

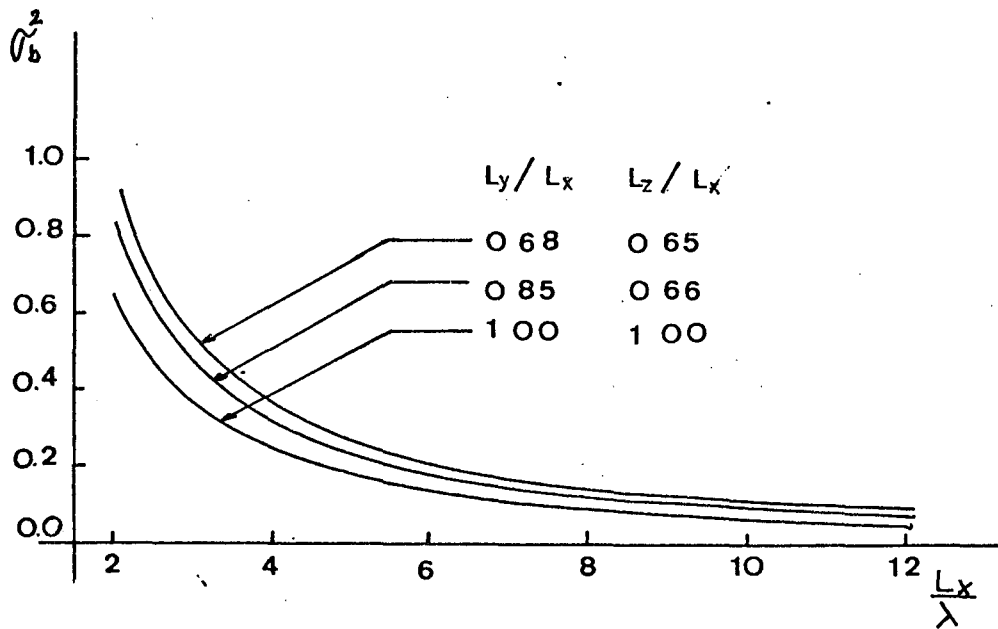


Figura (2.12)
Curva teórica de σ_b^2 para algumas relações diferentes entre os lados da câmara reverberante

CAPITULO III

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL PARA CONFIRMAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS TEÓRICAMENTE PARA A POTÊNCIA ACÚSTICA EMITIDA POR UMA FONTE DE RUÍDO DA REGIÃO DE CONTORNO.

3.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta um modelo experimental para uma câmara reverberante tendo como objetivo a confirmação dos valores obtidos teoricamente nas expressões (2.57) e (2.74) do capítulo II.

3.2 - O MODELO DA CÂMARA REVERBERANTE

Para as dimensões do modelo reduzido da câmara reverberante foram utilizados as relações ótimas entre os lados de uma sala retangular sugeridas nas REF. [3.1] e [3.2].

O modelo foi construído em madeira aglomerada de espessura 15mm e com as seguintes dimensões:

$$L_x = 0.62 \text{ m}$$

$$L_y = 0.408 \text{ m}$$

$$L_z = 0.53 \text{ m}$$

de modo que em (2.57) $a_1 = 0.66$ e $a_2 = 0.85$.

Com a finalidade de se aumentar a perda na transmissão (TL) do modelo, uma outra caixa de madeira com espessura de 22mm foi colocada externamente com areia lavada e seca entre ambas. A espessura da camada de areia foi de 74mm e os detalhes de construção do modelo podem ser observados nas figuras (3.1-a e 3.1-b). A perda na transmissão (TL) é um parâmetro importante para garantir a não interferência do ruído de fundo no experimento.

A energia sonora absorvida e transmitida pela parede de madeira aglomerada e pela areia colocada entre as duas caixas não chega a comprometer os resultados. (Ver apêndice A).

A definição de perda na transmissão (TL) pode ser colocada como $TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau}$ onde τ é o coeficiente de transmissão do sistema. A partir da figura (3.16) pode-se colocar que para a frequência de 2500Hz $TL \approx 16\text{dB}$ ou seja $\tau \approx 0.025$ o que significa que a quantidade de energia transmitida do modelo para o ambiente ou vice-e-versa é muito pequena. O tempo de reverberação foi medido e ficou em torno de 0.1 seg.. Considerando que a área de superfície interna do modelo é 1.5956m^2 , o coeficiente de absorção médio, segundo a fórmula Sabine, é igual a 13%.

3.3 - O MODELO DA FONTE DE RUÍDO

A teoria do capítulo II foi desenvolvida para fontes pontuais, isto é, que possuam dimensões reduzidas comparadas com o comprimento de onda (λ) sonora e que tenham características não-direcionais. Tais fontes são conhecidas como monopolo.

Com base nestas características, foram escolhidas as fontes de ruído que podem ser vistas nas figuras (3.2) e (3.3). A figura (3.4) e (3.5) apresenta os diagramas de diretividade para cada fonte. (Ver apêndice B).

A tabela 1, abaixo, apresenta uma comparação do comprimento de onda sonora com a maior dimensão de cada fonte utilizada em cada frequência.

| FREQUÊNCIA (Hz) | COMPRIMENTO DE ONDA λ (m) | MAIOR DIMENSÃO DA FONTE (m) |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 2500 | 0.137 | FONTE 1 0.061 |
| 3150 | 0.108 | FONTE 2 0.051 |
| 3500 | 0.098 | FONTE 2 0.051 |
| 4000 | 0.086 | FONTE 3 0.015 |
| 5000 | 0.068 | FONTE 3 0.015 |

Tabela 1

3.4 - TESTES DO MODELO

Um dos testes realizados foi a confirmação experimental de algumas frequências características do modelo (modos de vibração) calculados e ordenados anteriormente em computador. A figura (3.6) apresenta a lista destas frequências e duas curvas de resposta em frequência do modelo, para duas posições diferentes do

microfone.

A densidade modal do modelo foi calculada e é apresentada a seguir para uma faixa de 8Hz em torno da frequência de excitação da fonte. Experimentalmente é possível se observar que em altas frequências os modos da sala ficam muito próximos uns dos outros (figura (3.6)).

Segundo a referência [3.3], as densidades modais calculadas são:

| FREQUÊNCIA CENTRAL (Hz) | FAIXA DE FREQUÊNCIA (Hz) | DENSIDADE MODAL (Nº MODOS/Hz) |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 2500 | 8 | 6.5 |
| 3150 | 8 | 6.7 |
| 3500 | 8 | 6.8 |
| 4000 | 8 | 7.0 |
| 5000 | 8 | 7.4 |

Segundo a referência [3.2], algumas considerações devem ser feitas com relação aos modelos da sala e da fonte.

O volume da fonte de ruído deve ser de preferência menor que 1% do volume da sala. O volume da maior fonte é $V_{F_1} = 0.00013m^3$. Desse modo a fonte possui um volume menor que 0.1% do volume da sala

O raio aproximado do mecanismo de movimentação do microfone deve ser determinado a partir do desvio padrão calculado segundo a referência [3.2] pela seguinte expressão:

$$S = (n-1)^{-1/2} \left[\sum_{i=1}^n (L_i - L_m)^2 \right]^{1/2} \quad \dots (3.1)$$

Onde:

S é o desvio padrão em decibéis (dB)

L_i é o nível de pressão sonora medido em posições diferentes do microfone.

L_m é o valor médio aritmético dos níveis de pressão sonora L_i em dB.

n é o número de medições.

Os desvios padrão encontrados segundo a expressão (3.1) para cada frequência em que foi realizado o teste são:

| FREQUÊNCIA (Hz) | DESVIO PADRÃO S(dB) |
|-----------------|---------------------|
| 2500 | 2.4 |
| 3150 | 1.8 |
| 3500 | 3.5 |
| 4000 | 3.7 |
| 5000 | 3.3 |

Segundo os resultados obtidos para S , o número de posições recomendável para o microfone é $N_m = 15$ (quinze). Isto corresponde a uma distância de aproximadamente 1.03 metros a ser percorrida pelo microfone quando o valor médio é calculado automaticamente. Numa trajetória circular deveria ser usado um raio de 0.16m.

Devido às pequenas dimensões do modelo da sala, foi possível a construção de um mecanismo com 0.18m de raio. Isto implica que se fosse realizado a leitura do nível de pressão sonora a cada $\lambda/2$, seriam tomadas 16 (dezesesseis) posições do microfone para a frequência de 2500Hz e 33 (trinta e três) posições para a frequência de 5000Hz o que está dentro das normas das REF. [3.1] e [3.2].

3.5 - TÉCNICA DE MEDIÇÃO

O experimento teve por finalidade medir a potência acústica, média, normalizada segundo a potência acústica de campo livre, emitida por uma fonte de ruído localizada na região de contorno (ver figura (2.1)).

Para a medição da potência acústica de campo livre (W_0) é necessário o uso de uma câmara anecônica ou um espaço livre de obstáculo refletores. Quando a experiência foi realizada estas condições eram difíceis de serem encontradas e um método alternativo foi utilizado.

Já é sabido da teoria, que a potência acústica média medida em câmara reverberante para todas as posições possíveis da fonte no interior da sala é igual a potência acústica medida em campo livre, ou seja:

$$\langle W_t \rangle = W_0 \text{ respectivamente ver equação (2.1).}$$

Desse modo no lugar de se medir $\langle \frac{W_b}{W_0} \rangle$ (expressão

(2.57)), será medido $\langle \frac{W_b}{W_t} \rangle$.

A potência acústica medida no campo reverberante pode ser relacionada com o valor RMS da pressão sonora pela seguinte expressão, REF. [3.3]:

$$\langle W_t \rangle = \frac{\langle p_t^2 \rangle 0.16V}{4 T_r \rho_0 c} \dots (3.2)$$

Onde

$\langle P_t^2 \rangle$ é o valor da pressão sonora média quadrática medida no campo reverberante para qualquer posição da fonte.

V é o volume da fonte

T_r é o tempo de reverberação

$\rho_0 c$ é a impedância característica do meio.

E como sequência da expressão (3.2) pode-se escrever:

$$\langle W_b \rangle = \frac{\langle P_b^2 \rangle 0.16V}{4T_r \rho_0 c} \quad \dots (3.3)$$

onde

$\langle P_b^2 \rangle$ é o valor da pressão sonora média quadrática medida no campo reverberante para qualquer posição da fonte na região de contorno.

A partir das expressões (3.2) e (3.3) pode-se escrever uma relação para $\langle \frac{W_b}{W_o} \rangle$ como segue:

$$\langle \frac{W_b}{W_t} \rangle = \langle \frac{P_b^2}{P_t^2} \rangle \quad \dots (3.4)$$

3.5-a - MÉTODO PARA A MEDIÇÃO DO VALOR MÉDIO ESPACIAL DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO INTERIOR DO MODELO

A figura (3.7) mostra a variação espacial do nível de pressão sonora no interior da sala sendo excitada por um sinal senoidal.

Dois métodos podem ser utilizados para o cálculo do valor médio espacial da pressão sonora apresentada na figura (3.7).

O mais comum é o que o valor do nível de pressão sonora é medido em algumas posições e, em seguida, uma média logarítmica é efetuada segundo a seguinte expressão:

$$SPL_m = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n 10^{SPL_i/10} \right] \quad \dots (3.5)$$

onde

SPL_m é o nível de pressão sonora médio

SPL_i é o nível de pressão sonora medido para a posição i do microfone.

N é o número de amostras.

Outro método sugerido em [3.1 e 3.2] utiliza um circuito R-C para efetuar automaticamente a integração do sinal captado por um microfone que varia continuamente sua posição no interior da sala segundo uma trajetória circular.

Desse modo um tempo de integração $T = 2Rc$ [3.3] onde R é a resistência e C a capacitância do circuito Rc , é selecionado.

nado como sendo três vezes o tempo necessário para o microfone percorrer uma volta completa da trajetória.

No caso o tempo que o mecanismo do microfone necessita para dar uma volta completa é de 66 segundos e um tempo de 198 segundos deveria ser o escolhido.

A figura (3.8-a) apresenta a curva da onda estacionária para cada tempo de integração disponível no equipamento.

Para que o equipamento alcance o valor de estado estacionário durante cada integração realizada necessita-se, na pior das hipóteses, de um tempo de quatro vezes o tempo de integração para ser encontrado 98.2% do valor de estado estacionário.

Utilizando um tempo de integração de 300 segundos, ou seja, $\tau = R_c = 150$ segundos, para alcançar o estado estacionário seriam necessários 600 segundos ou 10 minutos. Como de início seriam realizados 120 medições, 20 horas de experiência seriam necessários.

Com a finalidade de otimizar o método experimental utilizado, um estudo prático do problema foi realizado. Como pode ser observado na figura (3.7) a onda estacionária se repete a cada revolução do microfone. Se um tempo de integração de 100 segundos for utilizado, esta periodicidade também pode ser observado (ver figura (3.8-b)). A observação deste fenômeno permite que o tempo necessário para a realização do experimento seja reduzido em até 3 vezes. O único cuidado a ser tomado é a verificação do sinal ter alcançado o estado estacionário. Na maioria das vezes o microfone se encontra no interior da sala em uma posição onde o nível de pressão sonora está próximo ao nível médio, isto faz com que duas ou uma rotação sejam suficientes.

3.5-b - ADAPTAÇÃO DO MÉTODO PRÁTICO AO TEÓRICO

Partindo-se da expressão (2.2) do capítulo II

$$\frac{\langle W_t \rangle}{W_o} = \frac{\langle W_b \rangle}{W_o} + \frac{\langle W_{in} \rangle}{W_o} = \frac{1}{V} \int_{V_1} \frac{W_b}{W_o} dV_1 + \frac{1}{V} \int_{V_2} \frac{W_{in}}{W_o} dV_2 \quad \dots (2.2)$$

pode-se escrever uma relação para $\langle W_b \rangle$ como segue:

$$\langle W_b \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_1} W_b dV_1 \quad \dots (3.6)$$

onde V_1 é o volume correspondente à região de contorno.

$$V_1 = V - (L_x - \lambda)(L_y - \lambda)(L_z - \lambda) \quad \dots (3.7)$$

A região de contorno pode ser dividida em 7 (sete) regiões menores correspondentes a cada contorno analisado.

Assim pode ser escrito que:

$$V_1 = V_{W_1} + V_{W_2} + V_{W_3} + V_{E_1} + V_{E_2} + V_{E_3} + V_C \quad \dots (3.8)$$

onde

V_{W_1} , V_{W_2} , V_{W_3} são os volumes correspondentes às regiões de contorno próximos às paredes da sala.

V_{E_1} , V_{E_2} , V_{E_3} são os volumes correspondentes às regiões de contorno próximas às arestas da sala.

V_C é o volume correspondente à região de contorno próxima ao can-

to da sala.

A figura (3.9) mostra uma parte da sala onde podem ser observados as regiões de volumes V_{W_2} , V_C e V_{E_2} .

A expressão (3.6) pode ser reescrita sob a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \langle W_b \rangle \propto \frac{1}{V} & \left[\left[2 \int_{V_{W_1}} P_w^2 dV_{W_1} + 2 \int_{V_{W_2}} P_w^2 dV_{W_2} + 2 \int_{V_{W_3}} P_w^2 dV_{W_3} \right] + \left[4 \int_{V_{e_1}} P_e^2 dV_{e_1} + 4 \int_{V_{e_2}} P_e^2 dV_{e_2} + 4 \int_{V_{e_3}} P_e^2 dV_{e_3} \right] + 8 \left[\int_{V_C} P_c^2 dV_C \right] \right] \\ & \dots (3.8) \end{aligned}$$

ou ainda:

$$\langle W_b \rangle \propto \left[X_1 + X_2 + X_3 + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Z \right] \dots (3.9)$$

onde X_1 , X_2 , X_3 , Y_1 , Y_2 , Y_3 e Z são definidos por analogia entre as expressões (3.9) e (3.8) e serão calculadas a seguir.

Considerando a figura (3.10-a), X_1 pode ser escrito como:

$$X_1 = \frac{2}{V} \left[\sum_{i=1}^{N_{WX}} \left[\sum_{j=1}^{N_{WY}} \left[\sum_{k=1}^{N_{WZ}} P_{wi,j,k}^2 \Delta_z \right] \Delta_y \right] \Delta_x \right] \dots (3.10)$$

onde

N_{wx} , N_{wy} e N_{wz} são os números de posições da fonte na região de contorno correpondente a uma das paredes nas direções x,y e z respectivamente (figura (3.10-a)).

$P_{wi,j,k}^2$ é o valor médio quadrático da pressão sonora medido com a fonte na região de contorno correspondente a parede.

A expressão (3.10) pode ainda ser modificada para:

$$X_1 = 2 \left[\frac{V_{w1}}{V \cdot N_{w1}} \left[\sum_{i=1}^{N_{w1}} P_{wi}^2 \right] \right] \quad \dots (3.11)$$

onde

N_{w1} é o número total de posições da fonte na região de contorno correspondente à parede 1.

$$N_{w1} = N_{wx} \cdot N_{wy} \cdot N_{wz}$$

de maneira analoga:

$$X_2 = 2 \frac{V_{w2}}{V \cdot N_{w2}} \left[\sum_{i=1}^{N_{w2}} P_{wi}^2 \right] \quad \dots (3.12)$$

e

$$X_3 = 2 \frac{V_{w3}}{V \cdot N_{w3}} \left[\sum_{i=1}^{N_{w3}} P_{wi}^2 \right] \quad \dots (3.13)$$

Observando a figura (3.10) e utilizando o mesmo

processo utilizado no cálculo de X_1 , pode-se escrever as expres
sões para Y_1 , Y_2 e Y_3 como

$$Y_1 = 4 \frac{V_{e_1}}{V \cdot N_{e_1}} \left[\sum_{i=1}^{N_{e_1}} P_{e_i}^2 \right] \quad \dots (3.14)$$

$$Y_2 = 4 \frac{V_{e_2}}{V \cdot N_{e_2}} \left[\sum_{i=1}^{N_{e_2}} P_{e_i}^2 \right] \quad \dots (3.15)$$

$$Y_3 = 4 \frac{V_{e_3}}{V \cdot N_{e_3}} \left[\sum_{i=1}^{N_{e_3}} P_{e_i}^2 \right] \quad \dots (3.16)$$

Onde N_{e_1} , N_{e_2} e N_{e_3} são os números de posições utilizados para a fonte de ruído nas respectivas regiões de contorno das arestas.

P_e^2 é o valor médio quadrático da pressão sonora medida para a fonte localizada próximo a uma aresta da sala.

Finalmente pode ser escrita a expressão para o canto da sala, Z , como segue:

$$Z = 8 \frac{V_c}{N \cdot V_c} \left[\sum_{i=1}^{N_c} P_{c_i}^2 \right] \quad \dots (3.17)$$

Onde N_c é o número de posições da fonte na região de contorno cor
respondente aos cantos da sala.

P_c^2 é o valor médio quadrático da pressão sonora medida para a fonte localizada próximo a um canto da sala.

Para o cálculo de $\langle W_t \rangle$ pode ser escrita a seguinte expressão geral, partindo da equação (2.1):

$$\langle W_t \rangle = \frac{1}{V} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} W_t(x,y,z) dx dy dz \quad \dots (3.18)$$

ou ainda como na expressão (2.2) e (3.6)

$$\langle W_t \rangle = \langle W_b \rangle + \frac{1}{V} \int_{V_2} W_{in}(x,y,z) dV_2 \quad \dots (3.19)$$

Observando as expressões de (3.11) a (3.17), que somadas são iguais a $\langle W_b \rangle$, pode ser escrita uma expressão para

$$\langle W_{in} \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_2} W_{in} dV_2$$

$$W_{in} \propto \frac{V_{in}}{V \cdot N_{in}} \left[\sum_{i=1}^{N_{in}} P_{in i}^2 \right] \quad \dots (3.20)$$

$$\text{Onde } V_{in} = (L_x - \lambda)(L_y - \lambda)(L_z - \lambda) \quad \dots (3.21)$$

e N_{in} é o número de posições da fonte na região central da câmara.

P_{in}^2 é o valor médio quadrático da pressão sonora medida para a fonte localizada na região central da sala.

As expressões gerais para $\langle W_b \rangle$ e $\langle W_t \rangle$ são:

$$\begin{aligned}
 \langle W_b \rangle \propto & \frac{2}{V} \left[\frac{V_{W_1}}{N_{W_1}} \sum_{i=1}^{N_{W_1}} P_{Wi}^2 + \frac{V_{W_2}}{N_{W_2}} \sum_{i=1}^{N_{W_2}} P_{Wi}^2 + \frac{V_{W_3}}{N_{W_3}} \sum_{i=1}^{N_{W_3}} P_{Wi}^2 \right] + \\
 & + \frac{2}{V} \left[\frac{V_{e_1}}{N_{e_1}} \sum_{i=1}^{N_{e_1}} P_{ei}^2 + \frac{V_{e_2}}{N_{e_2}} \sum_{i=1}^{N_{e_2}} P_{ei}^2 + \frac{V_{e_3}}{N_{e_3}} \sum_{i=1}^{N_{e_3}} P_{ei}^2 \right] + \\
 & + \frac{8}{V} \left[\frac{V_c}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} P_i^2 \right] \dots (3.22)
 \end{aligned}$$

$$\langle W_t \rangle \propto \langle W_b \rangle + \frac{1}{V} \left[\frac{V_{in}}{N_{in}} \sum_{i=1}^{N_{in}} P_{in i} \right] \dots (3.23)$$

Tomando-se como base as expressões recém obtidas (3.22) e (3.23) e a expressão (2.73) apresentada no capítulo II, pode ser escrita a expressão para a variância σ_b^2 como:

$$\begin{aligned}
 \sigma_b^2 = & \frac{1}{V} \left\{ 2 \frac{V_{W_1}}{N_{W_1}} \left[\sum_{i=1}^{N_{W_1}} \left[P_{Wi}^2 \right]^2 \right] + 2 \frac{V_{W_2}}{N_{W_2}} \left[\sum_{i=1}^{N_{W_2}} \left[P_{Wi}^2 \right]^2 \right] + \right. \\
 & + 2 \frac{V_{W_3}}{N_{W_3}} \left[\sum_{i=1}^{N_{W_3}} \left[P_{Wi}^2 \right]^2 \right] + 4 \frac{V_{e_1}}{N_{e_1}} \left[\sum_{i=1}^{N_{e_1}} \left[P_{ei}^2 \right]^2 \right] \left. \right\} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 4 \frac{V_{e_2}}{N_{e_2}} \left[\sum_{i=1}^{N_{e_2}} \left[P_{ei}^2 \right]^2 \right] + 4 \frac{V_{e_3}}{N_{e_3}} \left[\sum_{i=1}^{N_{e_3}} \left[P_{ei}^2 \right]^2 \right] + \\
& + 8 \frac{V_c}{N_c} \left[\sum \left[P_{ci}^2 \right]^2 \right] \left. \right\} \cdot \frac{1}{\langle W_t \rangle} + \frac{V_1}{V} - 2 \frac{\langle W_b \rangle}{\langle W_t \rangle} \dots (3.24)
\end{aligned}$$

As expressões (3.22), (3.23) e (2.24) foram desenvolvidas com a finalidade de se utilizar o computador para realizar os cálculos dos resultados.

3.5-c - MÉTODO EXPERIMENTAL

Basicamente a experiência pode ser descrita por dois passos:

1) A geração do ruído

O ruído foi gerado por um alto-falante colocado em cada região de contorno e movido segundo os mecanismos apresentados nas figuras (3.11-a e b).

2) A medição do ruído

O nível de pressão sonora médio foi medido para cada posição da fonte por um microfone que se movimentou sobre uma trajetória circular segundo as figuras (3.12) e (3.13).

LISTA DE EQUIPAMENTOS

| | | | |
|------------------------------------------------|------|------|-----|
| 1 - Gerador Seno-aleatório | Tipo | 2027 | B&K |
| 2 - Amplificados de Medição | Tipo | 2106 | B&K |
| 3 - Espectrômetro | Tipo | 2112 | B&K |
| 4 - Registrador Gráfico | Tipo | 2305 | B&K |
| 5 - Fonte de Alimentação P/ Mic. | Tipo | 2807 | B&K |
| 6 - Pré-amplificador de Microfones | Tipo | 2619 | B&K |
| 7 - Mesa Giratória | Tipo | 3921 | B&K |
| 8 - Microfone 1/2" N° 844043 | Tipo | 4165 | B&K |
| 9 - Fonte de Ruído Especificada Anteriormente. | | | |

O ruído gerado foi uma senoide pura de frequências:

| FREQUÊNCIA | COMP. DE ONDA (λ) |
|------------|-----------------------------|
| 2500 Hz | 0.14 m |
| 3150 Hz | 0.11 m |
| 3500 Hz | 0.10 m |
| 4000 Hz | 0.09 m |
| 5000 Hz | 0.07 m |

Do gerador seno-aleatório o sinal foi enviado ao alto-falante localizado em cada região de contorno.

O sinal foi captado por um microfone conectado à mesa giratória via um pré-amplificador e um amplificador de microfones. A mesa giratória foi por sua vez comandada pelo registrador gráfico que recebia o sinal captado após ser filtrado em banda de 1/3 oitava pelo espectrômetro e integrado pelo amplificador

de medição. O sinal foi filtrado para se evitar as interferências do ruído de fundo e das distorções harmônicas dos altos-falantes. Para cada posição da fonte o nível de pressão sonora médio foi registrado em papel.

As figuras (3.14) apresentam a montagem dos equipamentos no experimento.

Para as frequências de 4000Hz e 5000Hz foi usada a técnica da simetria, isto é, as medições foram realizadas com a fonte situada nos contornos de 1/8 da câmara sem comprometer os resultados. A simetria foi confirmada experimentalmente para uma aresta na frequência de 3000Hz.

3.6 - FONTES DE ERRO

Considerando que o experimento trata de um modelo reduzido, várias são as possíveis fontes de erro.

Existem erros que não podem ser evitados mas somente controlados de maneira a minimizar seu efeito sobre os resultados. A resolução da pena do registrador gráfico, a variação na calibração do espectrômetro com o tempo, a variação na potência acústica emitida pelo alto-falante devido ao aquecimento do seu enrolamento são algumas dessas fontes de erro.

Outro tipo de erro é aquele causado pela construção do sistema. De início o modelo da câmara consistia em uma caixa de madeira somente. Mas muita energia era transferida do modelo para o ambiente. A perda na transmissão era baixa embora não tenha sido medido inicialmente. Dessa maneira viu-se a necessida-

de de se aumentar a perda na transmissão (TL) e como já foi explicado anteriormente outra caixa de madeira foi colocada em torno do modelo com areia sua lavada entre ambas.

A perda na transmissão foi então medida e é apresentada na forma de uma curva versus a frequência na figura (3.16). (Ver apêndice A).

Quando o nível de pressão sonora médio é registrado em papel pelo registrador gráfico usando o tempo de integração igual a 100 segundos, duas situações extremas podem acontecer. Estas situações estão apresentadas nas figuras (3.17-a e 3.17-b).

Para se encontrar o valor médio das curvas apresentadas, traça-se uma reta pelo que seria considerado o valor médio aritmético do sinal.

O segundo caso, apresentado na figura (3.17-b), pode ser representado de uma maneira mais drástica como na figura (3.15). No caso foi traçada uma reta pelo valor médio entre os dois níveis L_1 e L_2 ponderando com relação ao período de duração de cada um.

Existe é claro, um erro, pois como já é sabido não se pode calcular a média logarítmica aritmeticamente.

Chamando a média aritmética de L_{m_1}

$$L_{m_1} = \frac{L_1 + L_2}{2} = \frac{L_1 + L_1 + \Delta L}{2}$$

$$\text{ou } L_{m_1} = L_1 + \frac{\Delta L}{2} \quad \dots (3.25)$$

E a média logarítmica de L_{m_2} :

$$L_{m_2} = 10 \log_{10} \left[\frac{\frac{L_1}{10} + \frac{L_2}{10}}{2} \right] = 10 \log_{10} \left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right] - 10 \log_{10} 2$$

ou

$$L_{m_2} = L_1 + 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{\Delta L}{10}} \right) - 10 \log_{10} 2 \quad \dots (3.16)$$

Calculando o erro como sendo a diferença entre os dois métodos,

$$\text{erro} = L_{m_2} - L_{m_1} = 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{\Delta L}{10}} \right) - 10 \log_{10} 2 - \frac{\Delta L}{2} \quad \dots (3.27)$$

Resolvendo a expressão (3.27), pode-se dizer que com um $\Delta L < 4$ dB, o erro será inferior a 0.5 dB.

3.7 - RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos foram os seguintes:

| FREQUÊNCIA (Hz) | L_x/λ | $\langle W_b/W_E \rangle$ | σ_b^2 |
|-----------------|---------------|---------------------------|--------------|
| 2500 | 4.43 | 0.67 | 0.23 |
| 3150 | 5.64 | 0.53 | 0.06 |
| 3500 | 6.20 | 0.39 | 0.11 |
| 4000 | 7.75 | 0.55 | 0.16 |
| 5000 | 8.86 | 0.48 | 0.05 |

Os pontos acima também podem ser observados nas figuras (3.18) e (3.19) onde é apresentada as curvas teóricas obtidas das expressões (2.57) e (2.74) do capítulo II.

3.8 - CONCLUSÕES

Os resultados para as frequências mais altas se apresentam mais próximas dos obtidos teoricamente para $\langle \frac{W_b}{W_t} \rangle$.

Na frequência de 5000Hz pode ser vista uma discrepância do dado prático para o teórico com relação a variância σ_b^2 .

Nesta frequência foi utilizada a fonte 3, ou seja, o fone de ouvido. Quando foram utilizadas as fontes 1 e 2 (altofalantes em caixas de madeira), existia uma maior uniformidade com relação a posição da fonte e o contorno sendo analisado. Isto porque a parte da caixa onde se localiza o diafragma do altofalante

ficava encostado em todas as paredes com a mesma distância entre o plano e o diafragma. O mesmo não ocorreu com o fone de ouvido pois ele pode ser colocado muito mais próximo dos contornos em alguns casos que nos outros. E é muito difícil de controlar em que posição ele se encontra. Por exemplo, em se tratando de duas paredes diferentes em uma delas a fonte pode ser colocada bem próxima da superfície refletora enquanto que na outra, um pouco mais afastado. A proximidade da superfície dá um valor mais alto para o nível de pressão sonora.

No capítulo II, as expressões (2.18), (2.19) e (2.20) permitem observar um aumento no nível de pressão sonora de 3dB da aresta para a parede e de 6dB do canto para a parede. E se for observado por exemplo a figura (3.20), que expressa a variação do nível de pressão sonora versus a distância da fonte ao contorno, pode ser visto que se a fonte estiver bem próxima à parede um resultado maior será obtido do que daquele quando a fonte se encontra afastado da superfície refletora.

Considerando também que as medidas foram realizadas em decibéis, pode ser calculada a maior diferença observada na figura (3.18) em decibel, ou seja para a frequência de 3500Hz seria de aproximadamente 2 (dois) dB o que no caso de os erros se somarem seria uma quantidade razoavelmente pequena.

Nas frequências em que a discrepância entre os dados obtidos na prática e os dados teóricos foi grande, alguns dados experimentais foram modificados no programa FORTRAN para as expressões (3.22) (3.23) e (3.24). Isto permite identificar quais os contornos que contribuíram para um aumento no valor de σ_b^2 .

LISTA DE REFERÊNCIAS

[3.1] - ANSI S1-21-1972. American National Standard-Method for the Determination of Sound Power Levels of Small Sources in Reverberation Rooms.

[3.2] - ISO 3742(1975) -Precision Methods For Discrete Frequency and Narrow-Band Sources in Reverberatio Rooms.

[3.3] - L.E.KINSLER & A.R.FREY-Fundamentals of Acousticals-1962 John Wiley&Sons,INC.2º Edition

[3.4] - C.G.WAHRMANN and J.T.BROCH -On the Averaging Time of RMS Measurements.BRUEL&KJAER.Techinical Review No.2-1975

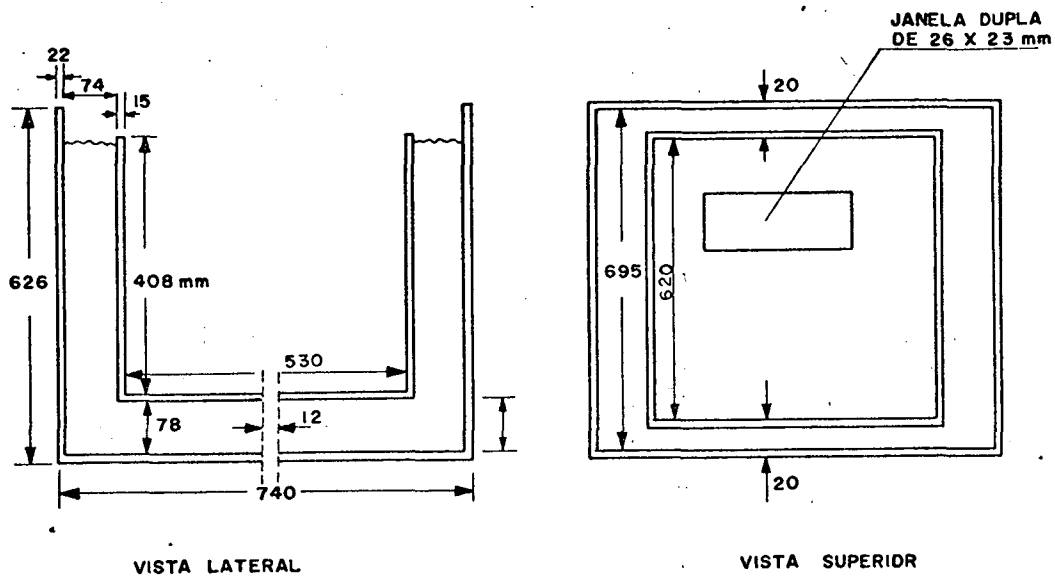


Figura (3.1-a)

Vista lateral e superior do modelo da câmara reverberante com as respectivas dimensões

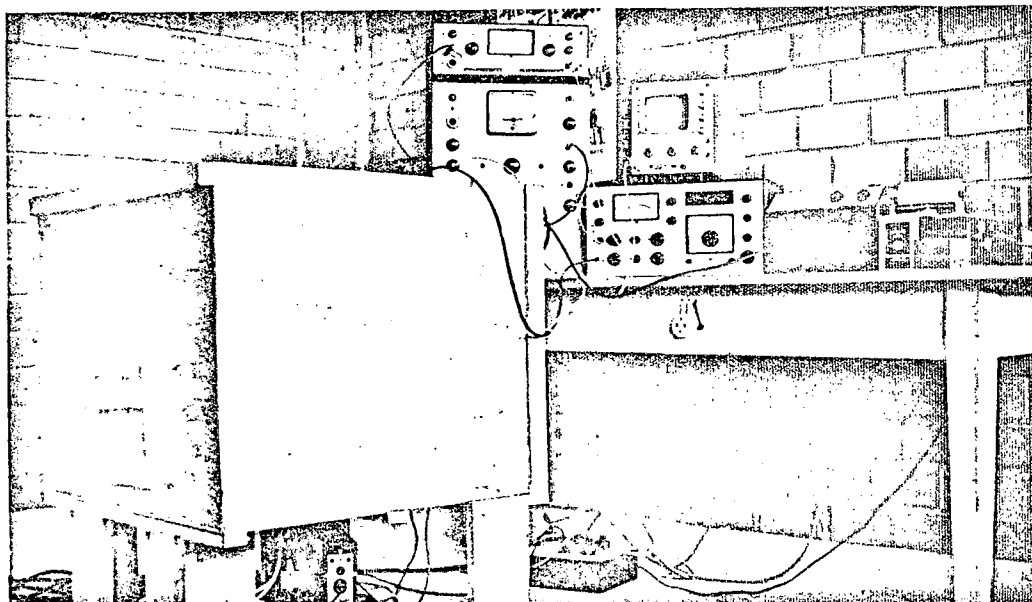


Figura (3.1-b)

Vista lateral do modelo

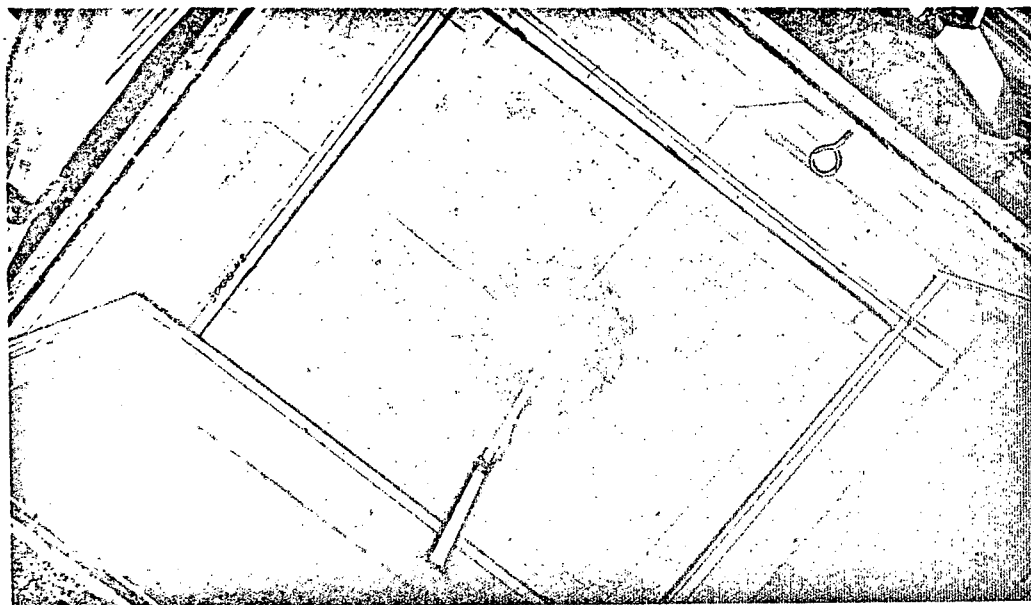


Figura (3.1-c)
Vista superior do modelo

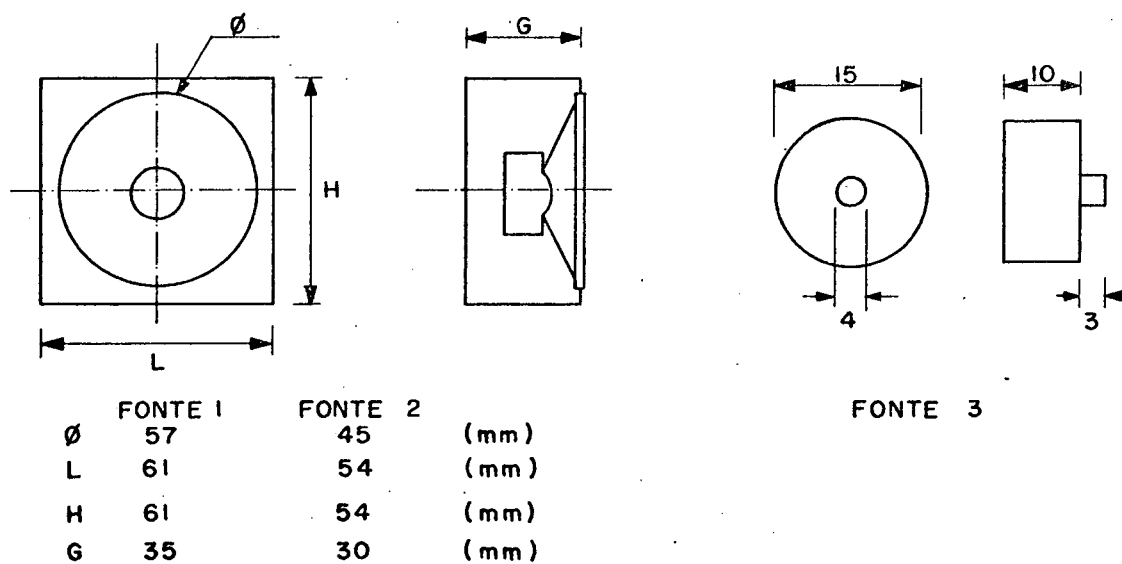


Figura (3.2)
Esquema e dimensões das três fontes

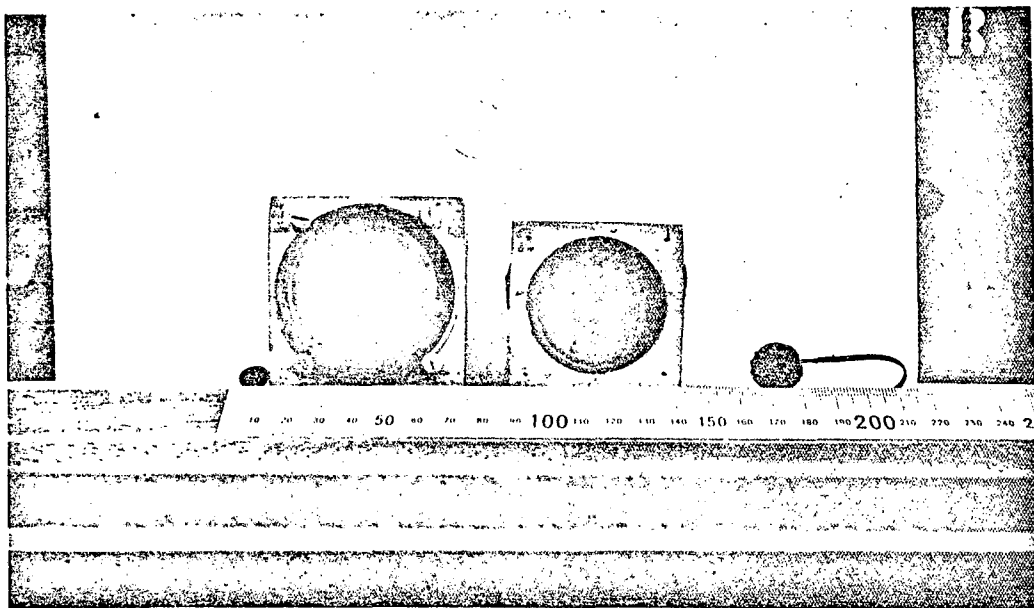


Figura (3.3)

Vista das três fontes utilizadas

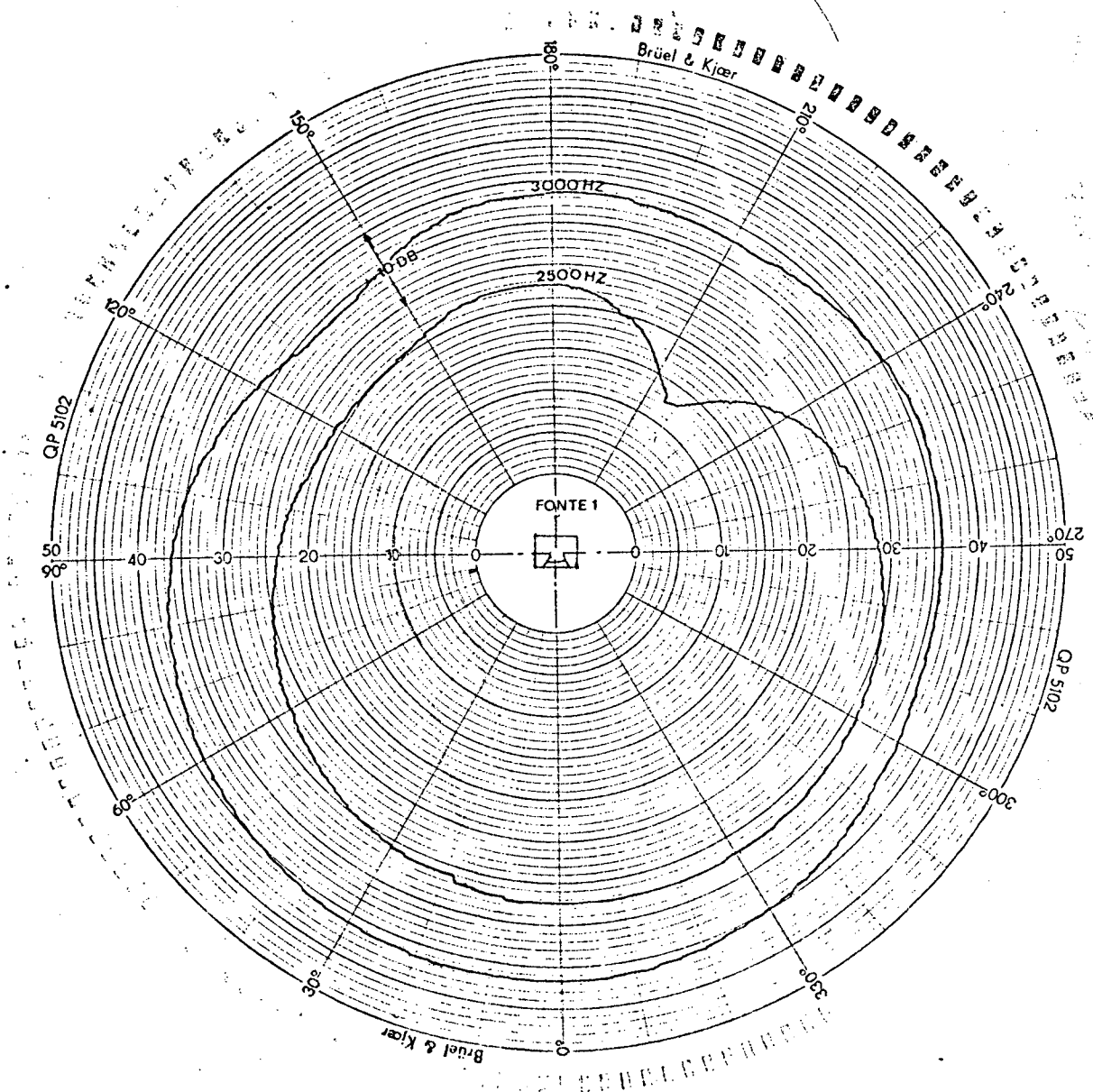


Figura (3.4.a)

Diagrama de diretividade para a fonte 1

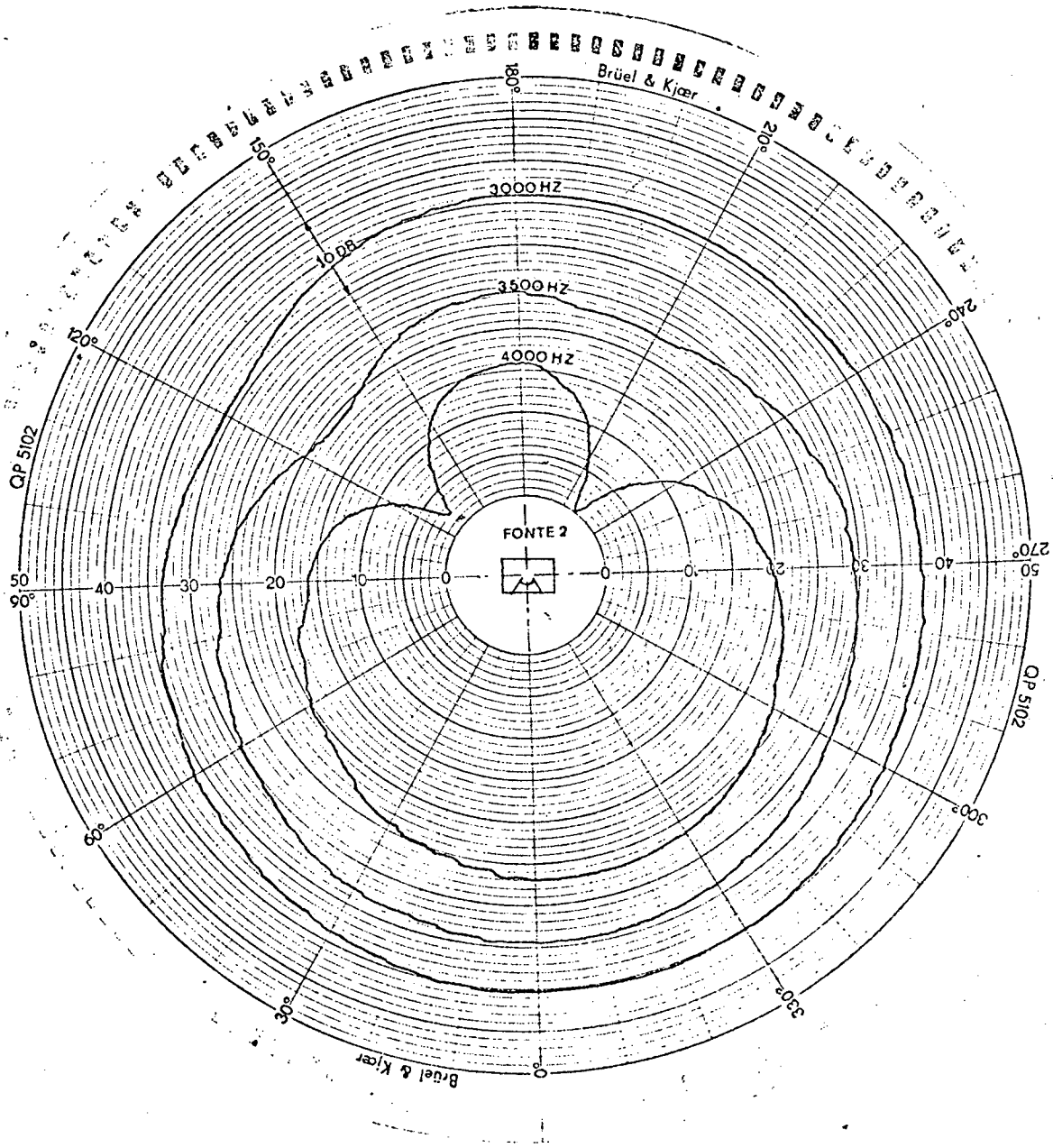


Figura (3.4.b)

Diagrama de diretividade para a fonte 2

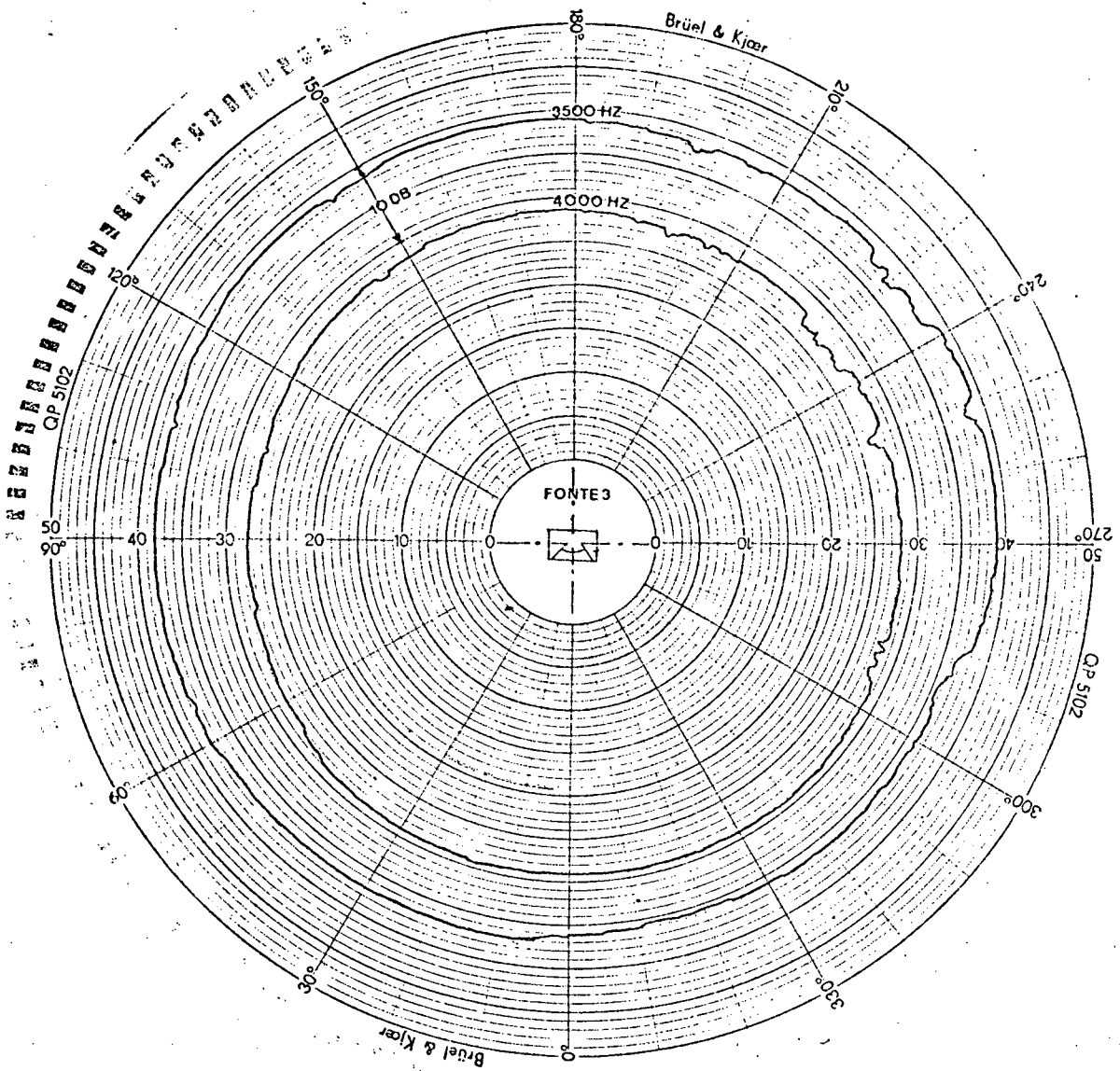


Figura (3.5)

Diagrama de diretividade para a fonte 3

| MODOS | | | FREQUÊNCIA(Hz) |
|-------|----|----|----------------|
| 0. | 0. | 0. | 0.0 |
| 1. | 0. | 0. | 274.19 |
| 0. | 1. | 0. | 320.75 |
| 0. | 0. | 1. | 416.67 |
| 1. | 1. | 0. | 421.98 |
| 1. | 0. | 1. | 498.79 |
| 0. | 1. | 1. | 525.83 |
| 2. | 0. | 0. | 548.39 |
| 1. | 1. | 1. | 559.02 |
| 2. | 1. | 0. | 535.30 |
| 0. | 2. | 0. | 541.51 |
| 2. | 0. | 1. | 538.72 |
| 1. | 2. | 0. | 597.65 |
| 2. | 1. | 1. | 759.75 |
| 0. | 2. | 1. | 764.95 |
| 1. | 2. | 1. | 312.60 |
| 3. | 0. | 0. | 322.58 |
| 0. | 0. | 2. | 333.33 |
| 2. | 2. | 0. | 343.96 |
| 1. | 0. | 2. | 377.23 |
| 3. | 1. | 0. | 382.91 |
| 0. | 1. | 2. | 392.93 |
| 3. | 0. | 1. | 922.09 |
| 1. | 1. | 2. | 934.08 |
| 2. | 2. | 1. | 941.21 |
| 0. | 3. | 0. | 952.26 |
| 3. | 1. | 1. | 976.29 |
| 2. | 0. | 2. | 997.53 |
| 1. | 3. | 0. | 1000.57 |
| 3. | 2. | 0. | 1043.16 |
| 2. | 1. | 2. | 1047.83 |
| 0. | 3. | 1. | 1048.60 |
| 1. | 2. | 2. | 1051.65 |
| 1. | 3. | 1. | 1083.36 |
| 2. | 2. | 2. | 1086.81 |
| 3. | 3. | 0. | 1107.56 |
| 2. | 2. | 1. | 1123.29 |
| 3. | 0. | 2. | 1170.93 |
| 2. | 3. | 1. | 1183.34 |
| 2. | 2. | 2. | 1186.95 |
| 3. | 1. | 2. | 1214.07 |
| 0. | 0. | 3. | 1250.00 |
| 3. | 3. | 0. | 1265.93 |
| 0. | 3. | 2. | 1272.95 |
| 1. | 0. | 3. | 1279.72 |
| 0. | 1. | 3. | 1290.50 |
| 1. | 3. | 2. | 1302.14 |
| 1. | 1. | 3. | 1319.30 |
| 3. | 3. | 1. | 1332.74 |
| 3. | 2. | 2. | 1335.15 |
| 2. | 0. | 3. | 1365.00 |
| 2. | 3. | 2. | 1386.05 |
| 2. | 1. | 3. | 1402.13 |
| 0. | 2. | 3. | 1405.00 |
| 1. | 2. | 3. | 1431.51 |
| 3. | 0. | 3. | 1496.38 |
| 2. | 2. | 3. | 1508.23 |
| 3. | 3. | 2. | 1515.60 |
| 3. | 1. | 3. | 1530.37 |
| 0. | 3. | 3. | 1577.48 |
| 1. | 3. | 3. | 1601.14 |
| 3. | 2. | 3. | 1528.09 |
| 2. | 3. | 3. | 1570.03 |
| 3. | 3. | 3. | 1779.07 |

Figura (3.6-a)

Lista de modos do modelo da câmara.

Brüel & Kjær

Brüel & Kjær

Brüel & Kjær

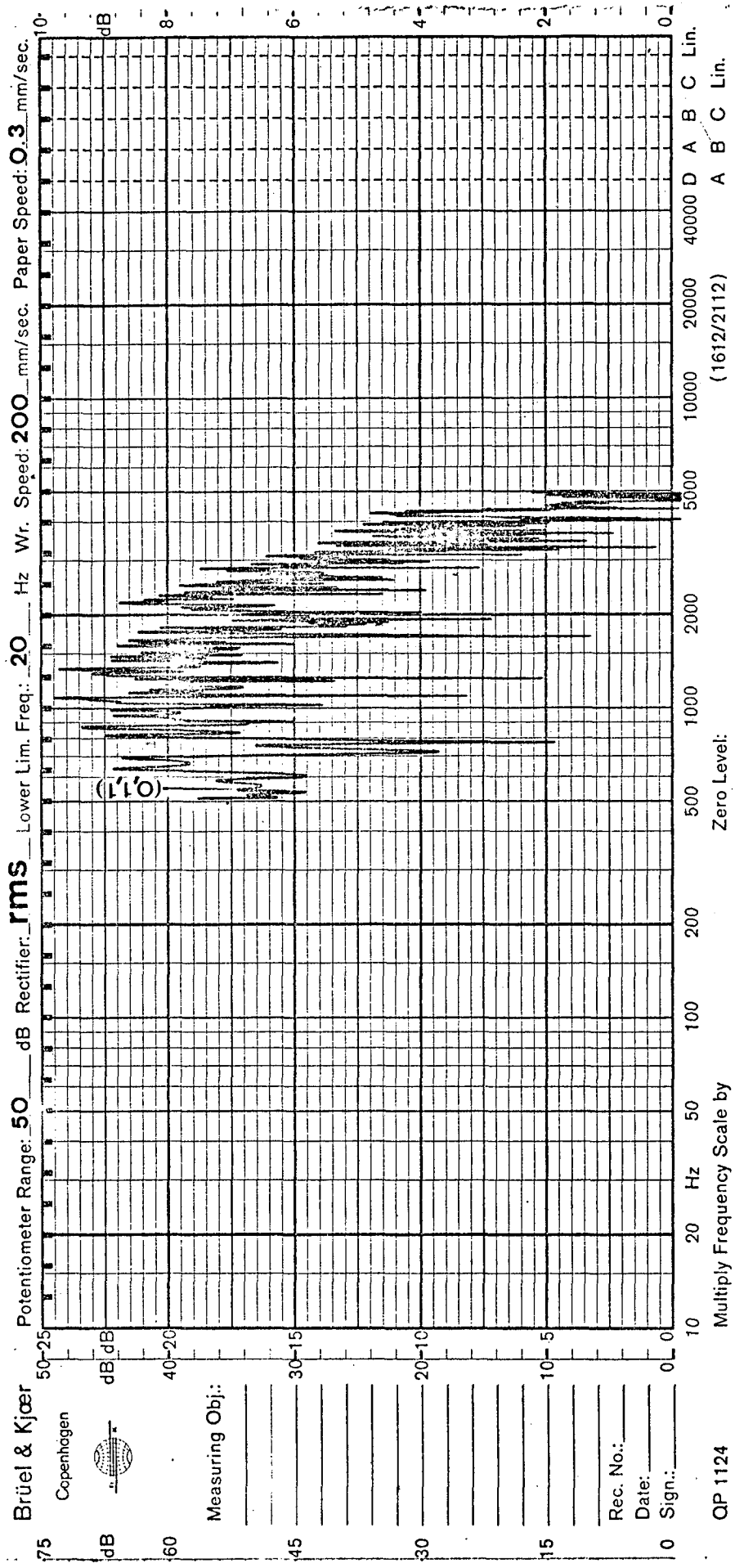


Figura (3.6-b)

Curva de resposta em frequência do modelo reduzido da câmara para uma posição do microfone (posição 1).

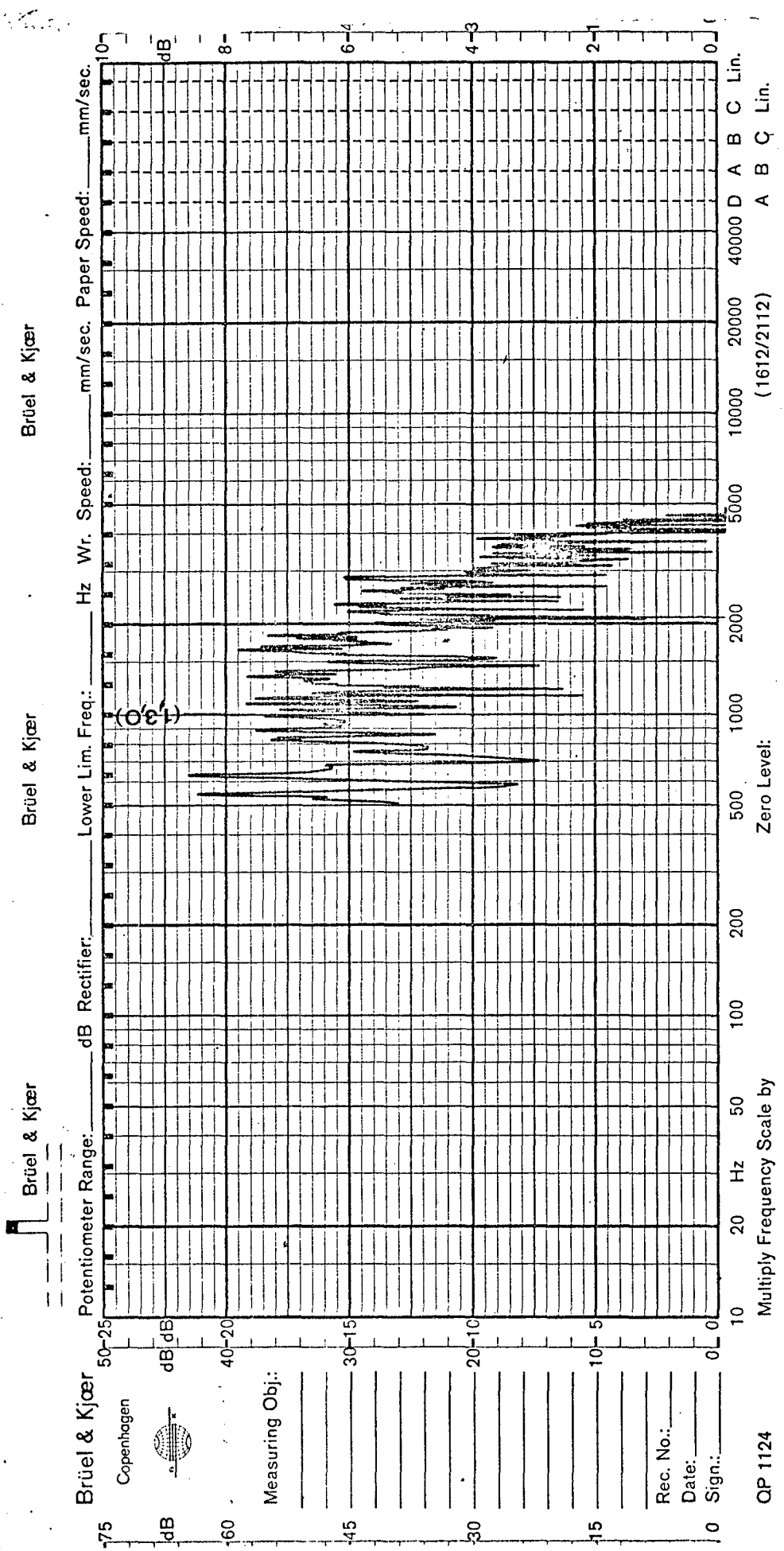
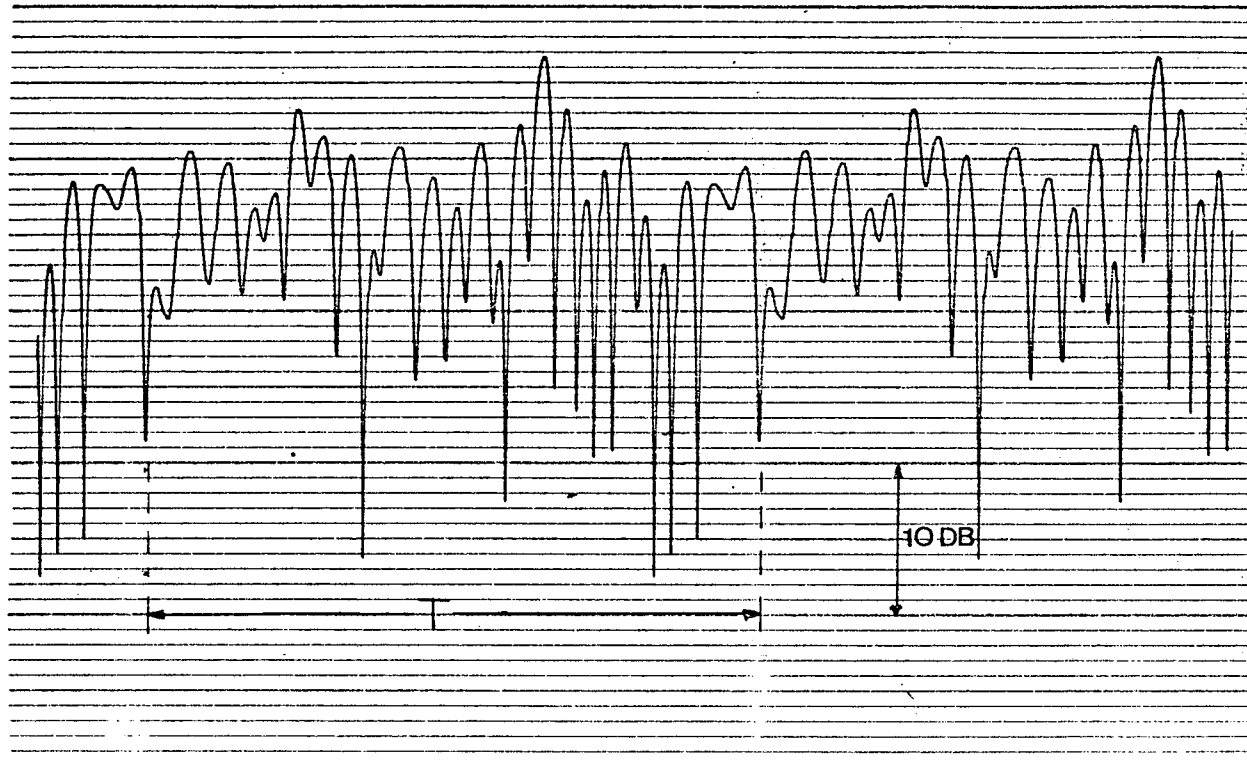


Figura (3.6-c)

Curva de resposta em frequência do modelo reduzido da câmara para a posição do microfone (posição 2)

Brüel & Kjær

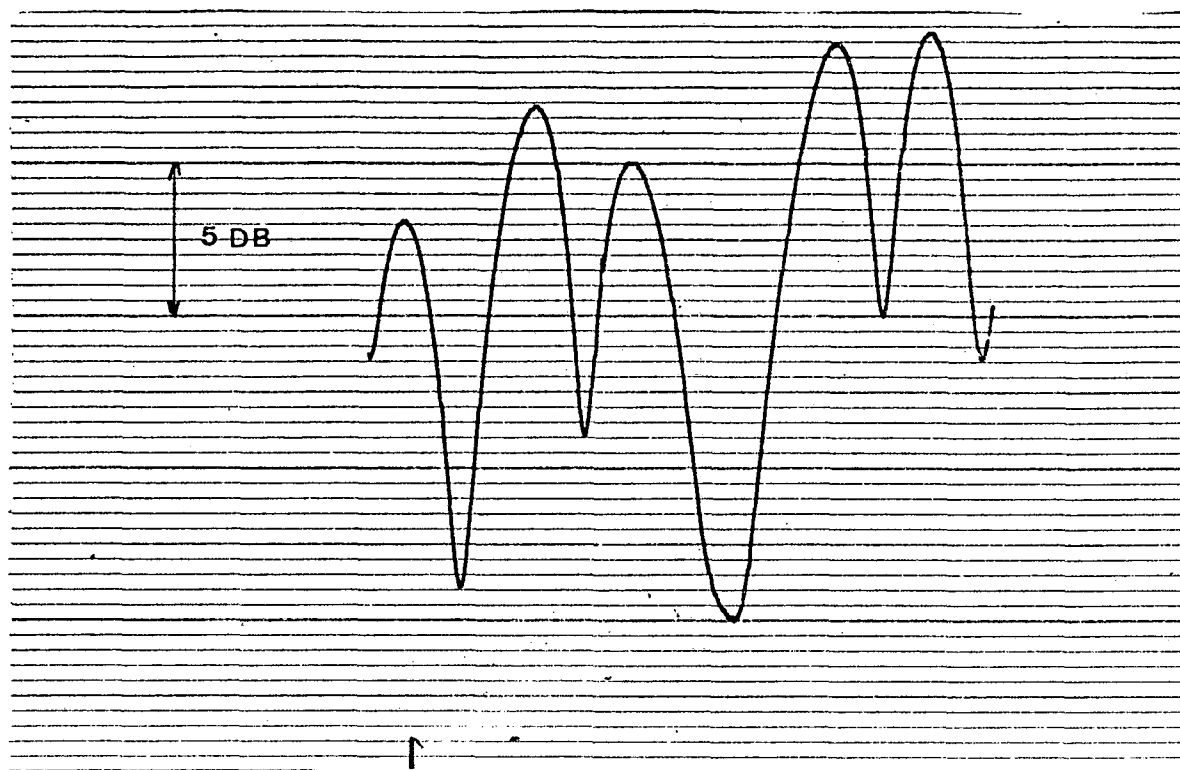


QP 1102

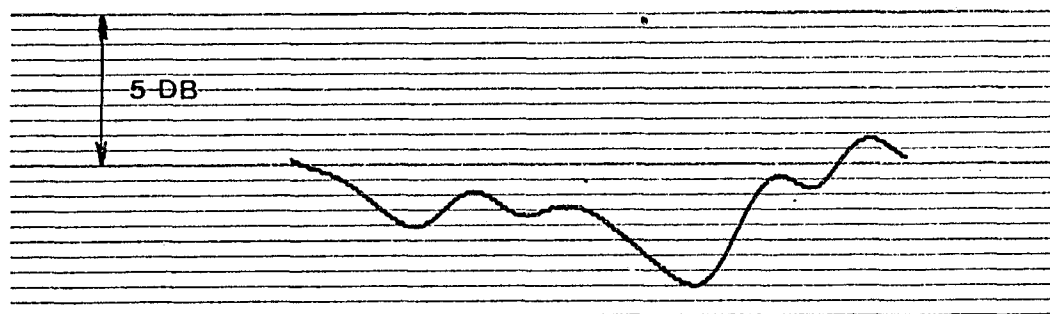
Figura (3.7)

Variação espacial do nível de pressão sonora no interior
do modelo reduzido da câmara reverberante

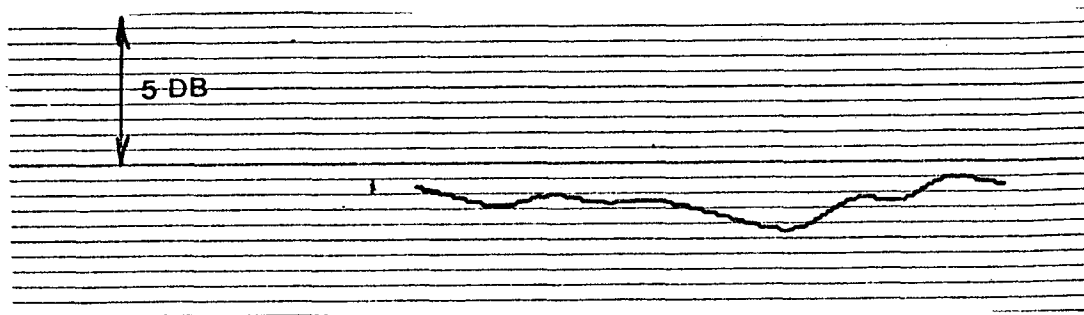
Velocidade do Papel: 1 mm/s
Velocidade da Pena : 200 mm/s
Potenciômetro : 50 dB
Frequência : 5000 Hz



FAST



30 s



100 s

Figura (3.8.a)

Onda estacionária segundo diferentes tempos de integração

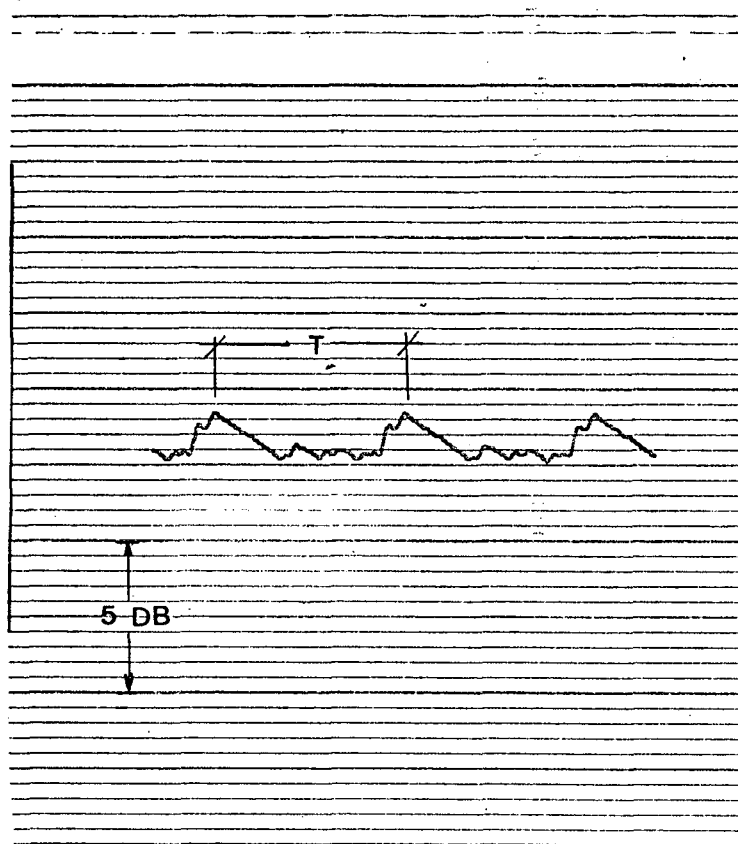


Figura (3.8.b)

Onda estacionária para um tempo de integração de 100 segundos.

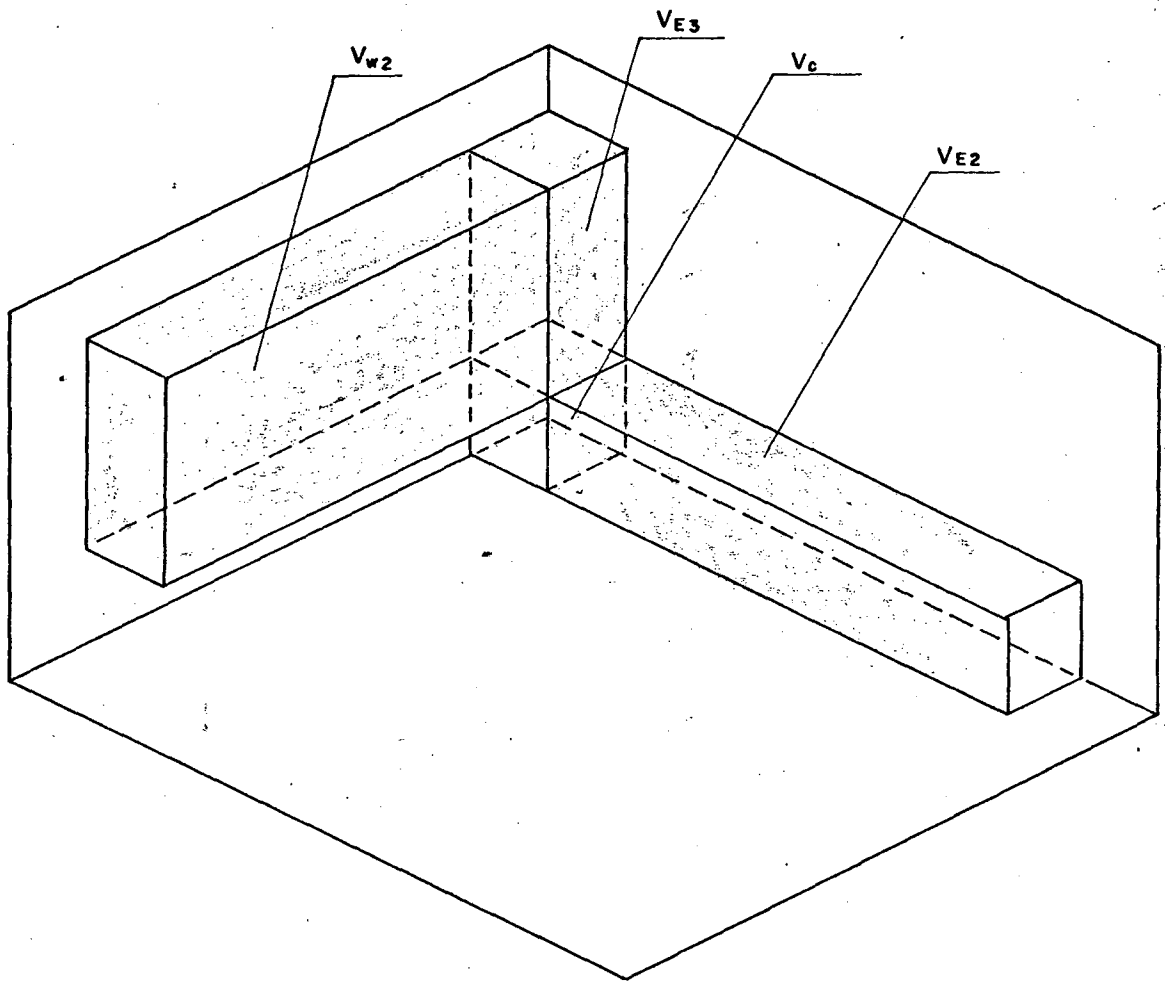


Figura (3.9)

Vista de uma parte da sala com os respectivos contornos representados pelos seus volumes

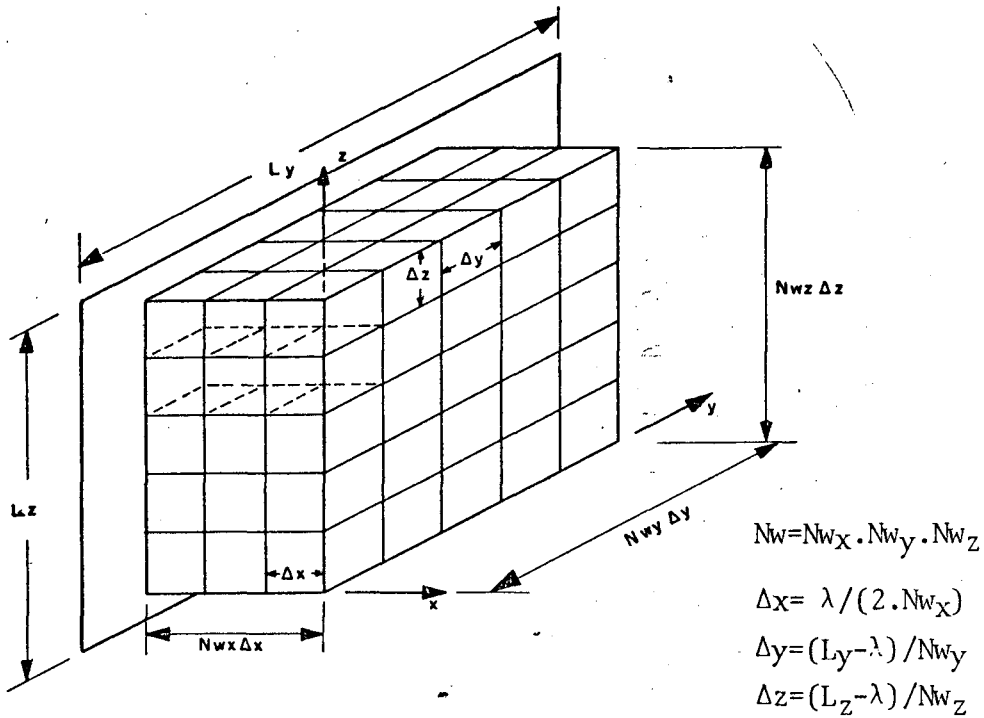


Figura (3.10-a) .

Região de contorno correspondente a uma parede dividida em blocos de volume $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$

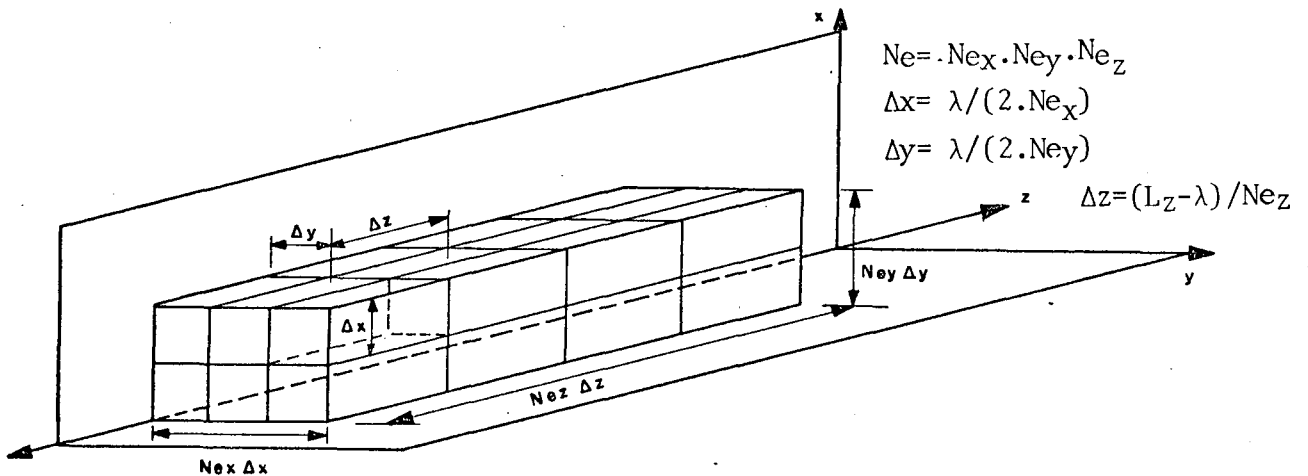


Figura (3.10-b)

Região de contorno correspondente a uma aresta dividida em blocos de volume $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$

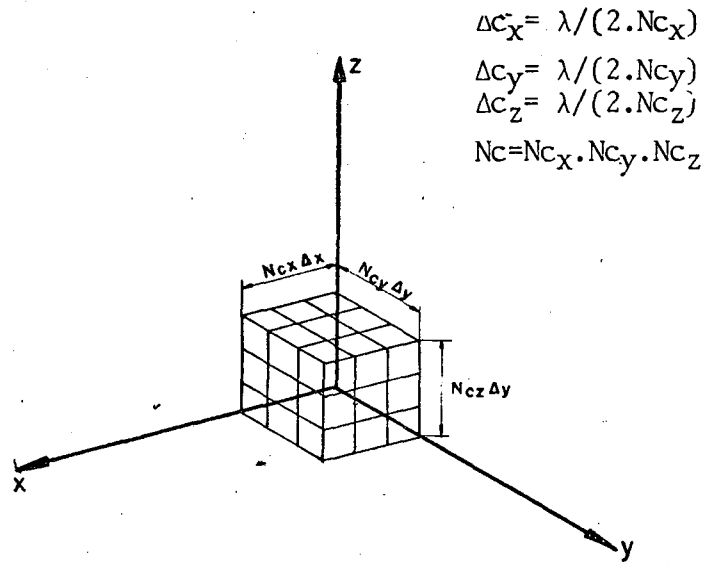


Figura (3.10-c)

Região de contorno correspondente a um canto dividido em blocos de volume $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$

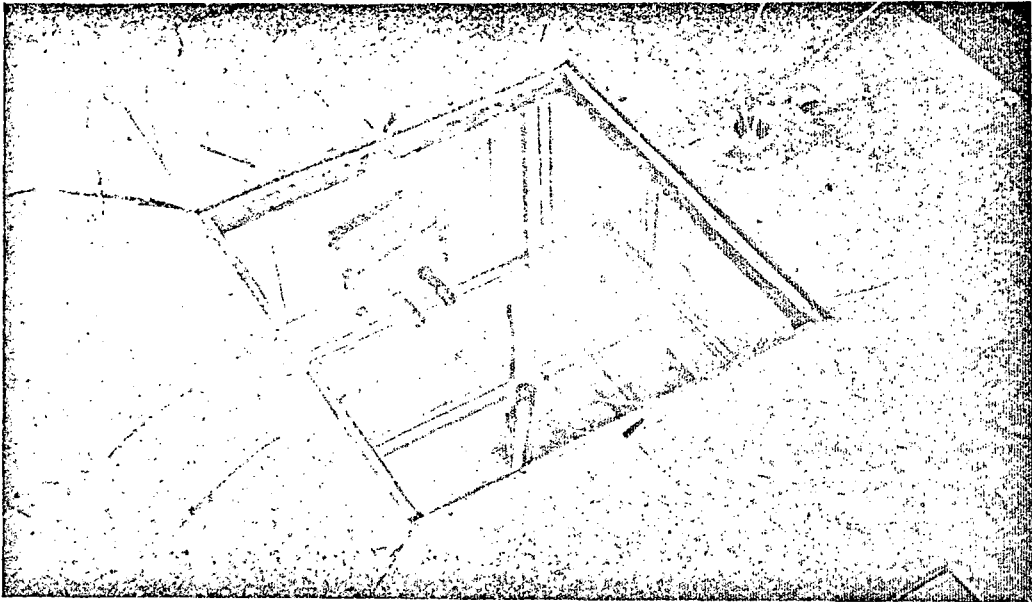


Figura (3.11-a)

Fonte 1

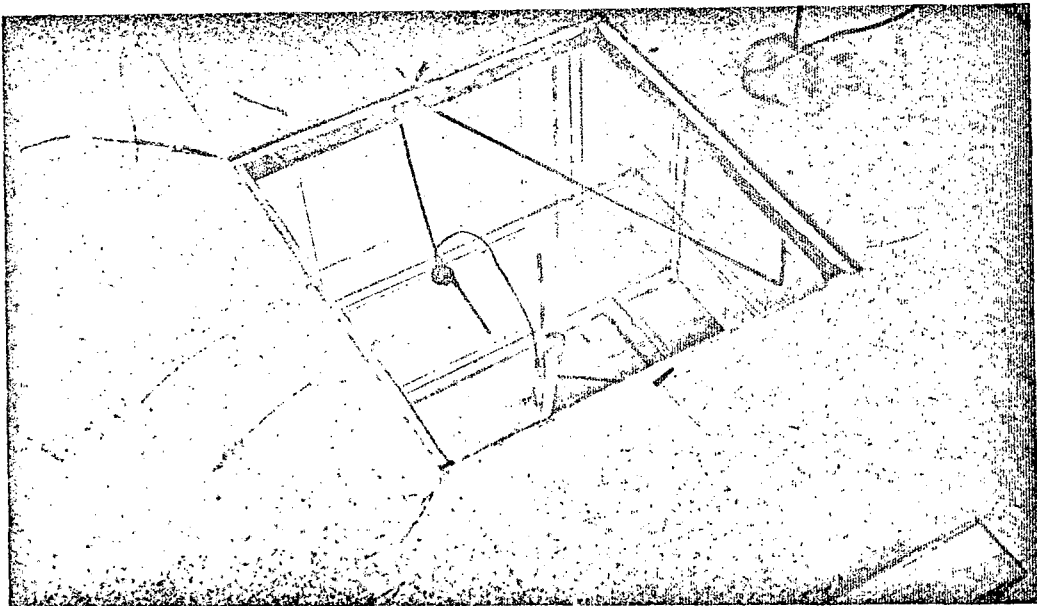


Figura (3.11-b)

Fonte 3

Figuras(3.11)

Mecanismos de movimentação das fontes de ruído

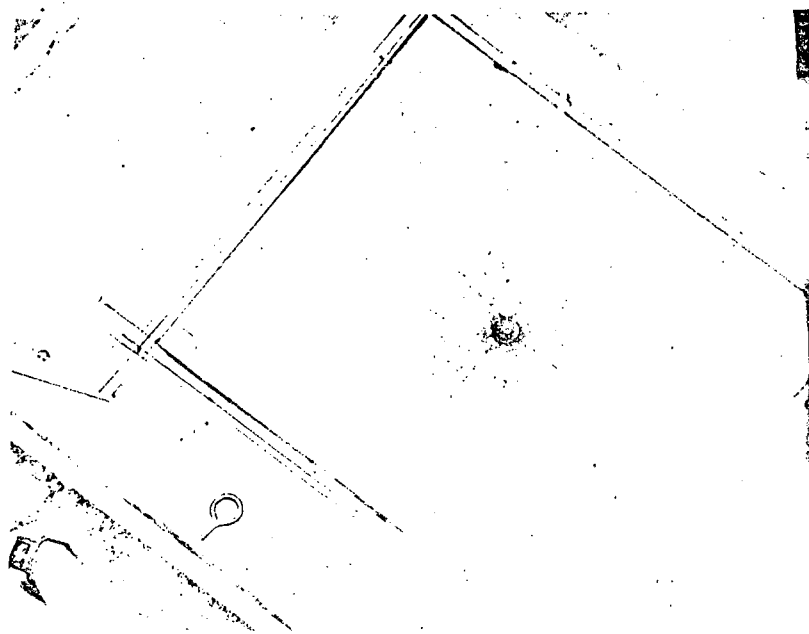
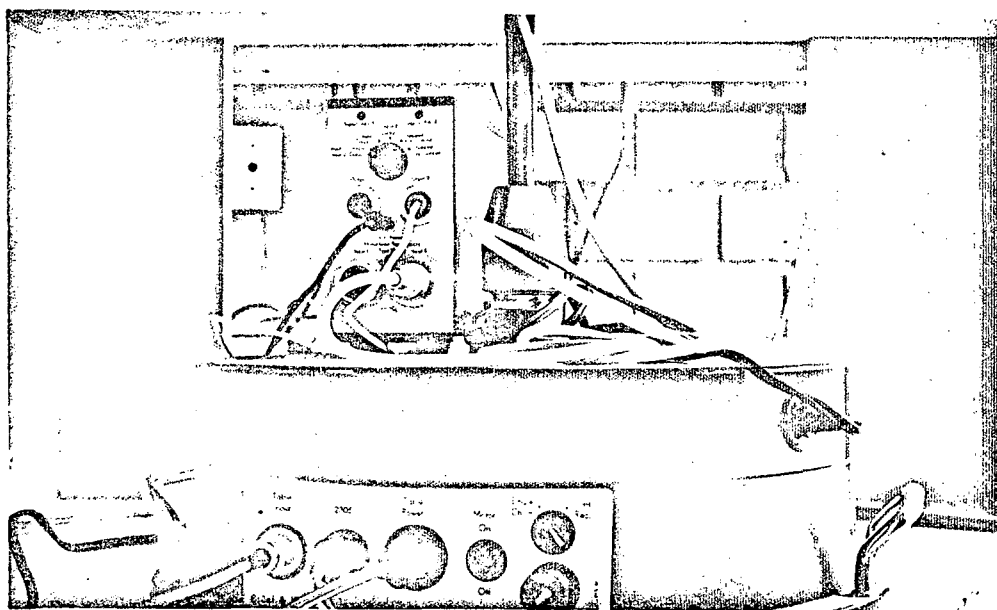
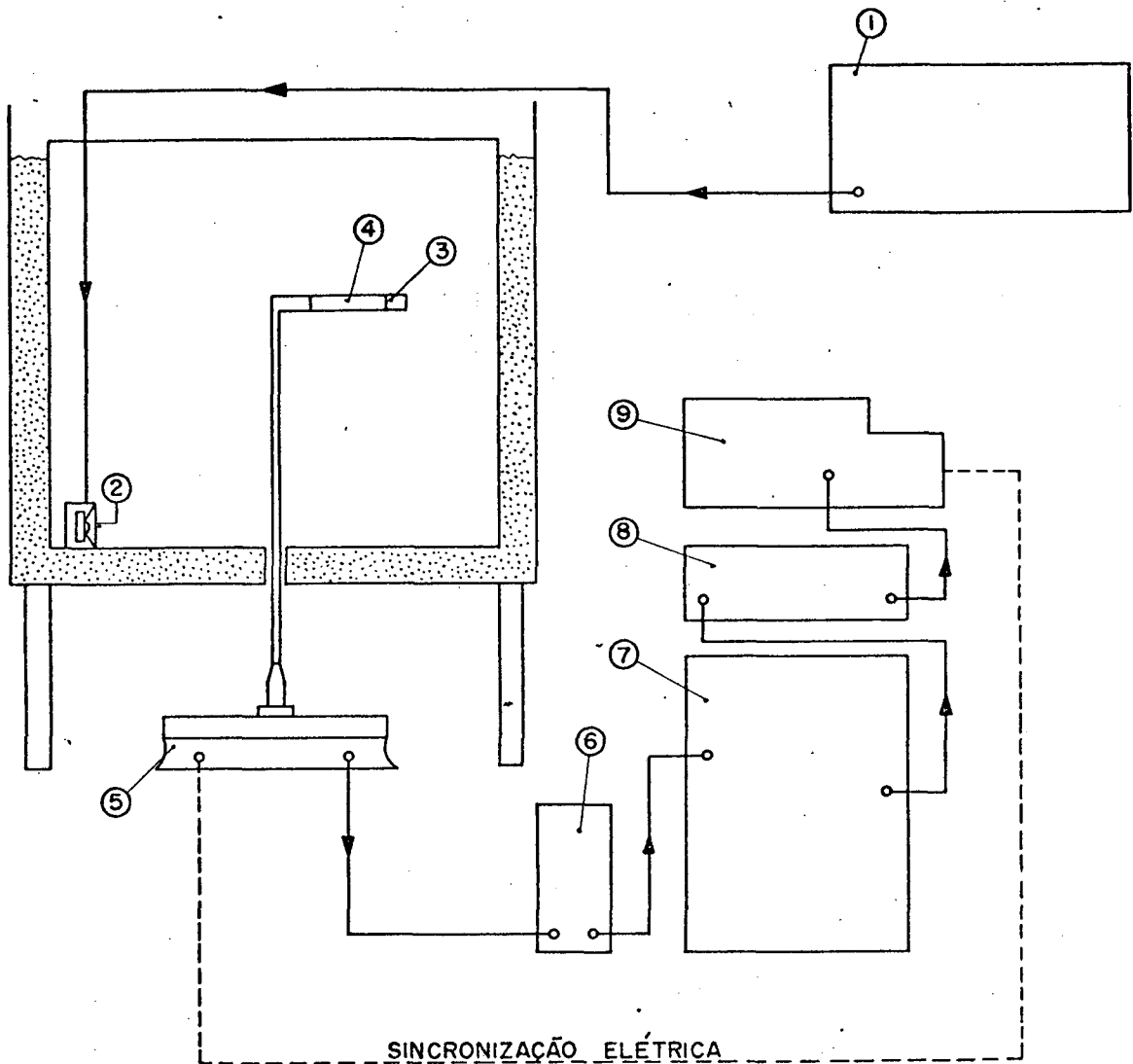


Figura (3.12)



Figuras (3.13)

Vista do mecanismo de movimentação do microfone



| | | |
|---------------------------------|------|-----|
| 9 Registrador Gráfico | TIPO | |
| 8 Amplificador de Medição | 2305 | B&K |
| 7 Espectrômetro | 2607 | B&K |
| 6 Fonte de Alimentação | 2112 | B&K |
| 5 Mesa Giratória | 2807 | B&K |
| 4 Prê-Amplificador de Microfone | 3921 | B&K |
| 3 Microfone 1/2" N°844043 | 2619 | B&K |
| 2 Fonte de Ruído (altfalante) | 4165 | B&K |
| 1 Gerador Seno-Aleatório | 1017 | B&K |

Figura (3.14)
Arranjo dos equipamentos

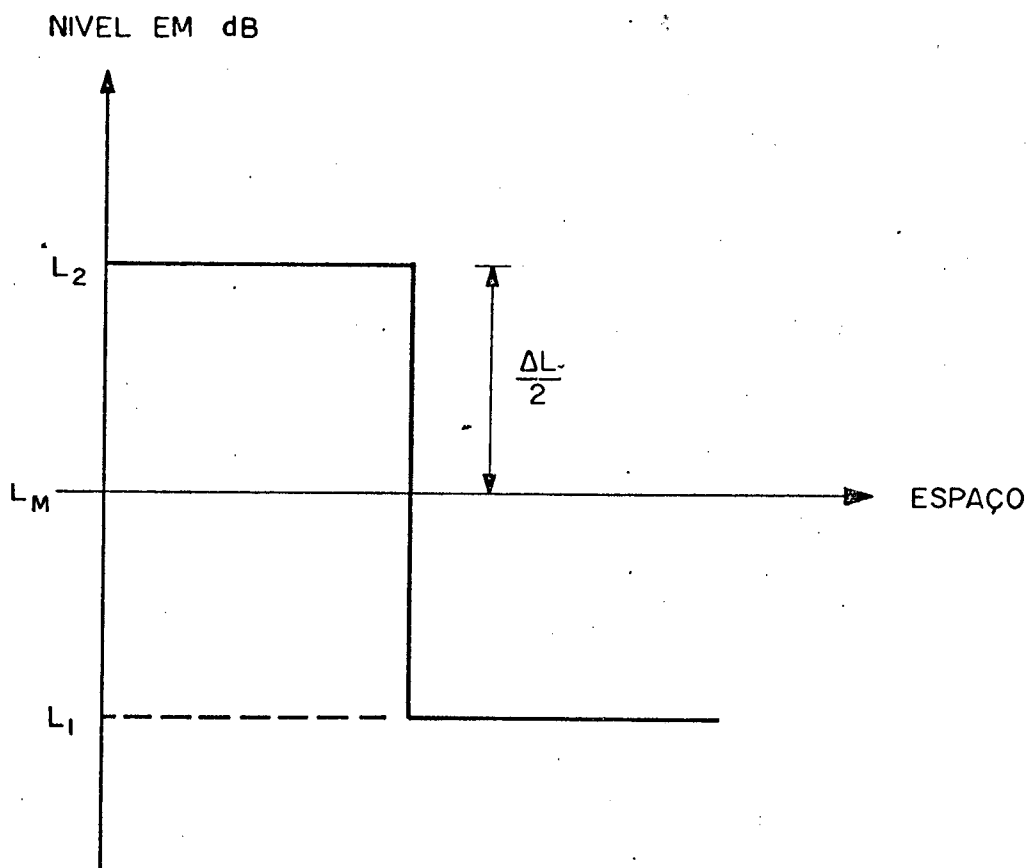
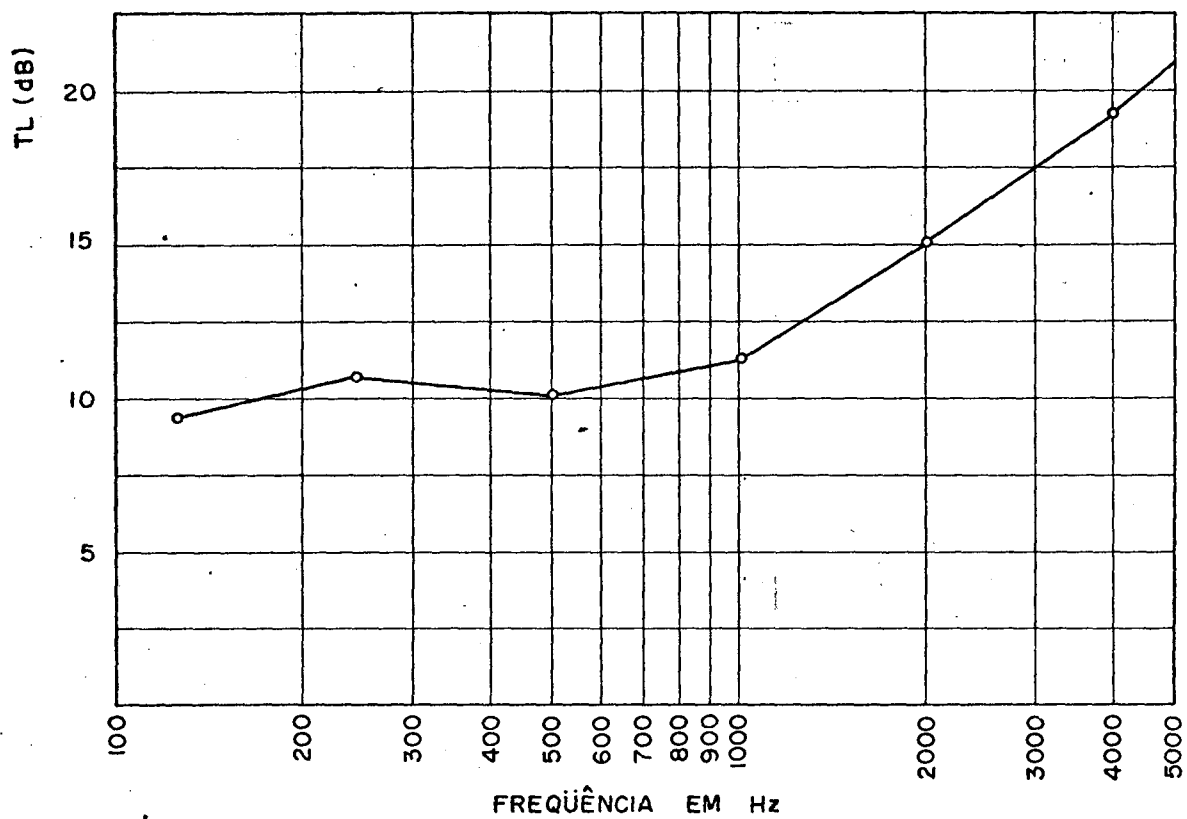


Figura (3.15)

Gráfico representativo da situação mais crítica possível no tocante ao registro e cálculo do nível médio de ruído para uma posição qualquer da fonte.



, Figura (3.16)

Perda na transmissão para a parte superior do modelo da sala.

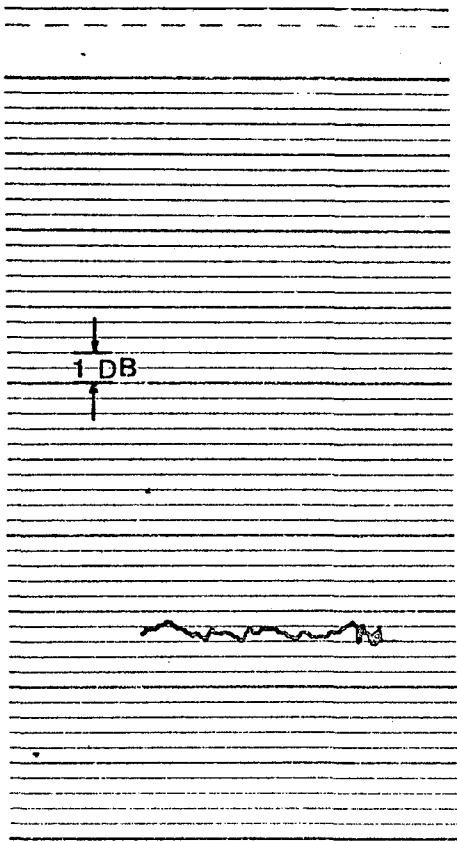


Figura (3.17-a)
 Variação do nível de pressão
 sonora médio-Caso simples

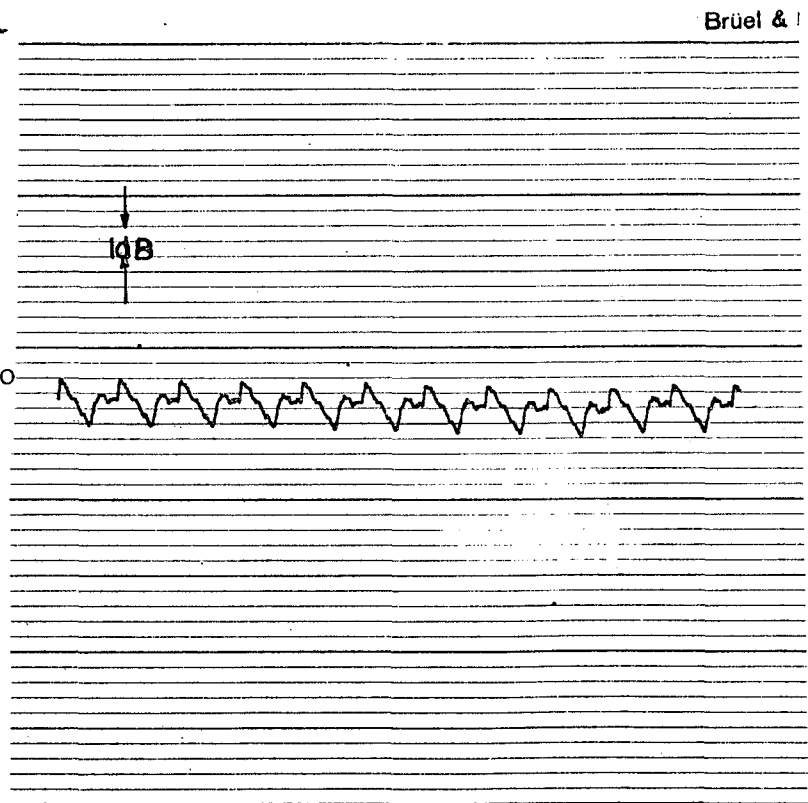


Figura (3.17-b)
 Variação do nível de pressão
 sonora médio-Caso extremo

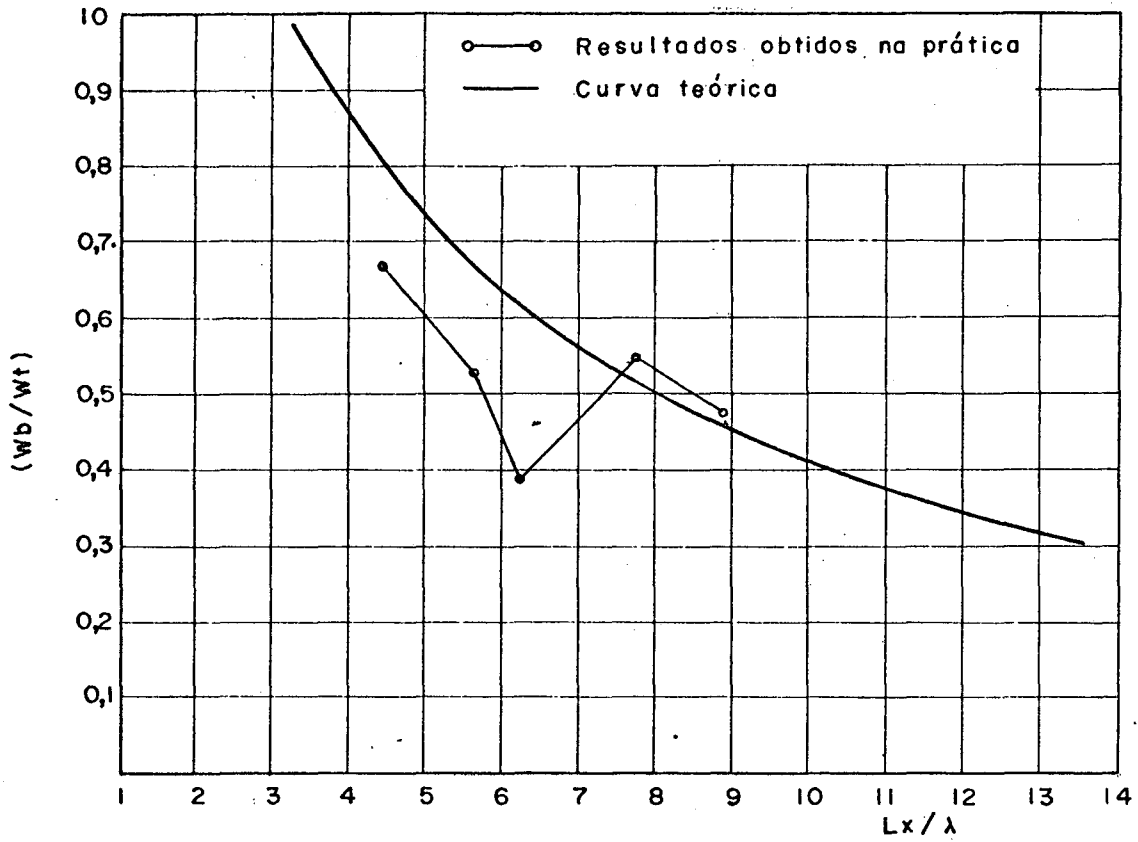


Figura (3.18)

Curva teórica e prática de W_b/W_t para $a_1=0.66$ e $a_2=0.85$

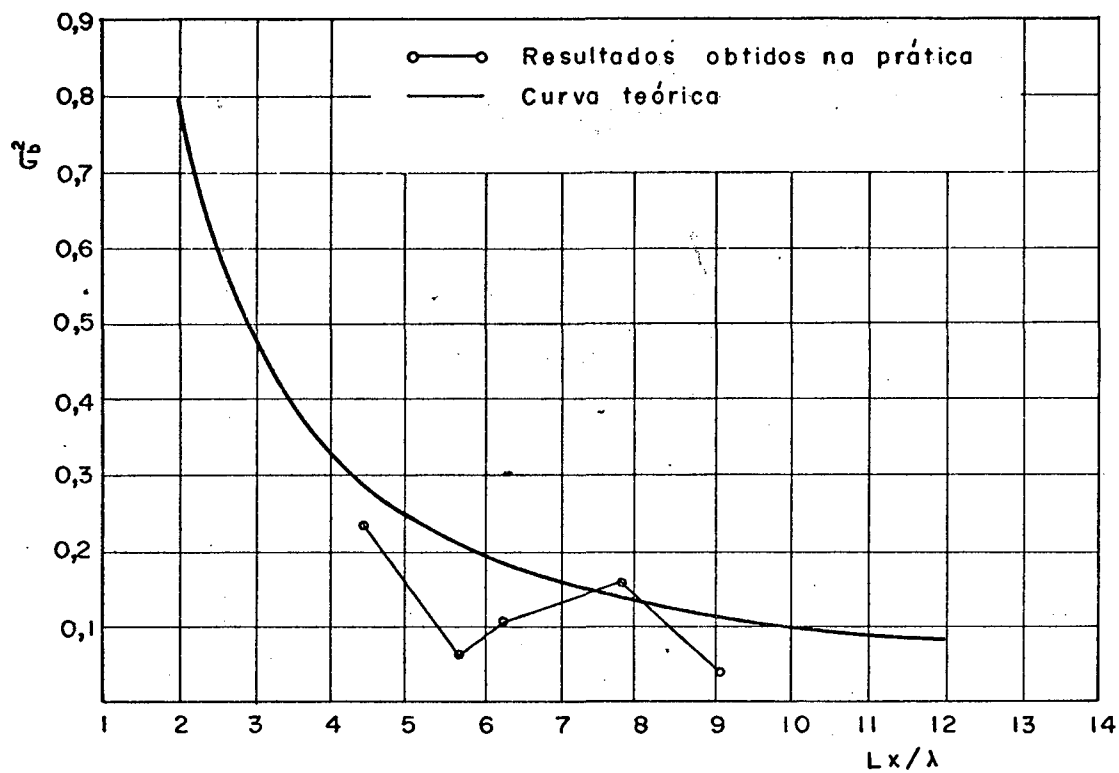


Figura (3,19)

Curva teórica e prática de σ_b^2 para $a_1=0.66$ e $a_2=0.85$

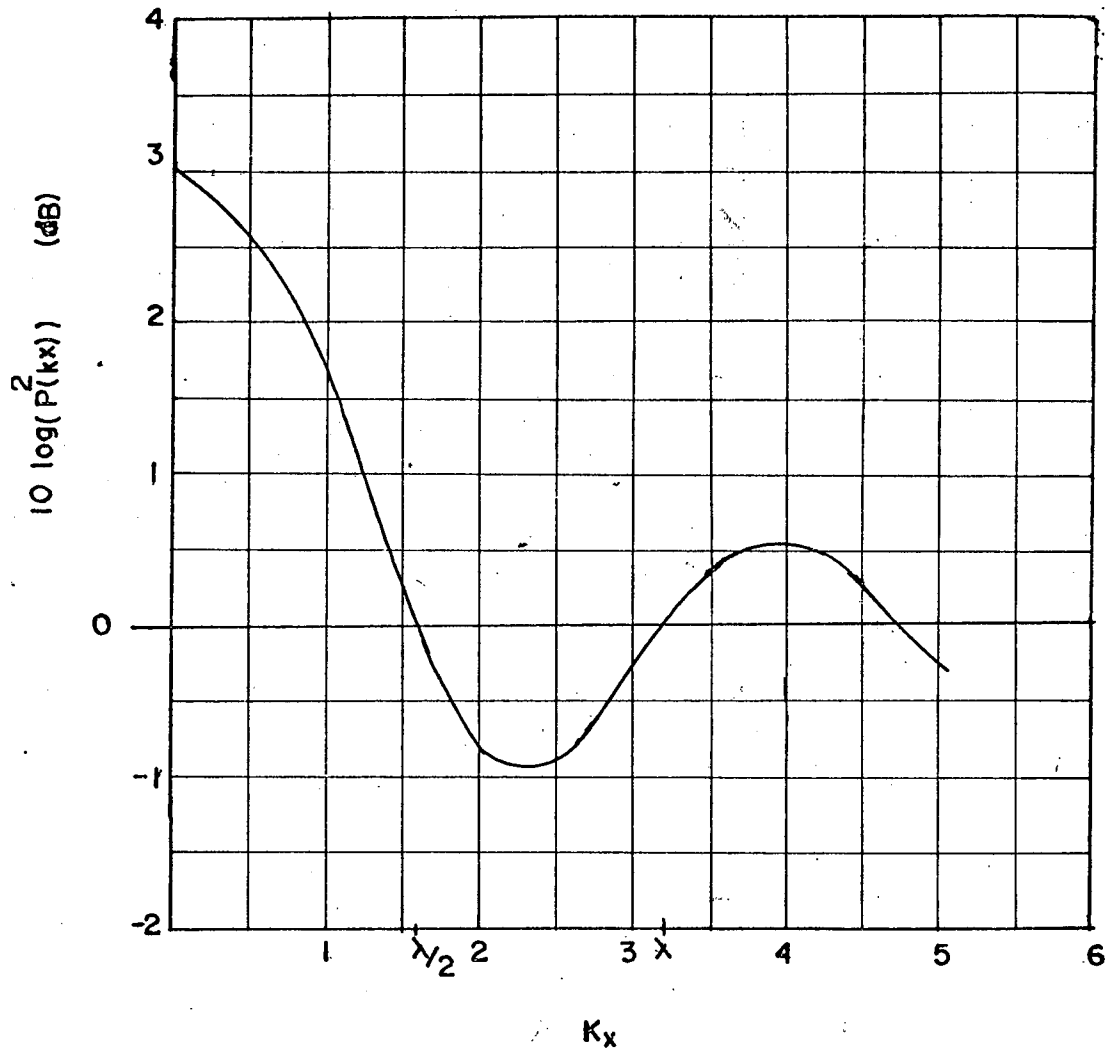


FIG. (3.20)

Variação do nível de pressão sonora com distância da fonte à uma parede vezes o comprimento de onda.

CAPITULO IV

SUMÁRIO E CONCLUSÕES

No capítulo II foi desenvolvida uma expressão, (2.57), para a potência acústica média normalizada emitida por uma fonte de ruído da região de contorno e uma outra expressão, (2.73), para a variância, σ_b^2 .

Um modelo experimental reduzido de uma câmara reverberante retangular bem como o modelo também reduzido de uma fonte de ruído, foram utilizados em uma tentativa de comprovação dos resultados obtidos teóricamente no capítulo II.

Os resultados obtidos experimentalmente podem ser observados nas curvas das figuras (3.18) e (3.19) no capítulo III.

As curvas teóricas apresentadas na figura (2.11) tem uma frequência de corte inferior que podem ser calculada a partir da expressão (2.60). Para o caso do modelo reduzido da sala, esta frequência é de aproximadamente 1500Hz.

Nas frequências mais baixas em que foi realizado o experimento, os resultados são mais discrepantes dos resultados teóricos do que nas altas frequências.

A necessidade de um número maior de posições da fonte na região de contorno, a proximidade da frequência de corte da frequência mais baixa em que foi realizado o teste, o número de modos reduzido existentes e o fato da teoria assumir o caso das altas frequências, são algumas das causas possíveis, já previamente discutidas no capítulo III, para as discrepâncias observa

das nas frequências baixas.

Nas altas frequências uma diferença mais acentuada foi observado no valor prático de σ_b^2 para 5000Hz. A causa desse problema também já foi discutida no capítulo III e pode ser resumida como sendo relativa à posição da fonte e do contorno analisado. Isto é, de acordo com a posição da fonte frente a um dos contornos o nível de pressão sonora pode variar até de 3 dB.

Como conclusão final deste trabalho, podem ser apresentados, em função das expressões (2.2) e (2.62), duas expressões. Uma, Eq. (2.57), para corrigir o valor da potência acústica média medida em câmaras reverberante, com a fonte localizada somente na parte central da sala, para o valor correto da potência acústica de campo livre. A outra expressão é relativa ao que foi definido como variância da potência acústica, Eq. (2.73).

O motivo dessas correções já foram colocados anteriormente e se fundamentam na necessidade de se considerar as posições da fonte próxima aos contornos (paredes, arestas e cantos) na medição da potência acústica emitida por uma fonte de ruído em câmaras reverberantes.

O fator de correção, $\langle \frac{W_b}{W_o} \rangle$, que é função da frequência e das dimensões da sala, pode ser utilizado para a correção discutida no parágrafo anterior na seguinte expressão:

$$W_o = \frac{V_2/V \cdot \langle W_c \rangle}{[1 - \langle \frac{W_b}{W_o} \rangle]} \dots (4.1)$$

onde

$\langle \frac{W_b}{W_o} \rangle$ é obtido pela expressão (2.57) e pode ser visto nas curvas das figuras (2.18) e no caso do modelo reduzido figura (3.18).

$\langle W_c \rangle$ é o valor da potência acústica média medida com a fonte de ruído na região central da câmara reverberante.

$$W_c = \frac{1}{V_2} \int_{V_2} W_c dV_2, \text{ sendo } W_c \text{ a potência acústica medida}$$

para uma posição da fonte na região central.

W_o é a potência acústica de campo livre

V_2 é o volume da região central da sala ou

$$V_2 = (L_x - \lambda)(L_y - \lambda)(L_z - \lambda)$$

L_x, L_y, L_z são as dimensões da sala

V é o volume da sala ou

$$V = L_x \cdot L_y \cdot L_z$$

Em sequência será escrita a expressão (2.62) que apresenta uma correção, σ_b^2 , a ser feita no valor medido da variância, σ_c^2 , para a fonte localizada na região central da câmara.

$$\sigma^2 = \sigma_b^2 + \frac{V_2}{V} \sigma_c^2$$

onde

σ_c^2 é a variância do valor da potência acústica medida para a fonte de ruído localizada na região central da câmara reverberante;

σ_b^2 é o fator de correção calculado pela expressão (2.73) e que pode ser observado na figura (2.19) e para o caso do modelo reduzido na figura (3.19).

A contribuição mais significativa deste trabalho, é que os resultados obtidos mostram, figura (2.18), a necessidade de serem consideradas as posições da fonte próximos ao contorno devido à boa quantidade de energia perdida na medição da potência acústica com a fonte na região central da câmara. Isto sugere uma modificação das normas internacionais ISO 3742 (1975) - "Precision Methods for Discrete - Frequency and Narrow - Band Sources in Reverberation Rooms" e na ANSI - S1-21-1972 "Methods for the Determination of Sound Power Levels of Small Sources in Reverberation Rooms".

APENDICE A

MEDIÇÃO DA PERDA NA TRANSMISSÃO (TL)

Para esta experiência foi assumido que a energia só seria transmitida pela parte superior do modelo reduzido da sala.

O esquema (A.1) a seguir ilustra a maneira geral como é realizado o teste.

Duas salas são necessárias, a sala receptora e a transmissora. No caso o modelo reduzido será considerado a sala transmissora enquanto a sala do laboratório será a receptora.

Foi medido o tempo de reverberação para se encontrar a absorção total de sala e com isso utilizar a seguinte expressão para a perda na transmissão, TL:

$$TL \text{ (dB)} = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A_2} \text{ dB} \quad \dots \text{ (A.1)}$$

L_1 é o nível de pressão sonora médio medido no campo reverberante na sala transmissora (Modelo reduzido)

L_2 é o nível de pressão sonora médio medido no campo reverberante na sala receptora (laboratório)

S é a superfície da amostra em teste

A_2 é a absorção total da sala receptora.

A_2 pode ser calculado da fórmula de Sabine para o tempo de reverberação T_r :

Segundo Sabine:

$$T_r = \frac{0.16 V}{A} \quad \dots (A.2)$$

Onde

V é o volume da sala

A é a absorção total da sala ou seja $A = \sum_i \bar{\alpha}_i S_i$ onde $\bar{\alpha}_i$ é o coeficiente de absorção médio na superfície S_i .

Desse modo A_2 pode ser escrito como:

$$A_2 = \frac{0.16 V_2}{T_{r_2}} \quad (m^2) \quad \dots (A.3)$$

Antes de serem apresentados os resultados do experimento é importante se colocar o significado físico da perda na transmissão (TL).

| ENERGIA INCIDENTE % | ENERGIA ABSORVIDA OU PERDIDA % | TL (dB) | ENERGIA TRANSMITIDA % |
|---------------------------|--------------------------------------|------------|-----------------------------|
| 100 | 90 | 10 | 10% |
| 100 | 99 | 20 | 1% |
| 100 | 99.9 | 30 | 0.1% |
| 100 | 99.99 | 40 | 0.01% |

RESULTADOS OBTIDOS:

A tabela abaixo apresenta os valores do nível de pressão sonora médio em ambas as salas, o tempo de reverberação da sala receptora e o nível de ruído de fundo e a perda na transmissão:

| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| SPL Médio Sala receptora | 62.5 | 71.7 | 74.8 | 66.9 | 55.8 | 50.7 |
| SPL Médio Sala transmissora | 75 | 86.8 | 88.3 | 83.7 | 75.0 | 74.3 |
| SPL Ruído de fundo | 49.1 | 45.0 | 40.8 | 36.1 | 32.1 | 25.6 |
| Tempo de reverberação (s) | 1.12 | 1.06 | 1.21 | 0.99 | 0.99 | 0.82 |
| TL (dB) | 8.9 | 11.3 | 10.3 | 12.5 | 15.1 | 18.7 |

A área de amostra foi $S = 0,3286\text{m}^2$ e o volume da sala receptora $V = 52\text{m}^3$.

O teste foi realizado segundo as normas internacionais embora o volume das duas salas não estejam dentro das especializações. O experimento visou quantificar aproximadamente a energia perdida de um sistema para o outro.

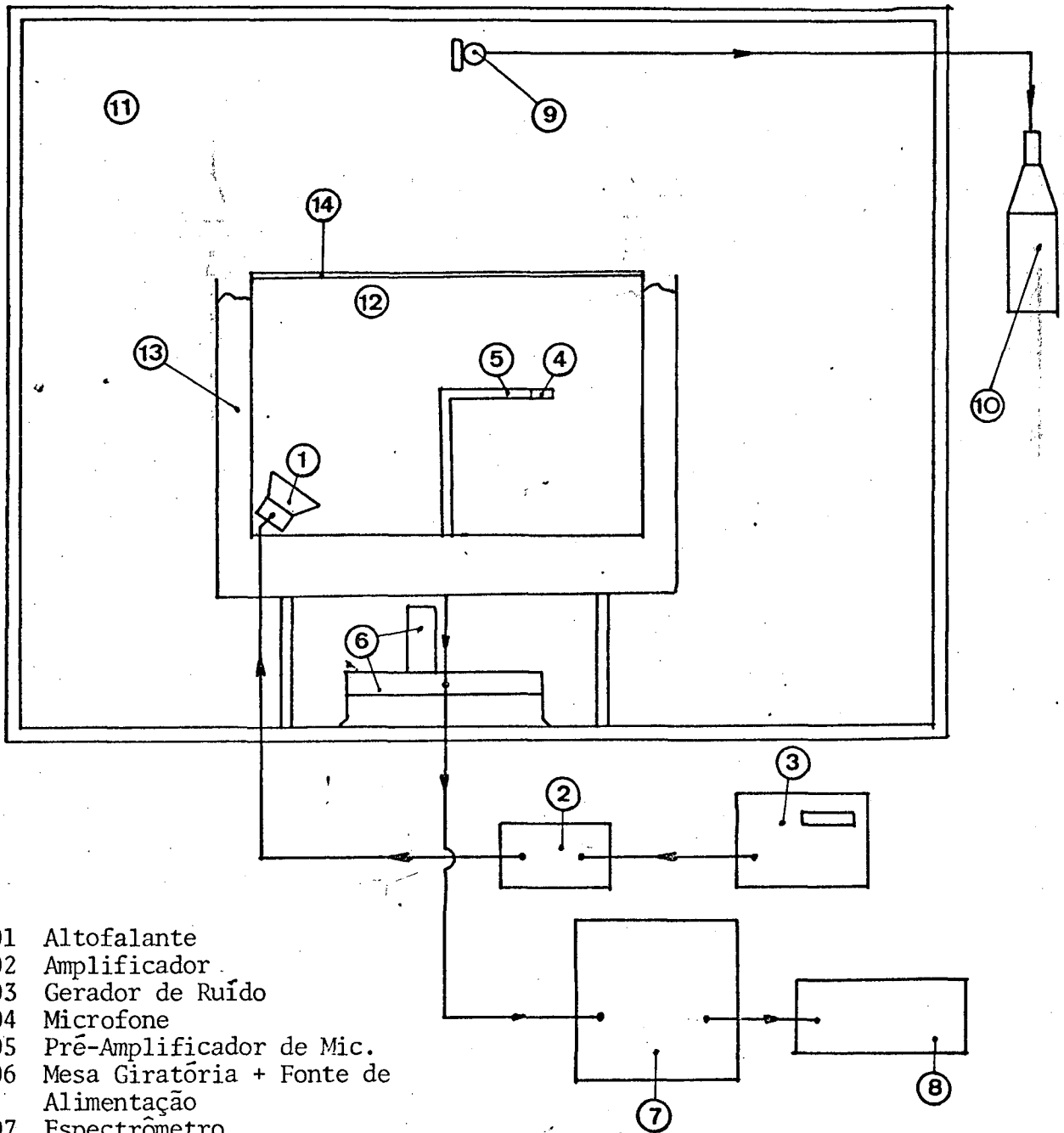


Figura (A.1)
 Arranjo dos Equipamentos

APENDICE B

LEVANTAMENTO DO DIAGRAMA DE DIRETIVIDADE DE FONTES DE RUIDO

Para este tipo de teste é necessário a utilização de uma câmara anecônica.

Desse modo foi simulado um espaço anecônico que pode ser visto nas figuras (B-1) e (B-2).

O sinal captado pelo microfone foi filtrado em 1/3 de oitava com a finalidade de se evitar as interferências do ruído de fundo.

O esquema de montagem dos equipamentos utilizados no teste pode ser observado na figura(B-4).

As figuras (B-1),(B-2) e (B-3) mostram os equipamentos, as fontes e o espaço anecônico.

Os resultados podem ser vistos nas figuras(3.4) e (3.5).

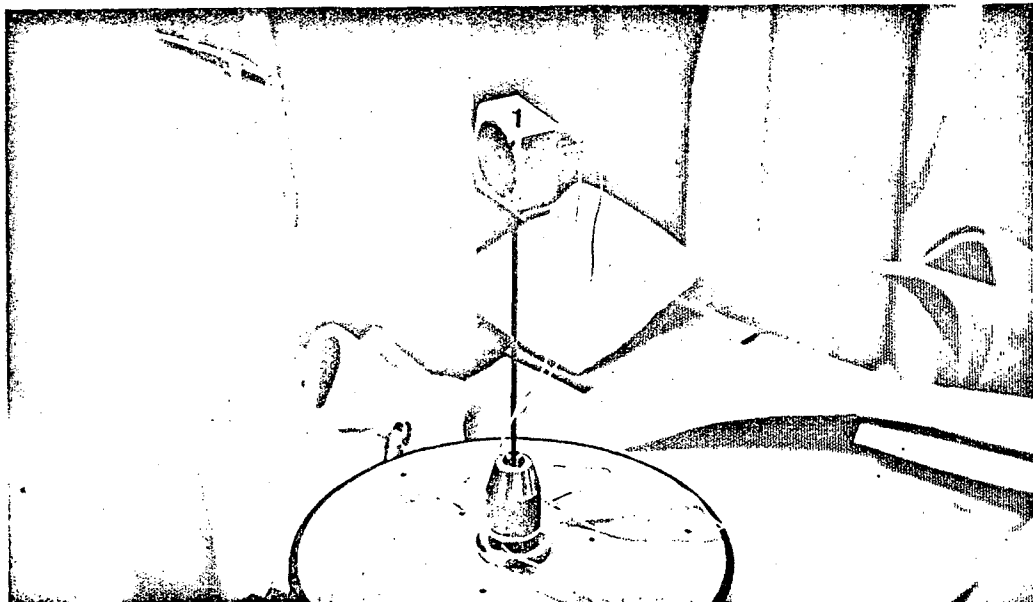
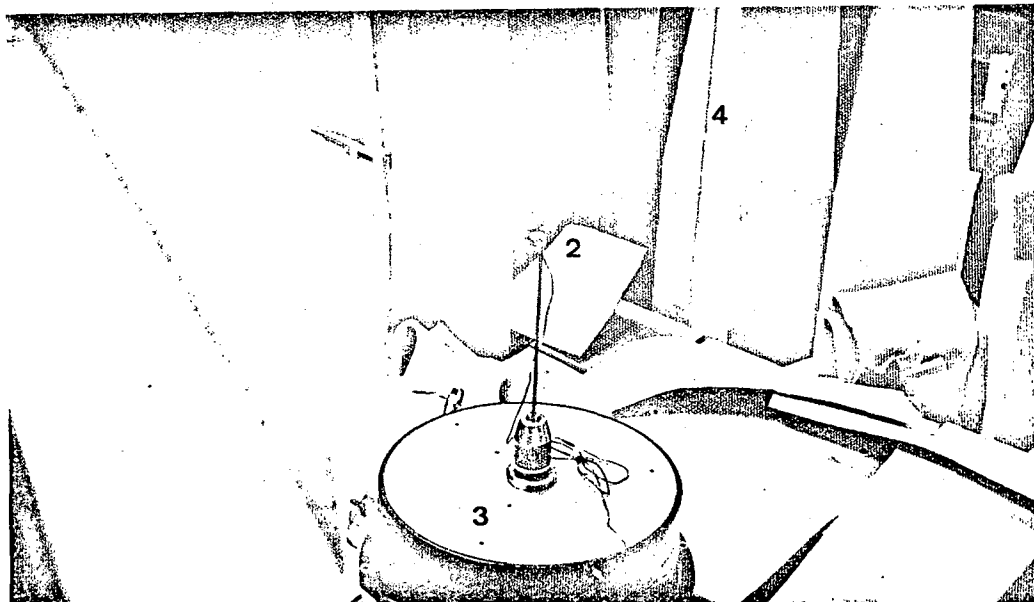


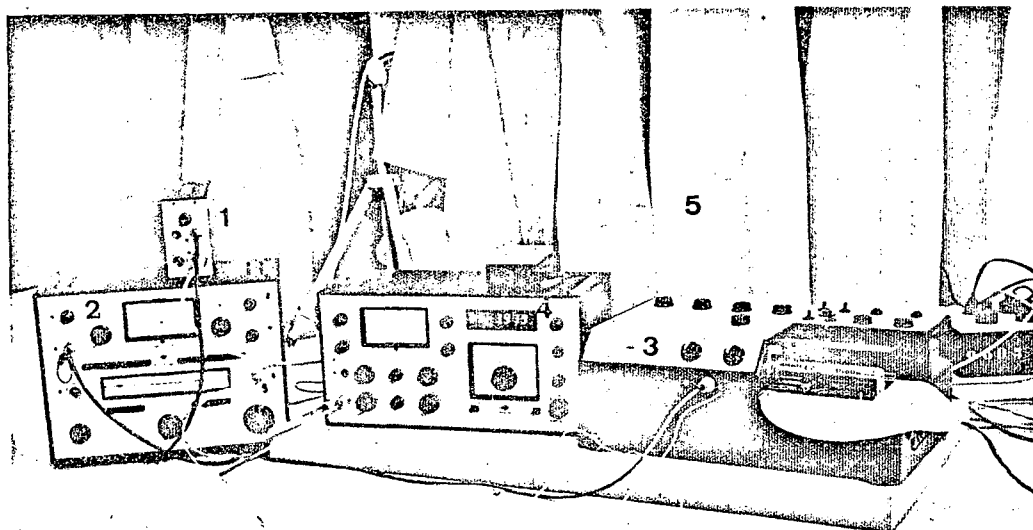
Figura (B-1)
Vista da fonte de ruído N°1
em teste



- 1 Microfone+Pré-Amplificador
- 2 Fonte de ruído N°3
- 3 Mesa giratória
- 4 Vista interna do espaço anecóico

Figura (B-2)

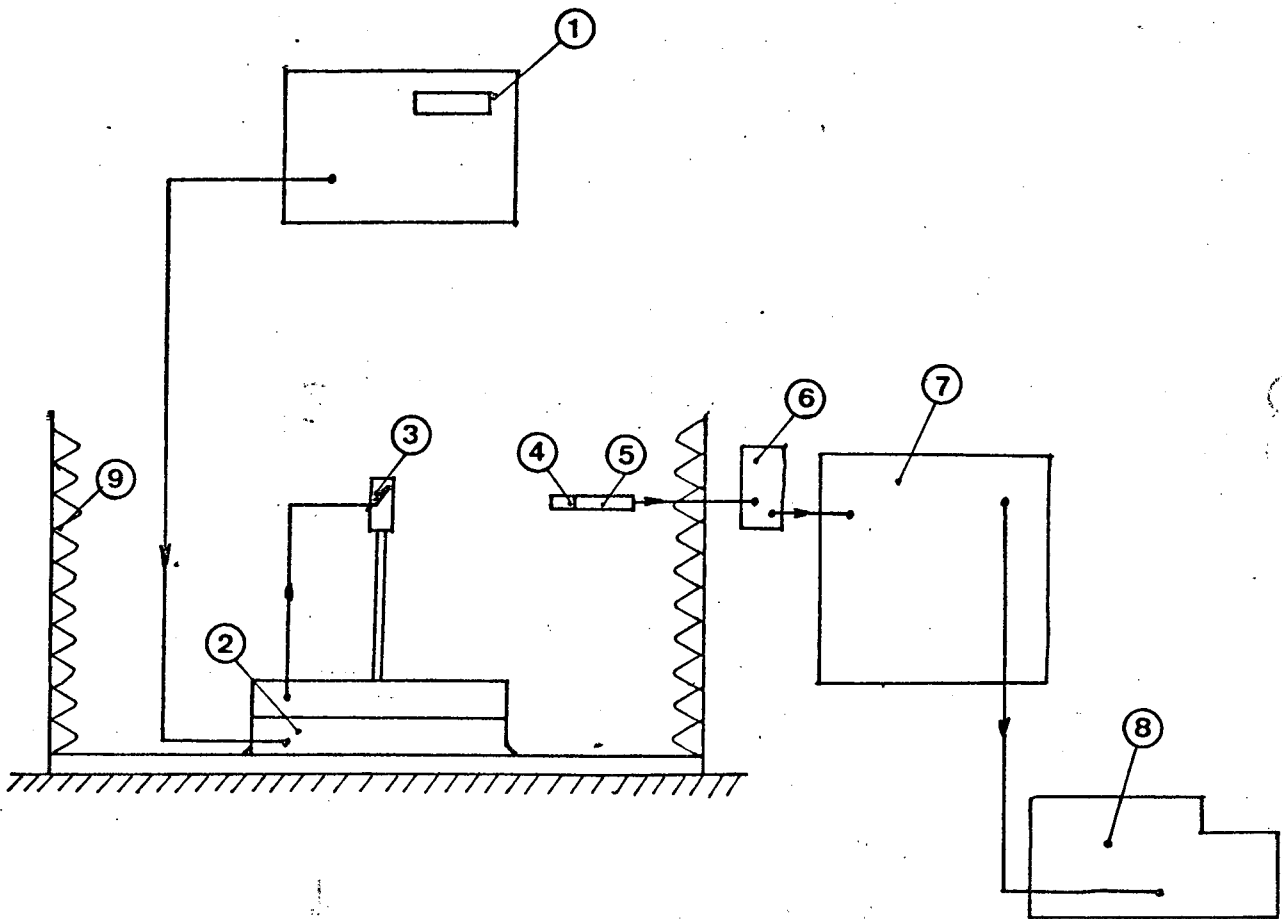
Vista interna do espaço anecóico utilizado para
o teste



- 1 Fonte de alimentação para microfones
- 2 Espectrômetro
- 3 Registrador gráfico
- 4 Gerador de sinais
- 5 Vista externa do espaço anecóico

Figura (B-3)

Vista geral da montagem do experimento



- 1 - Gerador de sinais
- 2 - Mesa giratória
- 3 - Alto falante em teste
- 4 - Microfone
- 5 - Pré-amplificador
- 6 - Fonte de alimentação
- 7 - Espectrômetro
- 8 - Registrador gráfico
- 9 - Espaço anecôico

Figura (B-4)

Arranjo dos equipamentos para medir diretividade

APÊNDICE C

TERMINOLOGIA ACÚSTICA

A. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (SPL)

O nível de pressão sonora (SPL) de um som é 20 vezes o logarítmo na base 10 da razão entre a pressão deste som e a pressão sonora, de referência i.e.,

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \quad (dB)$$

onde $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$

B. NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA (PWL)

O nível de potência sonora (PWL) de uma fonte de ruído em dB é 10 vezes o logarítmo da razão entre a potência sonora radiada pela fonte e a potência sonora de referência.

$$PWL = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} \quad (dB)$$

$$W_{ref} = 10^{-12} \text{ Watts}$$

C. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação de uma sala (medido em segundos) em uma dada frequência é o tempo necessário para o nível de pressão sonora médio na sala cair de 60 dB.

Uma fórmula empírica existe e foi desenvolvida por Sabine.

$$T_r = \frac{0.16 V}{a}$$

Onde V é o volume da sala.

a é a absorção total da sala ou

$$a = \sum_i S_i \alpha_i$$

Onde α_i é a absorção do material e S_i a área da superfície para o material i .

D. MODOS DE VIBRAÇÃO DE UMA SALA RETANGULAR

Os modos de vibração de uma sala são caracterizados pelas suas respectivas frequências de ressonância. Isto significa que se um som com a frequência de um determinado modo de vibração for injetado na sala a mesma irá responder de maneira mais forte do que se excitada fora da frequência de ressonância.

As frequências de ressonância podem ser encontradas a partir da seguinte expressão:

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left[\frac{n_x}{L_x}\right]^2 + \left[\frac{n_y}{L_y}\right]^2 + \left[\frac{n_z}{L_z}\right]^2}$$

Onde c é a velocidade do som no modo

n_x, n_y, n_z são os números do ruído

L_x, L_y, L_z são as dimensões da sala

E. ONDAS ESTACIONÁRIAS

As sucessivas reflexões do som nas paredes de uma sala faz com que seja criado um campo sonoro no interior da sala caracterizado por grandes variações da pressão sonora. A figura C.1 mostra algumas destas ondas estacionárias.

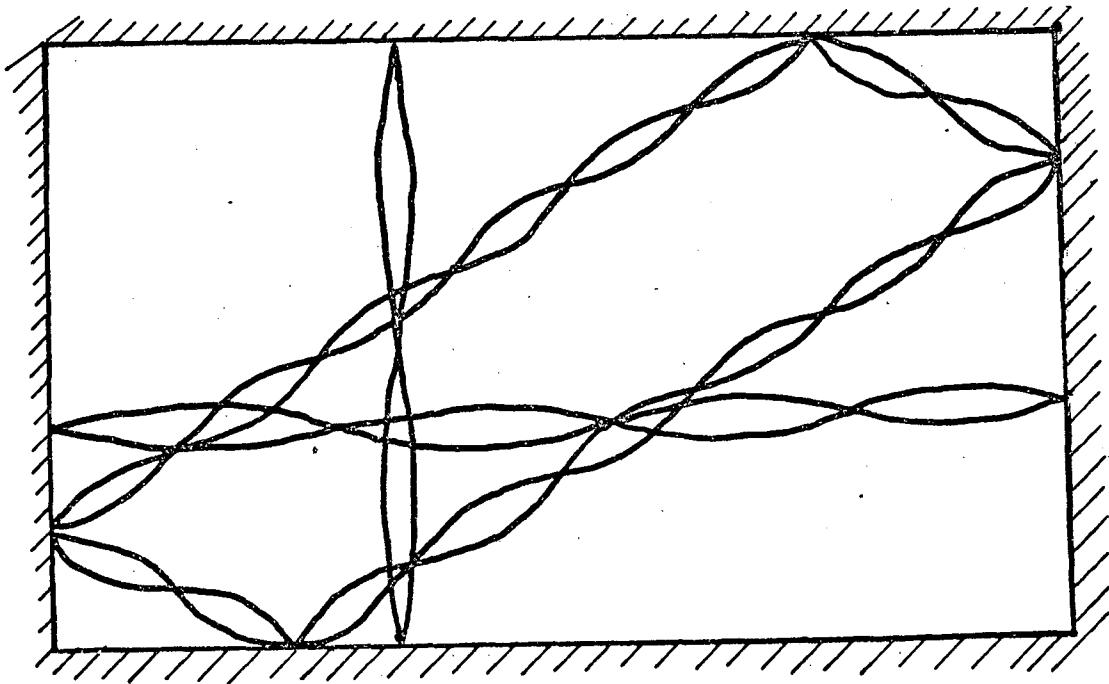


Figura C.1
Modos de vibração acústicos de uma sala



THE 1980 INTERNATIONAL
CONFERENCE ON NOISE
CONTROL ENGINEERING
Hotel Inter-Continental
Miami, Florida, USA
8-10 December 1980

ACOUSTIC POWER CONTRIBUTION DUE TO SOURCE NEAR THE REVERBERATION CHAMBER BOUNDARIES

S.N.Yousri Gerges, and M.A.N. de Araujo,

Depto. Eng. Mec. UFSC
Cx.P. 476, Florianópolis,
88000, SC, BRASIL.

Lab.Acust. e Vib. INPM,
Rodovia Wash. Luiz km 23,
Rio de Janeiro, BRASIL.

Blank rest of this page here.

INTRODUCTION

Larger sound power values are obtained according to free-field method than the reverberation chamber method [1]. A possible reason for this difference can be partly due to source position and orientation within the chamber. It is shown that sound power radiated when averaged over all possible source positions within the chamber (including positions near boundaries) is equal to the free-field value [2,3,4,5,6]. As the sound pressure level in practice is always measured in the central part of the reverberation chamber, and with few source positions, this leads to lower power level and lower variance too. This paper is an attempt to quantify this effect.

MEAN AND VARIANCE FOR A MONOPOLE NEAR THE CHAMBER BOUNDARIES

Two models have been considered, in the first, the average power radiated by a monopole source within half-wavelength from an infinite surface, an edge formed by two infinite surfaces, and a corner formed by three infinite surfaces has been calculated using Waterhouse expressions [7] and considering that the chamber is formed by 6 walls, 12 edges and 8 corners. In the second model the expression for the sound power radiated [2,3,4,5] has been averaged for source positions within half-wavelength from the chamber boundaries. The two models give the same results. These results are expressed as the ratio of the average sound power contribution due to point monopole source within half-wavelength from the chamber boundaries $\langle W_b \rangle$ to the

free-field power W_0 and is found to be (see figure 1),

$$\left\langle \frac{W_b}{W_0} \right\rangle = \frac{1}{V} \{ 2 A_1 \lambda [(L_x - \lambda)(L_y - \lambda) + (L_y - \lambda)(L_z - \lambda) + (L_z - \lambda)(L_x - \lambda)] + 4A_2 \lambda^2 [L_x + L_y + L_z - 3\lambda] + 8A_3 \lambda^3 \} \quad (1)$$

where: V is the chamber volume ($V = L_x L_y L_z$),

L_x, L_y, L_z are the rectangular chamber dimensions,

λ is the acoustic wavelength,

$A_1 = 0.613$, $A_2 = 0.367$, and $A_3 = 0.215$

The corresponding variance σ_b^2 of the radiated power with respect to monopole positions within half-wavelength from the chamber boundaries is found to be (see figure 2),

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{V} \{ V_1 - B_1 \lambda [(L_x - \lambda)(L_y - \lambda) + (L_y - \lambda)(L_z - \lambda) + (L_z - \lambda)(L_x - \lambda)] - B_2 \lambda^2 [L_x + L_y + L_z - 3\lambda] + B_3 \lambda^3 \} \quad (2)$$

where: $V_1 = V - (L_y - \lambda)(L_z - \lambda)(L_x - \lambda)$,

$B_1 = 0.762$, $B_2 = 0.174$ and $B_3 = 0.919$

Experimental work is in progress to confirm the above expressions [8].

CONCLUSIONS

In practice the sound power is measured with few source positions in the central part of the reverberation chamber $\langle W_c \rangle$. This leads to a lower value than that of the free-field power W_0 . A correction is proposed to account for the contribution when the source is near the chamber boundaries, this correction being given by equation (1) which can be used in the following expression:

$$W_0 = \langle W_c \rangle / \left[1 - \left\langle \frac{W_b}{W_0} \right\rangle \right]$$

Also the corresponding correction for the variance is given by equation (2), which can be used in the following expression:

$$\sigma_o^2 = \sigma_b^2 + \sigma_c^2$$

where: σ_o^2 is the variance accounting for all possible source positions in the chamber,
 σ_b^2 is the variance accounting for source power measured in the central volume of the chamber only, normalized to the total chamber volume.

ACKNOWLEDGEMENTS

The support of INPM, FINEP, CNPq and CNEN is gratefully acknowledged.

REFERENCES

1. Per V. Brüel, "Discrepancies between Sound Power Measurements in an Anechoic Chamber and Reverberation Chamber", Brüel and Kjaer T.R. 3, (1978).
2. G.C. Maling, "Calculation of the Acoustic Power Radiated by a Point source into a Rectangular Reverberation Chamber", J. Acoustic. Soc. Am. 42, 859-865, (1967).
3. S.N. Yousri Gerges and F. Fahy, "An Analysis of the Acoustic Power Radiated by a Point Dipole Source into a Rectangular Reverberation Chamber", J. of Sound and Vib. 25, 39-50, (1972).
4. S.N. Yousri Gerges, "An Analysis of the Acoustic Power Radiated by Quadrupole Source into a Reverberation Chamber", Inter-Noise 79, 215-217, (1979).
5. S.N. Yousri Gerges and F.J. Fahy, "An analysis of Acoustic Power Radiated into a Reverberation Chamber by a Transversely Vibrating Slender Bar", J. of Sound and Vib. 32, 311-325, (1974).
6. S.N. Yousri Gerges, "The Variance of Sound Power Radiated by Higher Order Sources in a Reverberation Chamber", J. of Sound and Vib. (L), 72, (1980).
7. R.V. Waterhouse, "Interference Patterns in Reverberant Sound Fields", J. Acoust. Soc. Am. 27, 247-258, (1955).
8. S.N. Yousri Gerges and M.A.N. de Araujo, "An Experimental Study of the Acoustic Power Contribution due to Source Near the Reverberation Chamber Boundaries", in preparation.

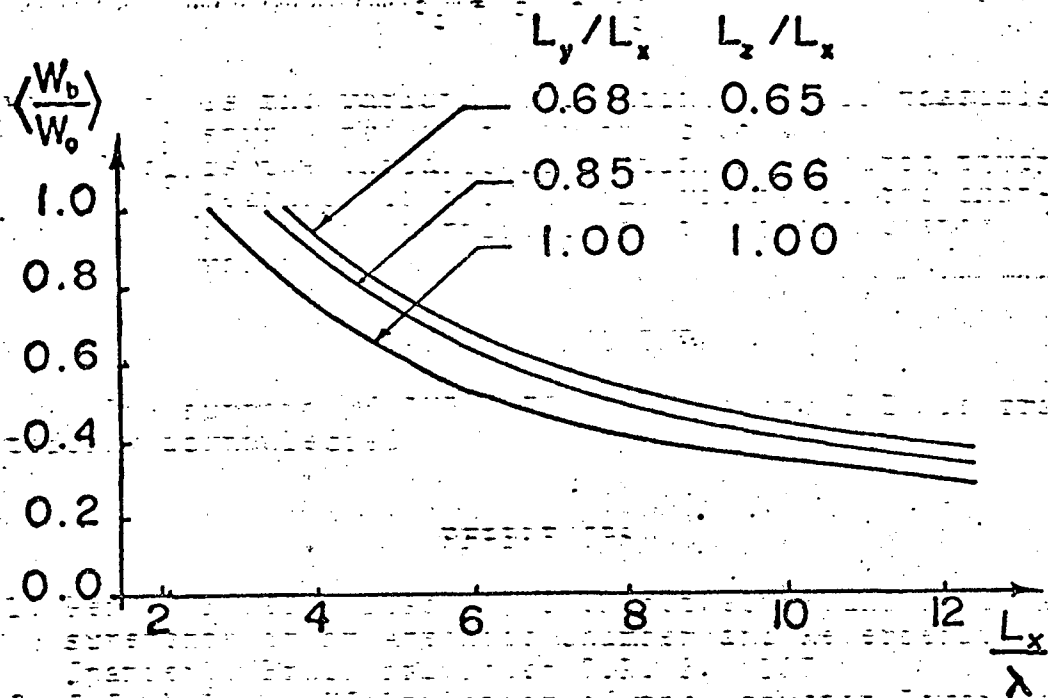


Fig. 1 - Average Power Ratio for Source Near the Boundaries (eq. 1).

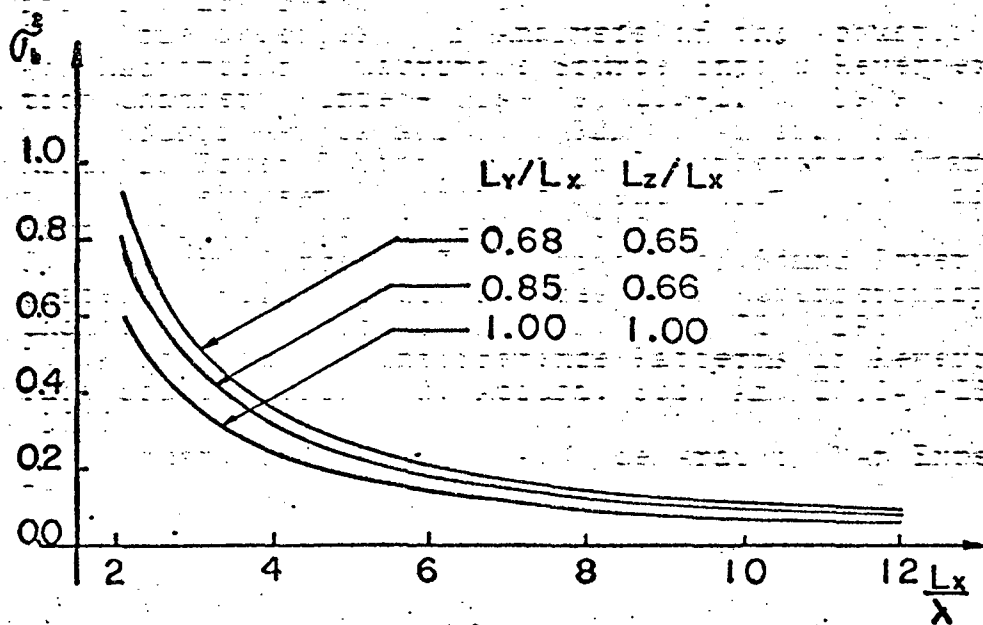


Fig. 2 - Variance for Source Near the Boundaries (eq. 2).