

Universidade Federal de Santa Catarina  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ABSORÇÃO SONORA DE BAFFLES**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Civil

**Lia Kortchmar**

Florianópolis  
Agosto de 1994

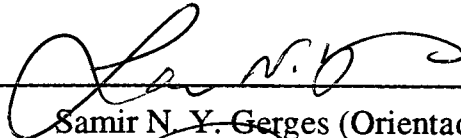
**ABSORÇÃO SONORA DE BAFFLES**

Lia Kortchmar

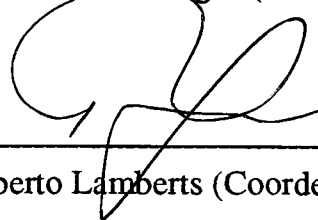
Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de

**Mestre em Engenharia**

Especialidade **Engenharia Civil** e aprovada em sua forma final pelo programa de  
**Pós-Graduação em Engenharia Civil**



Samir N. Y. Gerges (Orientador)

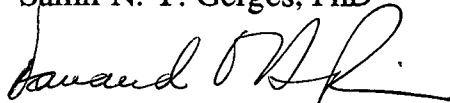


Roberto Lamberts (Coordenador do Curso)

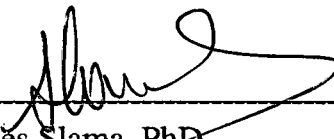
Banca Examinadora



Samir N. Y. Gerges, PhD



Fernando O. Ruttkay Pereira, PhD



Jules Slama, PhD

## APRESENTAÇÃO

Atualmente, as universidades e empresas, estimuladas pela velocidade do progresso tecnológico, buscam uma interação entre desenvolvimento científico e geração de novas tecnologias que envolve a concepção de produtos fundamentada em pesquisa e desenvolvimento.

Essa interação entre grupos de pesquisa das universidades e de desenvolvimento das empresas, em programas de interesse comum, se tornou uma alternativa para responder às demandas de progresso regional e nacional, com base nos avanços da ciência e tecnologia.

Desta forma, destacamos a importância do convênio firmado entre a FEESC (Fundação de Ensino do Estado de Santa Catarina) da Universidade Federal de Santa Catarina e a ILLBRUCK Industrial Ltda., e o suporte técnico instrumental do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) - onde foi efetuada a etapa experimental - para a realização desta dissertação de mestrado.

## AGRADECIMENTOS

*Ao Prof. Samir N. Y. Gerges, do Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC e ao Engº Marco Nabuco de Araujo, do Laboratório de Ensaio Acústicos do INMETRO, com carinho e consideração pela precisa orientação desta pesquisa e incentivo constante.*

*Ao Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO, onde foi realizada a etapa experimental desta pesquisa, que possibilitou o acesso aos seus excepcionais recursos técnicos e humanos;*

*à todos os companheiros da Divisão de Acústica e Vibrações; e, em especial à José Augusto de Azevedo - Chefe da Divisão de Acústica e Vibrações, Walter Hoffmann e Nelson Melo Espirito Santo.*

*À Illbruck Industrial, na pessoa do Engº Mauricy Souza, pelo interesse demonstrado e apoio financeiro.*

*À Valmor Rosa e Silva do Núcleo de Processamento de dados da UFSC pela atenção na impressão final desta dissertação.*

*À Universidade Federal de Santa Catarina.*

*Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.*

*À minha família e amigos por nunca me faltarem.*

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FÓRMULAS MATEMÁTICAS</b>	<b>viii</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>x</b>
<b>RÉSUMÉ</b>	<b>xi</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
1.1 - Considerações Iniciais	1
1.2 - Objetivo	3
1.3 - Desenvolvimento da Pesquisa	4
1.3.1 - Ensaio experimentais	4
1.3.2 - Modelagem teórica	5

**CAPÍTULO 2** **7**

---

2.1 - A Natureza dos Campos Sonoros	7
2.2 - Absorção Sonora	9
2.2.1 - Coeficiente de absorção sonora	9
2.2.2 - Coeficiente de redução sonora	10
2.2.3 - Comportamento dos materiais de absorção	10

**CAPÍTULO 3** **16**

---

3.1 - Introdução	16
3.2 - Norma ISO 354 - Medição de Coeficiente de Absorção Sonora em Câmara Reverberante	
[14]	17
3.2.1 - Definições	17
3.2.2 - Princípio geral	18
3.2.3 - Quantidade a ser medida	18
3.2.4 - Procedimento de medição e arranjo de teste	20
3.3 - Incerteza na Medição de Tempo de Reverberação em Câmara Reverberante	22
3.3.1 - Fatores de influência na medição de tempo de reverberação	23

## **CAPÍTULO 4**

**27**

4.1 - Introdução	27
4.2 - Procedimento Experimental	28
4.2.1 - Esquema de montagem dos equipamentos	28
4.2.2 - Características da câmara reverberante	28
4.2.3 - Geração do campo sonoro	29
4.2.4 - Equipamento de recepção	29
4.3 - Parâmetros Investigados e Análise dos Resultados	29
4.3.1 - Verificação da incerteza na medição de tempo de reverberação	30
4.3.2 - Estudo do set up do Analisador de Frequências	30
4.3.3 - Investigação do desvio padrão - Parte I	33
4.3.4 - Investigação do desvio padrão - Parte II	35
4.4 - Comentários	36

## **CAPÍTULO 5**

**49**

5.1 - Introdução	49
5.2 - Arranjo de Teste	51
5.2.1 - Amostra de teste	51
5.2.2 - Procedimento de ensaio	53
5.2.3 - Set Up de medição	53
5.3 - Método de Cálculo	54
5.3.1 - Cálculo da área de absorção sonora equivalente, A	54
5.3.2 - Cálculo da área de absorção sonora equivalente por placa acústica, $A(m^2/placa)$	55
5.3.3 - Coeficiente de redução sonora, CRS	55
5.4 - Resultados Experimentais	56
5.4.1 - Estatística aplicada à metrologia	56
5.5 - Procedimento	57
5.6 - Análise dos Resultados	57

**CAPÍTULO 6** **64**

---

6.1 - Método de Medição de Tempo de Reverberação em Câmara Reverberante	64
6.2 - Avaliação do Sistema de Medição Adotado	65
6.3 - Absorção Sonora de Baffles	65
6.4 - Sugestões Quanto à Continuidade da Pesquisa	66

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** **67**

---

**ANEXO I**

**ANEXO II**

**ANEXO II**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo típico de aplicação de *baffles* em um ambiente industrial

Figura 2.1 - Os fenômenos acústicos em um recinto

Figura 2.2 - Reflexão sonora

Figura 2.3 - Decaimento sonoro em recintos em campo reverberante

Figura 2.4 - Absorção do som

Figura 2.5 - Curva típica de um material absorvente

Figura 2.6 - Os processos de absorção do som nos materiais

Figura 2.7 - Fatores que influenciam a absorção sonora dos materiais

Figura 2.8 - Uma típica salas de teste reverberante

Figura 3.1 - Crescimento e decaimento do nível de pressão sonora

Figura 3.2 - Medição de tempo de reverberação para as frequências de 100 Hz e 10 kHz

Figura 4.1 - Esquema de montagem dos equipamentos de teste

Figura 4.2 - Influência do número de decaimentos na precisão dos resultados de tempo de reverberação

Figura 4.3 - Desvio padrão em relação à média entre 5 ensaios de Tempo de reverberação - microfone 1 / fonte 1

Figura 4.4 - Tempo de reverberação - microfones 1, 2, 3 / fonte 1

Figura 4.5 - Tempo de reverberação na posição de fonte 1 (F1) e na posição de fonte 2 (F2)

Figura 4.6 - Tempo de reverberação utilizando o set up A - ensaio 1

Figura 4.7 - Decaimento sonoro na frequência de 125 Hz - set up A/ensaio 1

Figura 4.8 - Decaimento sonoro na frequência de 10 kHz - set up A/ensaio 1

Figura 4.9 - Tempo de reverberação utilizando o set up A - ensaio 2

Figura 4.10 - Decaimento sonoro na frequência de 125 Hz - set up A/ensaio 2

Figura 4.11 - Tempo de reverberação utilizando o set up B

Figura 4.12 - Decaimento sonoro na frequência de 10 kHz - set up B

Figura 4.13 - Decaimento sonoro na frequência de 100 Hz - set up B

Figura 4.14 - Tempo de reverberação utilizando o set up C

Figura 4.15 - Tempo de reverberação - média entre 5 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 5 testes (ensaio 1)

Figura 4.16 - Tempo de reverberação - média entre 5 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 5 testes (ensaio 2)

Figura 4.17 - Tempo de reverberação - média entre 5 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 5 testes (ensaio 3)

Figura 4.18 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X  
média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 1/fonte 1)

Figura 4.19 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X  
média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 1/fonte 2)

Figura 4.20 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X  
média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 2/fonte 1)

Figura 4.21 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X  
média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 2/fonte 2)

Figura 4.22 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X  
média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 3/fonte 1)

Figura 4.23 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X  
média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 3/fonte 2)

Figura 5.1 - Espuma SONEX

Figura 5.2 - Esquema de montagem dos *baffles* pendurados no teto da câmara reverberante

Figura 5.3 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* sem espaçamento de ar, com  
e sem chapa de madeira instalada

Figura 5.4 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* com espaçamento de ar  
30mm , com e sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

Figura 5.5 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* com espaçamento de ar  
60mm , com e sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

Figura 5.6 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* com espaçamento de ar  
75mm , com e sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

Figura 5.7 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* com espaçamento de ar 90 mm , com e sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

Figura 5.8 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* com espaçamento de ar 30, 60, 75, 90 mm , com chapa de madeira instalada X amostras no piso

Figura 5.9 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* com espaçamento de ar 30, 60, 75, 90 mm, sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

Figura 5.10 - Coeficiente de Redução Sonora - 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 *baffles*

Figura AI.1 - Placas acústicas no piso - amplitude do desvio padrão

Figura AI.2 - *Baffles* sem espaçamento de ar (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.3 *Baffles* sem espaçamento de ar (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.4 - *Baffles* com espaçamento de ar 30 mm (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.5 - *Baffles* com espaçamento de ar 30 mm (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.6 - *Baffles* com espaçamento de ar 60 mm (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.7 - *Baffles* com espaçamento de ar 60 mm (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.8 - *Baffles* com espaçamento de ar 75 mm (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.9 - *Baffles* com espaçamento de ar 75 mm (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.10 - *Baffles* com espaçamento de ar 90 mm (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AI.11 - *Baffles* com espaçamento de ar 90 mm (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

Figura AII.1 - Superfícies numeradas do modelo da câmara reverberante do INMETRO

Figura AII.2 - Posição da fonte sonora e superfície de recepção

Figura AII.3 - Vistas da câmara reverberante

Figura AII.4 - Resultado Típico de EDT para 500 Hz

Figura AII.5 - Superfícies que compõem o modelo da câmara reverberante do INMETRO

Figura AIII.1 - Equipamentos utilizados na medição de tempo de reverberação

Figura AIII.2 - Câmara reverberante (INMETRO) - fonte sonora e microfones

Figura AIII.3 - Confeção da estrutura de sustentação dos *baffles* (duas fases)

Figura AIII.4 - Montagem da estrutura metálica de sustentação dos *baffles*

Figura AIII.5 - Fixação das roldanas para elevação da estrutura de sustentação dos *baffles*

Figura AIII.6 - Sistema de elevação da estrutura de sustentação dos *baffles* (duas fases)

Figura AIII.7 - *Baffles* com espaçamento de ar (duas vistas)

Figura AIII.8 - Baffles com espaçamento de ar no teto da câmara

Figura AIII.9 - Baffles com chapa de madeira

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Área de absorção sonora equivalente máximas para volume da sala  $V = 200 \text{ m}^3$

Tabela AI.1 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) dos 5 ensaios - amostra no piso da câmara

Tabela AI.2 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) dos 5 ensaios - *baffles* sem espaçamento de ar

Tabela AI.3 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) dos 5 ensaios - *baffles* com espaçamento de ar 30 mm

Tabela AI.4 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) dos 5 ensaios - *baffles* com espaçamento de ar 60 mm

Tabela AI.5 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) dos 5 ensaios - *baffles* com espaçamento de ar 75 mm

Tabela AI.6 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) dos 5 ensaios - *baffles* com espaçamento de ar 90 mm

Tabela AI.7 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) de cada montagem - média aritmética e desvio padrão

Tabela AI.8 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) de diferentes números de *baffles*

Tabela AI.9 - Coeficiente de redução de ruído ( $\text{m}^2/\text{placa}$ ) de diferentes números de painéis de *baffles*

## LISTA DE FÓRMULAS MATEMÁTICAS-

- 2.1 Coeficiente de redução sonora, CRS
- 3.1 Tempo de reverberação da câmara reverberante, T
- 3.2 Absorção total, A
- 3.3 Área de absorção sonora equivalente da amostra na sala,  $A_e$
- 3.4 Área de absorção sonora equivalente da sala vazia
- 3.5 Área de absorção sonora equivalente da sala contendo a amostra de teste
- 3.6 Coeficiente de absorção sonora,  $\alpha$
- 3.7 Condição que determina a forma da câmara reverberante
- 3.8 Desvio padrão amostral,  $\sigma$
- 5.1 Área de absorção sonora equivalente, A
- 5.2 Área de absorção sonora equivalente por placa acústica,  $A/S$
- 5.3 Média Aritmética,  $\bar{x}$



## RESUMO

Os ambientes internos devem satisfazer às condições acústicas adequadas à sua utilização específica. Em certos locais (ex. instalações industriais) onde a disponibilidade de área livre é restrita, materiais acústicos em determinadas composições - tais como os conhecidos *baffles* - podem ser empregados com sucesso.

Com o objetivo de avaliar o comportamento acústico de *baffles* foram estudados os parâmetros que regulam o desempenho de materiais acústicos utilizados nestes elementos absorventes.

Os ensaios experimentais foram realizados em um laboratório de referência nacional (INMETRO) obedecendo um alto rigor metrológico, permitindo, desta forma, o estudo aprofundado do método de medição e consequente precisão dos resultados obtidos. A fim de otimizar a absorção acústica de um material de baixo custo, foram estudados como variáveis o número de elementos por unidade de superfície, as dimensões e a forma de instalação.

## ABSTRACT

A widespread method for reducing noise in industrial halls is the use of arrays of absorbers suspended above the working area. In certain halls, for example, where there is not enough area for acoustic treatment or there is a need of sound reduction near the sound source, it is recommended the use of suspended absorbing materials, called *baffles*.

Systematic laboratory research has been carried out on a thin polyurethane foam where the air space and a central divider were used to achieve maximum sound efficiency. The equivalent sound absorption area per object of the different arrangements were measured in the INMETRO reverberation chamber of 211 m<sup>3</sup> volume. The results obtained were compared to the specimen directly mounted on the room surface. The statistical precision in the reverberation time measurement is discussed and also the precision in the computed absorption results.

## RÉSUMÉ

Les milieux internes doivent satisfaire aux conditions acoustiques adéquates à leur utilisation spécifique. Dans certains locaux fermés (ex. installations industrielles), où il n'y a pas suffisamment d'espace pour le traitement acoustique, ou quand il faut le faire à proximité de la source de bruit, il est nécessaire d'utiliser des plaques acoustiques suspendues au plafond - *baffles*.

Cette dissertation de maîtrise est basée sur l'étude de l'utilisation de matériaux d'absorption sonore du type *baffles*, comme moyen de contrôle de qualité acoustique dans les salles. Les essais ont obéi à une grande rigueur de mesure, permettant l'étude approfondie de la méthode de mesure. En vue d'optimiser le confort acoustique, ont été utilisés comme variables le nombre

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Considerações Iniciais

A crescente mecanização de nossa sociedade vem resultando em níveis sonoros mais elevados, tanto em ambientes internos quanto externos. Entretanto, as técnicas de edificação modernas, onde a economia de custos é fator decisivo, estão favorecendo construções com isolamento sonoro deficiente. A questão de conforto acústico, desta forma, torna-se cada vez mais problemática.

As variações nos tipos de construção resultam em uma diversidade de problemas acústicos particulares, dependendo das funções específicas da edificação. Em uma sala de concertos, por exemplo, é necessário realçar a fonte sonora; já em uma instalação industrial é preciso minimizar a propagação natural do som para a proteção dos trabalhadores. Portanto, o mais importante é estabelecer a importância do controle do som através dos múltiplos fatores que devem ser considerados para a função específica da edificação.

Alguns dos problemas de saúde do ser humano resultam do meio ambiente desequilibrado por um desenvolvimento desordenado. Os efeitos do ruído sobre a saúde do ser humano já estão suficientemente estudados: geram o *stress*, passando por problemas de pressão arterial e chegando até à danos irreversíveis ao sistema auditivo.

Para que o conhecimento dos princípios que regem os projetos acústicos nos permita harmonizar o meio ambiente, é importante que se tenha um entendimento preciso sobre o comportamento acústico dos materiais a serem empregados. É equivocado imaginar que um bom projeto acústico possa resultar de cálculos baseados em dados estimados. A fundamentação de um projeto bem sucedido pressupõe o conhecimento das propriedades do material a ser utilizado.

Os coeficientes de absorção sonora dos materiais são dados que fundamentam as diversas aplicações práticas: em acústica de salas, por exemplo, são utilizados para controle do tempo de <sup>reflexão</sup> reverberação, eliminação de ecos e para se obter o correto balanço entre som direto e reverberante; no controle de ruídos, tais dados são essenciais para propiciar maior eficiência na redução de sons indesejáveis.

Idealmente, em projetos de máquinas e equipamentos, deveria ser garantida a máxima eficiência mecânica/elétrica com o nível de ruído mínimo. Similarmente, em projetos de edificações deveriam ser garantidas as condições adequadas à sua utilização específica. Porém, como isso nem sempre é possível, se faz necessário, posteriormente, um tratamento acústico, que, na maioria das vezes, consiste na instalação de forros acústicos e/ou painéis absorventes.

O mecanismo de absorção acústica é baseado na conversão de energia sonora em calor. A quantidade de energia sonora absorvida depende de várias características do material empregado; porém, outros fatores interferem de maneira decisiva na performance do material acústico: as dimensões, a espessura, a forma de instalação, a forma geométrica, a quantidade por área e etc..

Em certos ambientes fechados (ex. instalações industriais), onde a disponibilidade de área livre é restrita, materiais acústicos em determinadas composições - tais como os conhecidos *baffles*<sup>1</sup> - podem ser empregados com sucesso. O uso de *baffles* é recomendado em locais onde não há superfícies extensas para afixar placas acústicas, ou quando a instalação de um forro acarretaria um custo elevado ou enfrentaria dificuldades na montagem devido à existência de dutos ou outras obstruções. *Baffles* podem ser afixados de modo a não interferirem no *lay-out* existente, na iluminação, ou nos sistemas de ventilação. Sua instalação ou remoção é realizada de maneira rápida e eficiente. A Figura 1.1 apresenta a utilização de absorvedores tipo *baffles* em um ambiente industrial típico.

Nota: 1 - Não há na língua portuguesa uma tradução trivial para a palavra *baffle*. Neste texto será empregado o termo em inglês uma vez que é amplamente utilizado pelos profissionais da área de acústica.

Este projeto de pesquisa se baseia no estudo de dispositivos de absorção sonora tipo *baffles* utilizados para controle de qualidade acústica em salas. Até o momento são poucas as bibliografias que tratam deste assunto. Cops [1], em 1985, realizou testes de absorção sonora de *baffles* planos e cilíndricos em laboratório. Segundo o autor, *baffles* de mesmo tipo funcionam melhor como absorvedores quando suspensos verticalmente, ao invés de suspensos horizontalmente. A espessura do material acústico utilizado, o modo de instalação (vertical/horizontal) e a quantidade de material por área são parâmetros que exercem grande influência nos resultados de absorção sonora.

## 1.2 - Objetivo

O objetivo dessa pesquisa é avaliar o comportamento acústico de *baffles* a serem empregados como dispositivo de controle de ruído em ambientes fechados. Com este fim, foram estudados os parâmetros que regulam o desempenho de materiais acústicos utilizados em elementos absorventes tipo *baffles*.

Afim de otimizar a absorção sonora de um material de baixo custo, foram estudadas como variáveis o número de elementos por unidade de superfície, as dimensões e a forma de instalação dos elementos absorventes.

## 1.3 - Desenvolvimento da Pesquisa

Esta pesquisa foi realizada em duas etapas. Primeiramente foram realizados ensaios experimentais na câmara reverberante do Laboratório de Ensaios Acústicos do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial -INMETRO/Xerém/RJ e posteriormente foi iniciada uma modelagem teórica utilizando o software RAYNOISE.

### 1.3.1 - Ensaios experimentais

Nesta etapa foi avaliado o comportamento acústico dos elementos absorventes tipo *baffles*. Esta investigação foi realizada através de medições de absorção sonora em câmara reverberante, onde foram afixados *baffles* de material absorvente - SONEX - em diversas configurações.

Os ensaios experimentais foram realizados em um laboratório de referência nacional, o que permite um elevado grau de exatidão dos ensaios. As medições obedeceram a um alto rigor metrológico, permitindo o estudo aprofundado do método de medição e consequente precisão dos resultados obtidos. Um dos objetivos do teste foi investigar a influência de espaçamento de ar entre as placas acústicas penduradas, assim como a influência de uma placa de madeira atuando em conjunto com esses absorvedores acústicos.

### 1.3.2 - Modelagem teórica

A modelagem numérica em software através de raios acústicos é um processo que permite, devido à facilidade de entrada de dados e obtenção de resultados, a realização de várias simulações, beneficiando a análise dos diversos parâmetros a serem investigados.

A investigação foi realizada utilizando-se o software RAYNOISE, desenvolvido pela Numerical Integration Technologies - NIT/Belgium. Trata-se de um programa de computador que fornece a distribuição espacial e temporal de energia em uma sala.

Os ambientes são modelados através de uma série de planos adjacentes. Materiais de revestimento podem ser adotados nestes planos, já que o programa contém uma biblioteca de materiais representados por seus coeficientes de absorção. Ao usuário é facultado inserir os dados a ele necessários. Além disto, permite a especificação dos planos que tenham potencial de obstruir o som, a exemplo dos efeitos de sombreamento.

O programa é capaz de prever o tempo de reverberação baseado na área de superfície do modelo, volume e materiais de revestimento especificados. É também possível obter o desempenho acústico de qualquer superfície em termos de uma variedade de parâmetros, incluindo níveis sonoros estatísticos, diretos e refletidos, em qualquer banda de oitava [2].



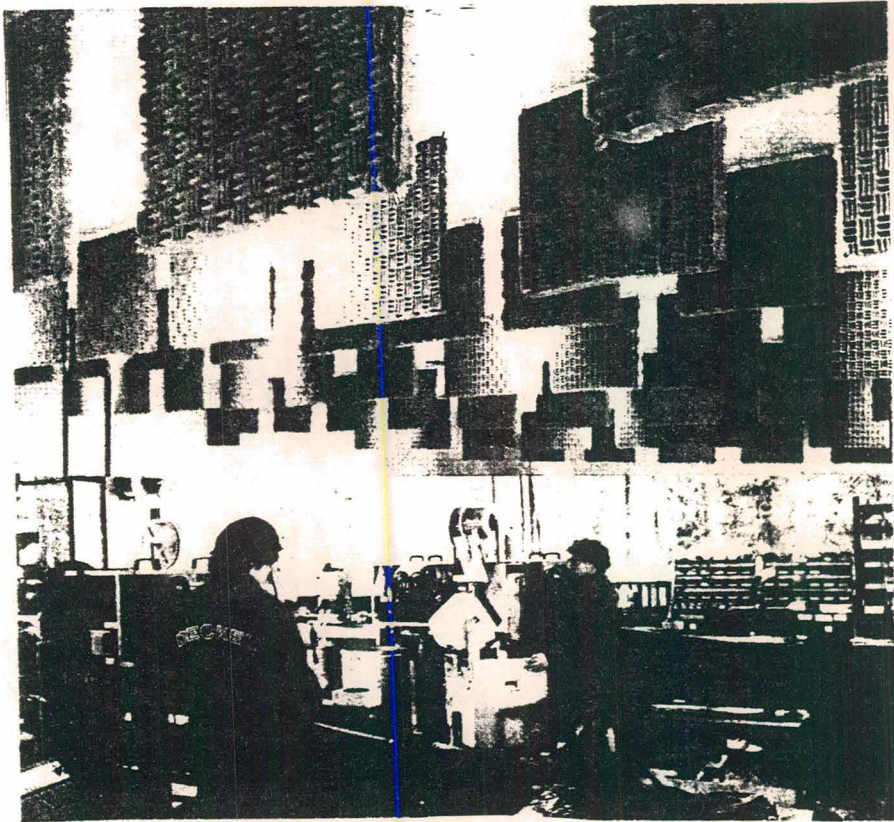


FIGURA 1.1 - Exemplo típico de aplicação de *baffles* em um ambiente industrial

## **CAPÍTULO 2**

### **ABSORÇÃO SONORA EM AMBIENTES FECHADOS**

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão dos conceitos básicos de acústica de salas. São abordados, principalmente, o comportamento de materiais acústicos e sua utilização em recintos fechados.

#### **2.1 - A Natureza dos Campos Sonoros**

Quando uma fonte sonora é colocada em operação em um recinto fechado, após sucessivas reflexões da onda sonora nas superfícies deste ambiente, é alcançado o que se convencionou chamar de regime permanente do campo sonoro.

Os fenômenos que mais interessam para um projeto de um recinto acusticamente satisfatório são: a reflexão, a absorção, a difração e a transmissão do som [3]. Estes ocorrem de maneiras diversas, dependendo da forma, das dimensões e da construção do ambiente. Na figura 2.1 são apresentados, de forma esquemática, os fenômenos acústicos em um recinto.

A energia que é transmitida através de uma parede ou outra obstrução cria um novo campo sonoro nos dois ambientes. O som que incide sobre a parede faz com que esta vibre e se torne uma nova fonte de som, irradiando para ambos os lados.

A energia sonora que é refletida de uma parede ou outra obstrução é função do ângulo de incidência da onda sonora, do comprimento de onda, do formato e do tipo da superfície. Nas frequências mais altas, onde o comprimento de onda é pequeno, é possível fazer uma analogia com a óptica geométrica para se entender melhor os fenômenos de reflexão, como apresentada na Figura 2.2.

Toda a energia sonora absorvida é resultante da conversão da energia acústica em outra forma de energia, podendo ocorrer de maneiras diferentes [3]. A adição de absorção em um ambiente melhora suas características acústicas internas tais como, redução de reverberação e aumento da inteligibilidade, que são fatores ligados à qualidade do som e sua distribuição em salas [4].

De uma forma resumida, pode-se dizer que em uma sala há dois campos acústicos: o campo direto e o campo reverberante. A região imediatamente vizinha à fonte sonora é conhecida como campo próximo. A região conhecida como campo afastado é caracterizada pelo decaimento de 6 dB no nível de pressão sonora a cada vez que é dobrada a distância entre o receptor e a fonte.

Se a fonte estiver irradiando numa sala, as reflexões da onda sonora nas superfícies criam um campo reverberante. Toda e qualquer adição de materiais de absorção acústica atenuará, unicamente, as ondas sonoras deste campo. A Figura 2.3 apresenta, de forma esquemática, o comportamento da onda sonora no interior de uma sala.

## 2.2 - Absorção Sonora

### 2.2.1 - Coeficiente de absorção sonora

W. C. Sabine introduziu na ciência de acústica de salas o conceito de Coeficiente de Absorção Sonora,  $\alpha$ , denominado a razão entre a energia sonora absorvida e a energia sonora incidente [5]. Por vezes, pode ser mais conveniente pensar em termos de complementariedade, com o coeficiente de reflexão,  $\rho$ , definido como a razão entre a energia sonora refletida e a energia sonora incidente. De acordo com suas definições, considerando que não existe outro mecanismo de perda de energia,  $\alpha$  e  $\rho$  são relacionados por:  $\alpha + \rho = 1$ .

É importante notar que o coeficiente de absorção não é definido da mesma forma em todos os campos da física. Muitas vezes, descreve as perdas de energia ocorridas durante a propagação no meio. Quando isto ocorre, implica em que uma parte da energia sonora é transformada em energia térmica ou calor; na engenharia mecânica este processo é chamado dissipação.

Como o ar não é um meio perfeitamente elástico, durante suas sucessivas compressões e rarefações ocorrem vários processos irreversíveis de absorção sonora [6]. A absorção do som no ar é afetada significativamente pela presença de impurezas e a atenuação varia em função da frequência e umidade [7]. O coeficiente de absorção do ar aumenta com a frequência, portanto, deve-se considerar o efeito de absorção do ar em grandes espaços, para frequências acima de aproximadamente 2 kHz [8].

A característica de absorção acústica de um material é determinada pelo coeficiente de absorção sonoro,  $\alpha$ , definido pela razão entre a energia acústica absorvida,  $W_a$ , e a energia acústica incidente,  $W_i$  [9]. A Figura 2.4 representa o processo de absorção do som.

O valor de  $\alpha$  é sempre positivo, variando de 0 a 1 ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ). Depende, principalmente, da frequência, ângulo de incidência do som, tipo de campo sonoro (difuso, ondas planas, etc.), densidade, espessura e estrutura interna do material [9]. Desse modo, o coeficiente de absorção sonora 1.0 indica que toda a energia incidente foi absorvida, enquanto um coeficiente de 0.3

indica que apenas 30% da energia incidente foi absorvida e, por definição, 70% refletida. Uma curva típica de um bom material absorvente de som é apresentada na Figura 2.5 [10].

### 2.2.2 - Coeficiente de redução sonora

O coeficiente de redução sonora (CRS) é um indicador na forma de um único número que quantifica as características de absorção dos materiais. O objetivo deste é simplificar a comparação entre materiais. É obtido através da média aritmética dos coeficientes de absorção sonora nas frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz [9]:

$$CRS = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.1)$$

O CRS é um índice de eficiência de absorção sonora. Entretanto, deve-se ter cautela quando selecionando um produto em função de seu CRS. Por exemplo, o CRS não inclui a frequência de 125 Hz, que pode ser um importante fator quando se faz necessária absorção em baixas frequências. Também, pelo fato de ser um número médio, dois materiais podem apresentar o CRS parecido, possuindo, porém, diferentes características de absorção em bandas de frequências.

### 2.2.3 - Comportamento dos materiais de absorção

A absorção sonora pode ocorrer devido à fricção na superfície, à ressonância em alguma cavidade próxima à superfície, ressonâncias em cavidades localizadas atrás de superfícies perfuradas ou, no caso de painéis leves, fricção causada pela flexão do painel quando exposto à vibração.

Os materiais de alta absorção acústica são normalmente porosos e/ou fibrosos [9]. Nos materiais porosos a energia acústica incidente entra pelos poros e dissipa-se por reflexões múltiplas e atrito viscoso, transformando-se em energia térmica; nos materiais fibrosos a energia acústica incidente

entra pelos interstícios das fibras, fazendo-as vibrar junto com o ar, dissipando-se assim por transformação em energia térmica por atrito entre as fibras excitadas [9] (Fig. 2.6). A quantidade de som absorvida é determinada pelas propriedades físicas do material: espessura, densidade, porosidade e orientação das fibras. Na Figura 2.7 [11], observa-se que a espessura e densidade representam um efeito significativo nos absorventes porosos. A absorção sonora varia, consideravelmente, em função da frequência; em geral, materiais porosos absorvem, preferencialmente, nas médias e altas frequências, enquanto que, painéis leves absorvem, por ressonância, principalmente nas baixas frequências [12].

Os materiais de absorção são necessários, na prática, principalmente nos seguintes casos:

- (a) diminuição do tempo de reverberação;
- (b) eliminação de ecos;
- (c) melhorar as condições acústicas de escritórios ruidosos, indústrias e similares;
- (d) redução de nível sonoro em dutos de ar com o auxílio de um adequado revestimento [13].

Um especialista em acústica que necessita encontrar um material apropriado para determinada situação, deve considerar uma série de características do material: custo, coeficiente de absorção em função da frequência, espessura, facilidade de instalação, aspecto estético, limpeza, manutenção, vida útil e etc.

Normalmente, este especialista encontra a sua disposição o coeficiente de absorção sonoro de materiais acústicos mensurados segundo dois diferentes métodos: medição em tubo de impedância - onde o material é testado pra incidência sonora normal à sua superfície - e medição em câmara reverberante (Fig. 2.8) - onde a absorção sonora é medida para incidência sonora aleatória.

É importante ressaltar que o coeficiente de absorção sonoro medido em câmara reverberante é mais confiável do que o medido em tubo de impedância, já que o primeiro simula uma situação real.

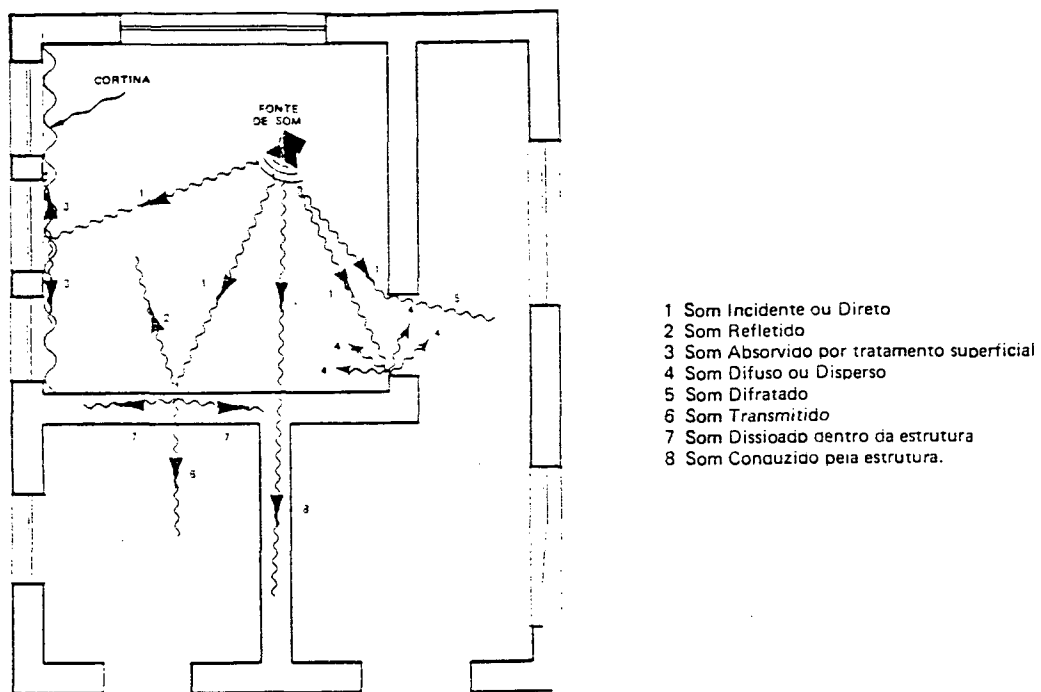


FIGURA 2.1 - Os fenômenos acústicos em um recinto

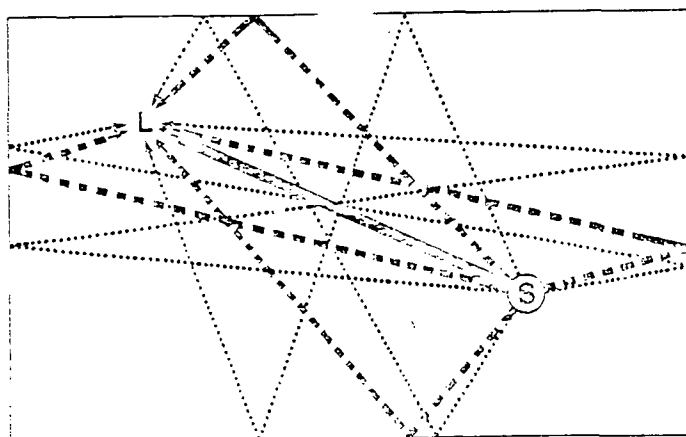


FIGURA 2.2 - Reflexão sonora

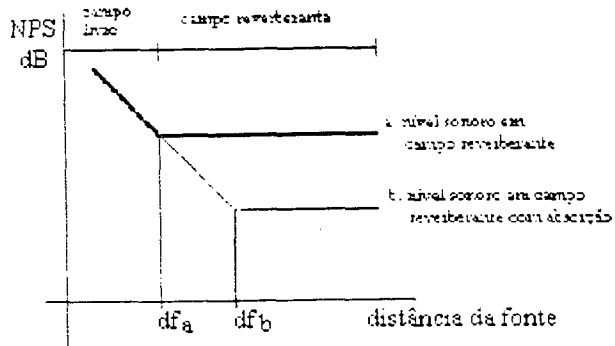


FIGURA 2.3 - Decaimento sonoro em recintos em campo reverberante

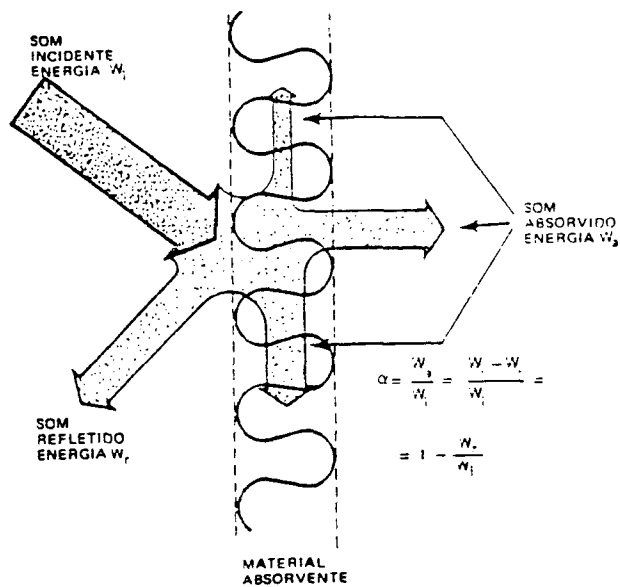


FIGURA 2.4 - Absorção do som



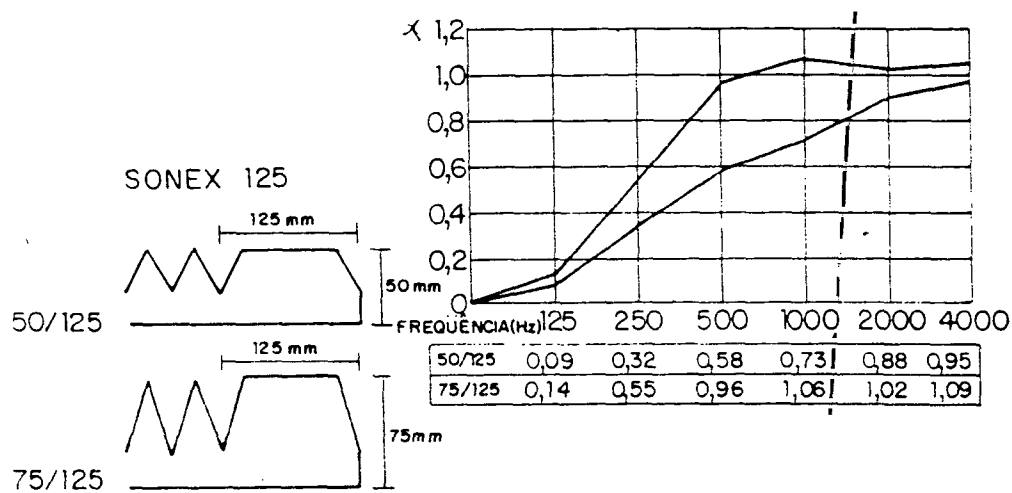


FIGURA 2.5 - Curva típica de um material absorvente [10]

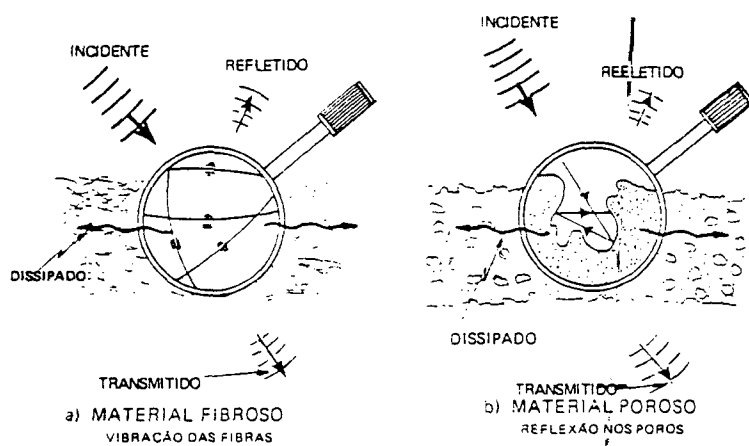


FIGURA 2.6 - Os processos de absorção do som nos materiais

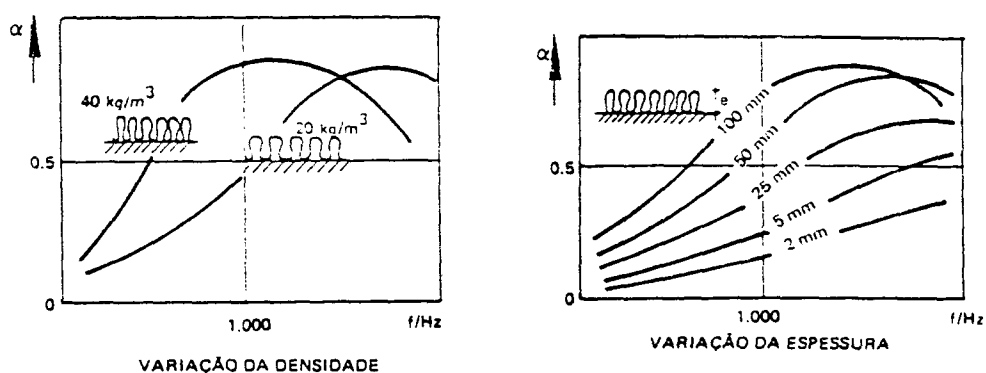


FIGURA 2.7 - Fatores que influenciam a absorção sonora dos materiais [11]

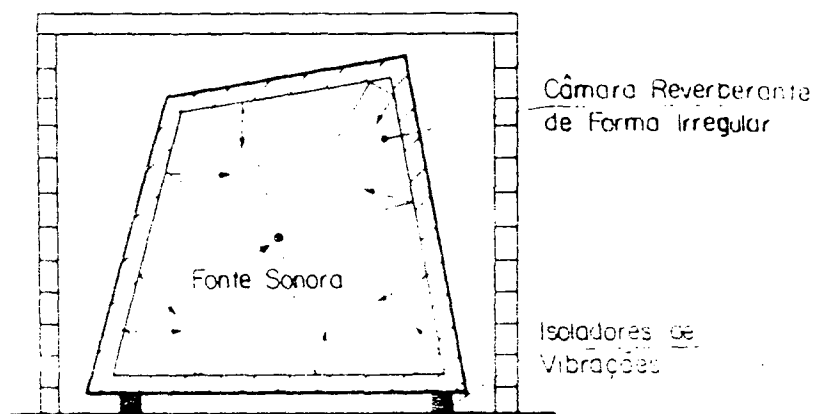


FIGURA 2.8 - Uma típica sala de teste reverberante

## **CAPÍTULO 3**

### **MEDIÇÃO DE ABSORÇÃO SONORA EM CÂMARA REVERBERANTE - O MÉTODO E SUAS INCERTEZAS**

O objetivo deste capítulo é aprofundar o entendimento do método de medição de absorção sonora em câmara reverberante. Inicialmente é apresentado um resumo da norma ISO/R354 [14], que foi utilizada como referência para a realização dos ensaios realizados na etapa experimental da pesquisa. Em seguida, é apresentado um estudo dos parâmetros que contribuem para as incertezas do método de medição de absorção sonora em câmara reverberante.

#### **3.1 - Introdução**

A absorção sonora de um material é calculada a partir de valores obtidos na medição de tempo de reverberação. Este cálculo que se utiliza da fórmula de Sabine [15] e de Eyring [16], envolve a diferença dos inversos do tempo de reverberação medidos na câmara reverberante vazia e com a amostra de teste incluída.

Um estudo estatístico da precisão do método de medição de tempo de reverberação se faz necessário, já que este é dependente da característica do campo difuso durante o decaimento sonoro e da capacidade da instrumentação em uso [17]. O fato de não existir uma norma específica a respeito de medição de absorção sonora de baffles, reforça a necessidade de estudo dos parâmetros que podem caracterizar a dispersão dos resultados obtidos.

A caracterização da qualidade de um resultado de medição, isto é, a avaliação e expressão de sua incerteza, é necessária para determinar sua confiança [17]. Sem uma indicação a respeito da qualidade destes resultados, os mesmos não podem ser comparados nem entre eles próprios, nem com valores de referência de uma especificação ou norma.

Este estudo foi realizado aplicando-se métodos estatísticos para uma série de ensaios, caracterizando a dispersão dos valores atribuídos à medição de tempo de reverberação. A idéia é demonstrar a importância do controle dos fatores que podem ocasionar variação nos resultados de tempo de reverberação, de maneira a reduzir a incerteza no cálculo do coeficiente de absorção sonora.

### **3.2 - Norma ISO 354 - Medição de Coeficiente de Absorção Sonora em Câmara Reverberante [14]**

Esta norma especifica o método de medição do coeficiente de absorção sonora de materiais acústicos utilizados no tratamento de paredes e forros, além da área de absorção sonora equivalente de objetos, tais como mobiliários e pessoas.

As medições sob condições reverberantes são necessárias, pois, desta forma, os efeitos das montagens práticas podem ser incluídas. Além de ser, também, a única maneira de determinar a absorção sonora de objetos discretos tais como cadeiras, divisórias e etc.

O propósito desta norma é promover a uniformidade nos métodos e condições de medição, de modo a que haja concordância entre os valores determinados em diferentes laboratórios. É importante citar que esta norma, no momento, se encontra em processo de revisão.

#### **3.2.1 - Definições**

a) Tempo de reverberação: O tempo requerido para que o nível de pressão sonora decaia em 60 dB após a fonte sonora ter cessado. A quantidade é denotada por T e expressa em segundos [14].

b) Área de absorção sonora equivalente de uma sala: A área hipotética de uma superfície totalmente absorvente sem efeitos de difração a qual, se fosse o único elemento absorvente na sala, proporcionaria o mesmo tempo de reverberação da sala considerada [14].

c) Área de absorção sonora equivalente da amostra de teste: A diferença entre a área de absorção sonora equivalente da sala reverberante com e sem amostra de teste [14].

d) Coeficiente de absorção sonora: A mudança na área de absorção sonora equivalente após a colocação da amostra de teste na sala reverberante, dividida pela área da amostra de teste [14].

### 3.2.2 - Princípio geral

O princípio geral que fundamenta esta medição, é que a amostra introduzida na sala irá gerar uma absorção que será computada nas medições de tempo de reverberação da sala antes, e depois, da colocação da amostra na câmara. Através destes tempos de reverberação é calculada a área de absorção sonora equivalente  $A$ , da amostra de teste.

No caso de uma amostra de teste plana, o coeficiente de absorção sonora é obtido dividindo-se  $A$  pela sua superfície de área  $S$ . Quando a amostra de teste consiste em alguns objetos idênticos, a área de absorção sonora equivalente do objeto em si é obtida dividindo-se  $A$  pelo número de objetos.

### 3.2.3 - Quantidade a ser medida

De acordo com Sabine, o tempo de reverberação,  $T$ , da sala, é definido como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora dentro da sala diminua em 60 dB. Então:

$$T = \frac{0,161V}{A} \quad (3.1)$$

onde:

$V$  é o volume da câmara em  $m^3$

$A$  é a absorção total em  $m^2$

A Figura 3.1 [18] demonstra o crescimento e o decaimento do nível de pressão sonora com o tempo.

Manipulando-se convenientemente a equação acima e multiplicando-se os termos inferiores e superiores pela velocidade do som no ar, obtemos:

$$A = \frac{55,3V}{cT} \quad (3.2)$$

onde:

$c$  é a velocidade do som no ar, em metros por segundos

O modelo de campo difuso dentro da câmara reverberante garante uma densidade de energia sonora uniforme [19]. Neste modelo, a área de absorção sonora equivalente da amostra da sala,  $A_e$ , conforme definição no item 3.2.1, é obtida segundo:

$$A_e = A_1 - A_2 \quad (3.3)$$

onde:

$A_1$  é a área de absorção sonora equivalente da câmara vazia

$A_2$  é a área de absorção sonora equivalente da câmara contendo a amostra de teste

$A_1$  deve ser calculado usando a fórmula:

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} \quad (3.4)$$

onde:

$T_1$  é o tempo de reverberação da câmara reverberante vazia

$A_2$  deve ser calculado por:

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} \quad (3.5)$$

onde:

$T_2$  é o tempo de reverberação da câmara reverberante contendo a amostra de teste

Então, substituindo-se as equações 3.4 e 3.5 na equação 3.3, obtém-se a equação para determinação do coeficiente de absorção sonoro do material aplicado,  $\alpha$ :

$$\alpha = 55,3 \frac{V}{cS} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (3.6)$$

onde:

$S$  é a área da amostra de teste

### 3.2.4 - Procedimento de medição e arranjo de teste

Para a realização destas medições é necessária uma câmara reverberante dentro das especificações quanto ao tempo de reverberação (quando vazia), tamanho e forma. Segundo a Norma ISO 354 [14], o volume da câmara deve estar na faixa de 200 m<sup>3</sup>. Na Tabela 3.1 encontram-se as áreas de absorção sonora equivalente máximas para uma câmara com volume igual a 200 m<sup>3</sup>.

A forma da câmara deve ser tal que a seguinte condição seja satisfeita:

$$l_{\max} < 1,9 V^{1/3} \quad (3.7)$$

onde:

$l_{\max}$  é o comprimento da maior linha reta entre os limites da sala

$V$  é o volume da sala

De maneira a se alcançar uma distribuição uniforme das frequências naturais, especialmente em bandas de frequências baixas, duas dimensões da câmara não devem ser iguais ou na razão de números inteiros pequenos.

O tempo de reverberação é medido do seguinte modo:

Uma amostra de teste retangular, com 10 a 12 m<sup>2</sup> de área é montada no interior da câmara reverberante. A câmara deve ser excitada por fontes sonoras, e o campo sonoro produzido deve ser o mais difuso possível. O sinal elétrico do gerador pode consistir em um ruído branco ou rosa.

Uma vez que o campo sonoro atinja um estado de regime permanente, a fonte sonora é interrompida abruptamente e o decaimento do nível de pressão sonora é monitorado por um sistema de recepção, constituído de um microfone, filtro de 1/3 de oitava, amplificador de medição, e sistema de registro. A cadeia de medição é detalhadamente explicada no Capítulo 4.

As medições devem ser realizadas em pelo menos seis bandas de oitava, de 125 Hz a 4000 Hz. Para cada banda de interesse, devem ser determinados, no mínimo, seis tempos de reverberação, com microfones e autofalantes em diferentes posições .

Através das medições descritas acima, pode ser avaliado o aumento na área de absorção equivalente,  $A$ , produzido pela introdução da amostra na câmara. O coeficiente de absorção da amostra é calculado pela eq. 3.6.

Os resultados devem conter o coeficiente de absorção da amostra sobre teste, para cada banda de frequência, na forma de curva ou tabela.



### 3.3 - Incerteza na Medição de Tempo de Reverberação em Câmara Reverberante

O conceito de incerteza como um atributo de quantificação é relativamente novo na história da metrologia, embora o erro ou análise de erro faça parte, a bastante tempo, da prática metrológica.

Atualmente, é amplamente reconhecido que, embora todos os componentes de erro, conhecidos ou suspeitos, sejam avaliados e a devida correção aplicada, ainda assim permanece uma incerteza sobre a acuidade do resultado emitido. Isto é, permanece uma dúvida sobre o quanto o resultado da medição é representativo, de fato, do valor da quantidade medida. [20]

De acordo com o guia internacional que trata deste tema [20], incerteza de medição é um parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores que são atribuídos à medição. A quantidade utilizada para expressá-la deve ser diretamente derivada dos componentes que contribuem para esta dispersão.

A incerteza de um resultado de medição pode ser representada na forma de desvio padrão amostral, calculado pela seguinte fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2} \quad (3.8)$$

onde:

$\alpha_i$  é o resultado da medição  $i$

$\bar{\alpha}$  é a média aritmética do conjunto de  $n$  medições:  $\alpha_1 \dots \alpha_i \dots \alpha_n$

$n$  é o número de testes efetuados

### 3.3.1 - Fatores de influência na medição de tempo de reverberação

Apesar do desenvolvimento técnico dos instrumentos de medição levarem a uma variação pequena entre repetidas medições, a precisão com a qual o coeficiente de absorção sonora é determinado em uma câmara reverberante não é tão satisfatória. Como mencionado anteriormente, a própria norma está sendo modificada para minimizar as variações entre diferentes medições em um mesmo laboratório e entre diferentes laboratórios.

É possível obter diferentes resultados devido, em sua maior parte, às variações estatísticas de diferentes parâmetros:

O acoplamento da fonte sonora e do microfone de medição com a câmara reverberante é um parâmetro muito importante a ser considerado. Principalmente nas baixas frequências onde a densidade modal não é muito elevada [21].

Como a cada modo acústico está associado uma onda plana com direção específica, o decaimento de som na câmara reverberante é função da absorção das superfícies nestas direções. Por exemplo, quando se está excitando 3 modos acústicos e a fonte é desligada para a medição de tempo de reverberação, cada uma dessas ondas associadas às suas frequências naturais irá decair conforme o amortecimento acústico da superfície naquela direção, podendo, desta forma, gerar uma curva de decaimento com variações às quais podem dificultar o traçado da reta como especificado na norma.

A Figura 3.2 mostra duas medições típicas para as frequências de 100 Hz e 10 kHz. É possível, comparando-se as duas curvas, notar as diferenças no decaimento e a dificuldade em se traçar a reta. A instalação das fontes sonoras nos cantos da câmara, onde um grande número de modos exibem pressão sonora máxima, pode ser uma medida que minimiza esse efeito [22].

Uma quase imperceptível variação na temperatura e umidade do ar pode causar erros significativos quando determinando o coeficiente de absorção sonora [23]. É recomendado ao operador controlar a mudança desses parâmetros durante a medição, embora a Norma ISO 354[14] forneça uma relação para correção dessas variações.

Para se ter uma idéia da extensão da influência da variação do tempo de reverberação na determinação do coeficiente de absorção sonora, é preciso atentar ao fato de que o valor de absorção sonora é determinado pela diferença do inverso de dois tempos de reverberação,  $T_1$  e  $T_2$  (eq. 3.6). Isto causa um erro relativo maior do que quando determinando somente o tempo de reverberação.

Com um erro relativo de 3 % - considerado aceitável em um procedimento normal de medição de tempo de reverberação -, o erro relativo no coeficiente de absorção pode chegar a 9 % [24]. Além disto, há uma recomendação para que a diferença entre o tempo de reverberação da câmara vazia e da câmara contendo a amostra seja suficientemente grande, ainda que não esteja especificado o quanto.

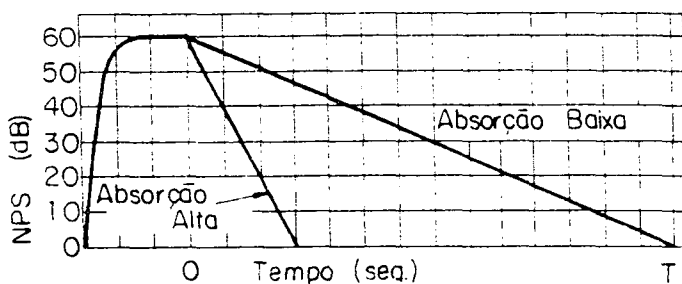


FIGURA 3.1 - Crescimento e decaimento do nível de pressão sonora

Área de absorção sonora equivalente, m <sup>2</sup>	6,5	6,5	6,5	7,0	9,5	13,0
Frequência, Hz	125	250	500	1000	2000	4000

TABELA 3.1 - Área de absorção sonora equivalente máximas para volume de sala V=200m<sup>3</sup>

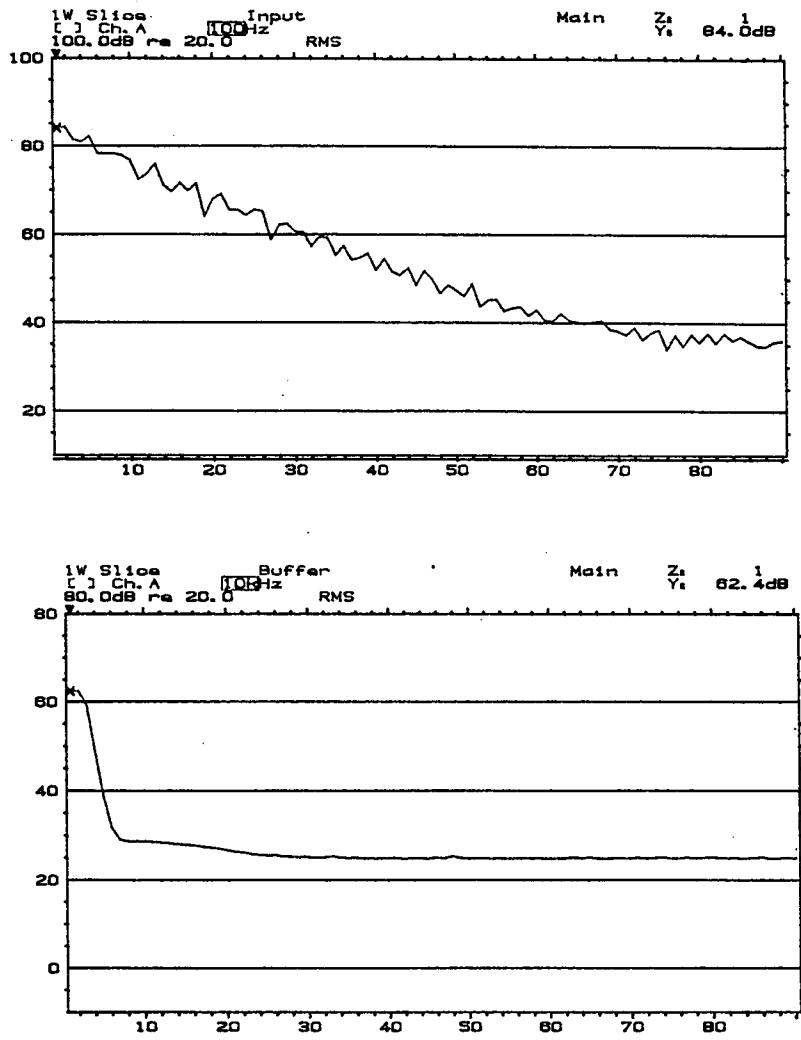


FIGURA 3.2 - Medição de tempo de reverberação para as frequências de 100 Hz e 10 kHz

## **CAPÍTULO 4**

### **CONTROLE ESTATÍSTICO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO ADOTADO**

O propósito deste capítulo é apresentar o grau de confiança que pode ser esperado no processo de medição de tempo de reverberação e os mecanismos de controle do sistema de medição adotado nesta pesquisa. Foram realizadas várias séries de ensaios experimentais com o objetivo de investigar diversos parâmetros inerentes ao sistema de medição adotado.

#### **4.1 - Introdução**

A precisão da medição de tempo de reverberação é amplamente dependente da característica do campo difuso durante o decaimento sonoro e da capacidade da instrumentação em uso (ver Capítulo 3).

O desenvolvimento cada vez maior de analisadores de frequência em tempo real tende à minimizar os desvios decorrentes da análise do sinal captado. No entanto, como a medição de absorção sonora de *baffles* não é normalizada e, ainda, sua instalação na câmara reverberante impede a utilização dos mecanismos tradicionais para melhorar a difusão sonora (difusores estáticos e rotativos), todo o cuidado deve ser tomado com o objetivo de garantir um grau elevado de confiança nos resultados obtidos.

## 4.2 - Procedimento Experimental

### 4.2.1 - Esquema de montagem dos equipamentos

Na Figura 4.1 é apresentado o esquema de montagem dos equipamentos:

- 1) Câmara Reverberante , LAENA/INMETRO
- 2) Analisador de Frequências, tipo 2133, B&K
- 3) Multiplexer, tipo 2811, B&K
- 4) Amplificador, tipo 2706, B&K
- 5) Microfones de 1/2", tipo 4166, B&K
- 6) Caixa acústica

### 4.2.2 - Características da câmara reverberante

Sala composta por paredes não paralelas, de concreto pintado com "epox". A estrutura metálica utilizada para sustentação dos baffles foi considerada parte integrante da câmara para efeito de medição do tempo de reverberação da câmara vazia.

$$\text{Volume} = 211,0 \text{ m}^3$$

$$\text{Área} = 211,0 \text{ m}^2$$

### 4.2.3 - Geração do campo sonoro

Para excitação da câmara reverberante, um ruído rosa foi utilizado como alimentação do sistema amplificador/caixa acústica. O sinal de excitação da câmara foi suficientemente longo antes de ser desligado, propiciando um nível de pressão sonora de regime permanente adequado. É importante ressaltar que o nível do sinal de excitação antes do decaimento foi verificado, estando acima do nível do ruído de fundo conforme determinado pela Norma ISO354 [14]. As medições foram realizadas nas frequências centrais da série de bandas de 1/3 de oitava.

### 4.2.4 - Equipamento de recepção

O sinal gerado na câmara reverberante, foi captado por microfones de 1/2" para uso em campo difuso, instalados a uma distância de 1 metro das paredes da câmara e 2 metros da fonte sonora, conforme recomendações da norma ISO354 [14]. Somente um microfone foi utilizado de cada vez.

## 4.3 - Parâmetros Investigados e Análise dos Resultados

Foram investigados os seguintes itens:

- Intervalo de tempo para o cálculo do decaimento sonoro;
- Estudo do *set up* do Analisador de Frequências para o cálculo de tempo de reverberação;
- Investigação do desvio padrão dos resultados de tempo de reverberação.

Para cada parâmetro investigado foram utilizados arranjos de teste variando em alguns aspectos, como especificados em seguida:



### 4.3.1 - Verificação da incerteza na medição de tempo de reverberação

Foram realizadas medições de tempo de reverberação da câmara reverberante vazia, nas instalações do LAENA/INMETRO, conforme a norma ISO354 [14]. Foram efetuados 5 ensaios: cada um com duas posições da fonte sonora, 3 posições de microfone, 2 decaimentos por microfone. Em cada teste foram medidos 12 decaimentos por banda de frequência.

Na Figura 4.2, pode-se observar que um incremento no número de decaimentos medidos para cada banda de frequência em um mesmo teste, em geral, não altera a precisão dos resultados de tempo de reverberação obtidos. Já na Figura 4.3, é possível notar que um mesmo microfone apresenta um desvio padrão bem reduzido em relação à diferentes testes.

O desvio padrão entre diferentes microfones apresenta diferenças significativas, principalmente nas frequências abaixo de 160 Hz. Nas frequências acima de 2 KHz, a diferença se apresenta bastante reduzida, como demonstrado na Figura 4.4.

Conforme a Figura 4.5, o tempo de reverberação médio entre vários testes não se altera com diferentes posições da fonte sonora. Somente nas frequências abaixo de 160 Hz é notada uma pequena diferença entre resultados de teste de tempo de reverberação.

### 4.3.2 - Estudo do *set up* do Analisador de Frequências

Foram realizadas medições de tempo de reverberação com três diferentes *set ups* no Analisador de Frequências (*set up A*; *set up B*; *set up C*). Foi utilizado somente um microfone e uma posição da fonte nos testes.

Observando o *set up A*, nota-se que foi utilizada o tipo de média linear (*Average: Linear*), conforme sugestão do manual de instruções do equipamento. O número de espectros a serem obtidos para possibilitar a avaliação do decaimento sonoro (*Input: Multi 90 Rate: T*) multiplicado pela taxa do *Trigger* ( $T = 209.015 \text{ ms}$ ), fornece o tempo total da avaliação. É importante notar,

que este intervalo de tempo deve ser inferior ao tempo que o gerador fica desativado (*Off: 19.856s*); o gerador fica ativado durante 10.033 s (*On: 10.033 s*). As medições são realizadas nas bandas de frequência de 1/3 de oitava, no intervalo de 100 Hz a 10 kHz (*Bandwidth: 1/3 oct. 100 Hz 10 kHz*).

O Analisador de Frequências, neste caso, vai capturar 90 amostras (correspondendo a 90 curvas de decaimento de nível de pressão sonora), cada qual com a duração de 209.015 ms. No *set up* geral do equipamento especifica-se a partir de quantos dB após a fonte sonora ter sido interrompida será iniciada a captura das amostras e qual será sua duração (p. ex. especifica-se que o equipamento iniciará a captura das amostras 5 dB após a fonte ser interrompida e este processo terá a duração equivalente ao decaimento de 20 dB). Então, o equipamento, através do cálculo de uma média linear entre estas amostras nesta faixa de 20 dB, fornecerá um decaimento de nível de pressão sonora para cada banda de frequência especificada.

É importante notar que, no *set up* geral do decaimento, também é especificado o mínimo de amostras necessárias para o cálculo da média linear. Isto serve para especificar a precisão dos resultados de tempo de reverberação em altas frequências, já que o rápido decaimento, muitas vezes, impede a captura de qualquer amostra (o número mínimo de amostras para o cálculo do decaimento é 2).

1) Estudo do set up A

O *set up* utilizado no Analisador de Frequência foi:

```

IW   Ch.A  Auto Spectrum
Bandwidth   : 1/3 oct.           100Hz 10kHz
Averaging   : Lin.             T: 209.015ms
Start on    : Generator        Delay: 0s
Input       : Multi 90 Rate: T           Man. Re-start
Buffer      : Empty
Ch. A       : Direct 300mV + 22.4HzLin.  1.00V/V
Generator   : Burst -5.0dB Pink random  On: 10.033s Off: 19.856s
    
```

Neste teste, observa-se que o tempo de reverberação na frequência de 125 Hz está fora do limite de confiabilidade de 95% (linha sublinhada no eixo horizontal na Fig. 4.6). A Figura 4.7

representa, para esta mesma frequência de 125 Hz, o detalhe do decaimento sonoro: nota-se uma grande variação entre os espectros assinalados, dificultando o cálculo realizado pelo equipamento (regressão linear). Na Figura 4.8, observa-se que, apesar da grande velocidade do decaimento sonoro em altas frequências, o número de espectros no intervalo de cálculo do decaimento (20 dB) foi suficiente para o cálculo do tempo de reverberação.

Em um outro ensaio, novamente os resultados de tempo de reverberação se encontram no limite de confiabilidade (Fig. 4.9). O decaimento sonoro para a frequência de 125 Hz se apresenta suave (Fig. 4.10).

Chega-se a conclusão que a medição de tempo de reverberação é bastante sensível, havendo necessidade de conciliar o tempo de média do Analisador de Frequências tanto para as baixas, quanto para as altas frequências. É necessário, também, uma grande quantidade de decaimentos para redução do desvio padrão.

## 2) Estudo do set up B

O set up utilizado no Analisador de Frequência foi:

```

IW   Ch.A  Auto Spectrum
Bandwidth  : 1/3 oct.           100Hz 10kHz
Averaging  : Lin.             T: 1/2 s
Start on   : Generator        Delay: 0s
Input      : Multi 90 Rate: T           Man. Re-start
Buffer     : Empty
Ch. A      : Direct 300mV + 22.4Hz Lin. 1.00V/V
Generator  : Burst -5.0dB Pink random On: 10.000s Off: 50.000s

```

Com um tempo de *trigger* maior (  $T: 1/2s$  ), observa-se, na Figura 4.11, que o equipamento sequer calculou o tempo de reverberação para as frequências de 8 kHz e 10 kHz. A Figura 4.12, relativa ao decaimento sonoro em 10 kHz, demonstra que não houve número de espectros suficientes no intervalo especificado no set up principal do Analisador de Frequências, para avaliação do decaimento - no mínimo 2 espectros num intervalo de 20 dB após a fonte ser desligada. Entretanto, de maneira inversa, nas baixas frequências o decaimento se apresenta bastante satisfatório (Fig. 4.13).

### 3) Estudo do set up C

O set up utilizado no Analisador de Frequência foi:

```

IW   Ch.A  Auto Spectrum
Bandwidth : 1/3 oct.           100Hz 5kHz
Averaging : Lin.           T: 299.988ms
Start on  : Generator      Delay: -299.988ms
Input     : Multi 50      Rate: T           Man. Re-start
Buffer    : Empty
Ch. A     : Direct 300mV + 22.4Hz Lin.     1.00V/V
Generator : Burst -5.0dB Pink random On: 9.900s Off: 29.999s
    
```

Conforme representado na Figura 4.14, no intervalo de frequências de 100 a 5 kHz, todos os resultados de tempo de reverberação se encontram dentro do limite de confiança de 95% quando utilizando o tempo de *trigger* de 300 ms.

#### 4.3.3 - Investigação do desvio padrão - Parte I

Nesta etapa, foi utilizado 1 microfone e uma posição da fonte sonora. Esta etapa se divide em 3 ensaios efetuados de maneira idêntica: em cada um foram medidos, separadamente, 5 tempos de reverberação e, ainda, um outro utilizando o *buffer* do Analisador de frequências para fornecer o resultado entre a média de 5 medidas. O objetivo foi verificar a precisão das medições realizadas utilizando-se o *buffer*.

O set up utilizado no Analisador de Frequência foi:

```

IW   Ch.A  Auto Spectrum
Bandwidth : 1/3 oct.           100Hz 10kHz
Averaging : Lin.           T: 1/8 s
Start on  : Generator      Delay: -250.000 ms
Input     : Multi 150     Rate: T           Man. Re-start
Buffer    : Empty
Ch. A     : Direct 600mV + 22.4Hz Lin.     1.00V/V
Generator : Burst 0dB Pink random On: 6.000 s Off: 20.000 s
    
```

### 1) Ensaio 1

De acordo com a Figura 4.15, representando os desvios padrão do primeiro ensaio, observa-se que:

- a) Acima da frequência de 315 Hz, o desvio padrão entre os 6 resultados de tempo de reverberação (5 resultados individuais e 1 resultado utilizando o *buffer*) é bastante reduzido, variando entre 0,04 em 10 kHz e 0,63 em 315 Hz.
- b) Na faixa de frequências de 100 Hz a 250 Hz, o desvio padrão apresenta valores extremos de 0,48 em 200 Hz e 2,15 em 125 Hz.
- c) Os desvios padrões dos ensaios de tempo de reverberação obtidos utilizando o *buffer* do Analisador de Frequências para efetuar a média entre 5 medições, apresentam a mesma tendência dos resultantes das 5 medições individuais.

### 2) Ensaio 2

Observando-se a Figura 4.16, relativa aos desvios padrões do segundo ensaio, nota-se a mesma tendência do ensaio anterior:

- a) Nas frequências acima de 400 Hz, o desvio padrão varia entre o valor mínimo de 0,02 em 10kHz e o valor máximo de 0,54 em 500 Hz.
- b) Nas frequências de 100 Hz a 315 Hz, o desvio padrão varia entre o valor mínimo de 0,8 em 250Hz e o valor máximo de 2,6 em 160 Hz.

### 3) Ensaio 3

Este terceiro ensaio confirma a tendência dos ensaios anteriores, conforme demonstrado na Figura 4.17:

a) Nas frequências acima de 315 Hz, o desvio padrão é reduzido. O valor máximo é 0,58 em 315 Hz e o valor mínimo é 0,03 em 10 kHz.

b) Nas frequências de 100 Hz a 250 Hz, o valor máximo de desvio padrão é 2,24 em 125 Hz e o valor mínimo é 0,99 em 250 Hz.

#### 4.3.4 - Investigação do desvio padrão - Parte II

Foram utilizados 3 microfones e duas distintas posições da fonte sonora. Para cada um destas 6 combinações microfone/fonte, foram realizadas 10 medições de tempo de reverberação distintas, e uma outra utilizando o *buffer* do Analisador de Frequência para fornecer o resultado de tempo de reverberação médio entre 10 medições

O *set up* utilizado foi o seguinte:

```

IW   Ch.A  Auto Spectrum
Bandwidth  : 1/3 oct.           100Hz 10kHz
Averaging  : Lin.             T: 209.991ms
Start on   : Generator        Delay: -419.983ms
Input      : Multi 90 Rate: T           Auto
Buffer     : Avg Multi 10
Ch. A     : Direct 300mV + 22.4Hz Lin.  1.00V/V
Generator  : Burst -5.0dB Pink random On: 10.080s Off: 19.949s

```

Observando-se as Figuras 4.18 - 4.23, relativas, cada qual, a uma combinação fonte/microfone, percebe-se que, mesmo dobrando o número de medições em relação ao item 4.4.3 e mesmo utilizando maior quantidade de microfones e fonte sonora, os desvios padrões calculados não se alteraram de maneira significativa. A tendência dos valores obtidos se manteve a mesma: desvios padrão maiores para as baixas frequências e reduzidos nas altas frequências.

#### 4.4 - Comentários

Nas baixas frequências, a pressão sonora apresenta, durante o decaimento, oscilações na amplitude, dificultando, desta forma, a obtenção de uma linha contínua nos decaimentos medidos. Uma forma de minimizar este efeito é aumentar o tempo de integração na captura do espectro durante o decaimento.

É sabido que nas altas frequências o tempo de reverberação é reduzido. Desta forma, é necessário um número suficiente de espectros na curva de decaimento, de maneira que o Analisador de Frequências processe os cálculos necessários com o mínimo de espectros requeridos dentro do intervalo de decaimento sonoro estabelecido para o cálculo do tempo de reverberação após a interrupção da fonte sonora.

Entretanto, o número grande de espectros acarreta problemas no cálculo do tempo de reverberação para as baixas frequências: o fato da curva de decaimento não ser suave impede que o equipamento realize os cálculos com a confiabilidade requerida. O tempo de cálculo de cada espectro, deve, então, ser suficientemente longo de modo a suavizar a curva de decaimento.

Os desvios padrões entre os resultados de tempo de reverberação se apresentam significativos nas frequências abaixo de 315 Hz e reduzidos nas altas frequências.

A precisão das medições não melhora significativamente com o aumento do número de testes. O uso do *buffer* do Analisador de Frequências para fornecer a média entre testes se mostrou totalmente confiável. Portanto, o uso do *buffer* do equipamento programado para fornecer a média entre 5 testes é suficiente para garantir um nível de confiança dos ensaios de aproximadamente 5% de erro.

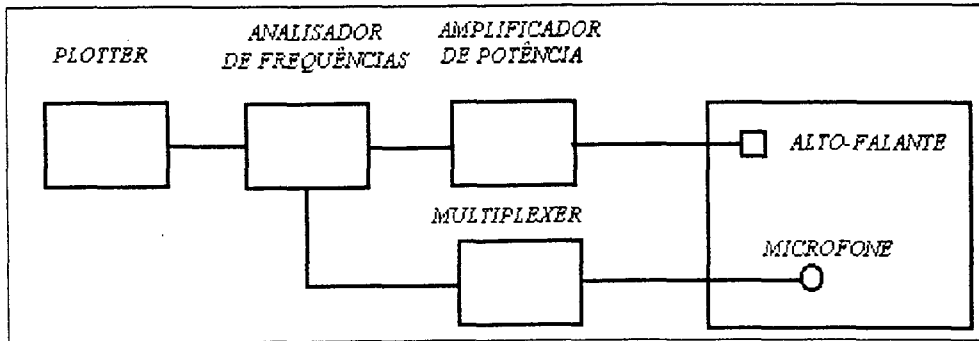


FIGURA 4.1 - Esquema de montagem dos equipamentos de teste

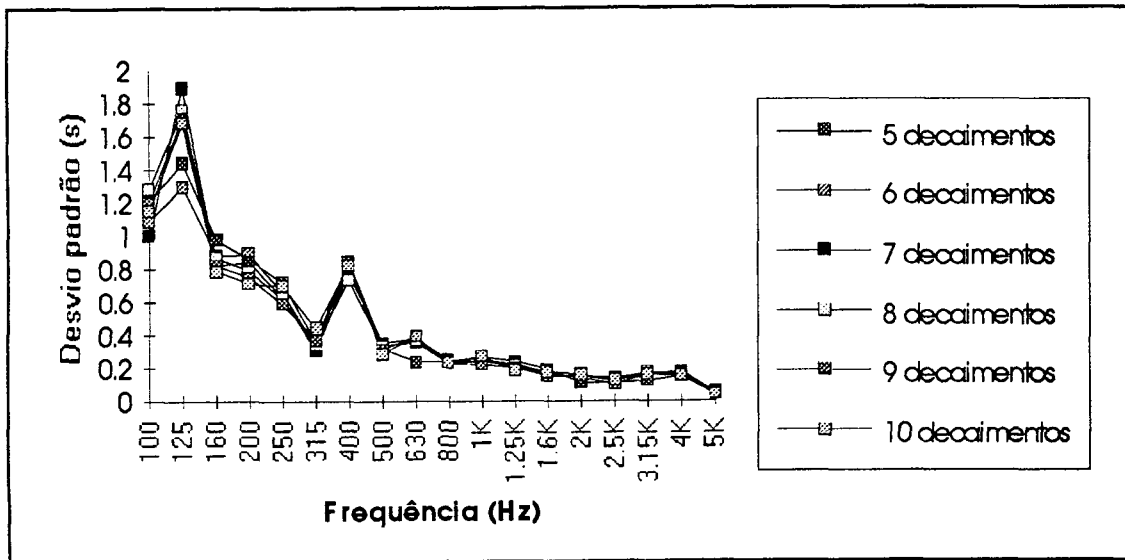


FIGURA 4.2 - Influência do número de decaimentos na precisão dos resultados de tempo de reverberação



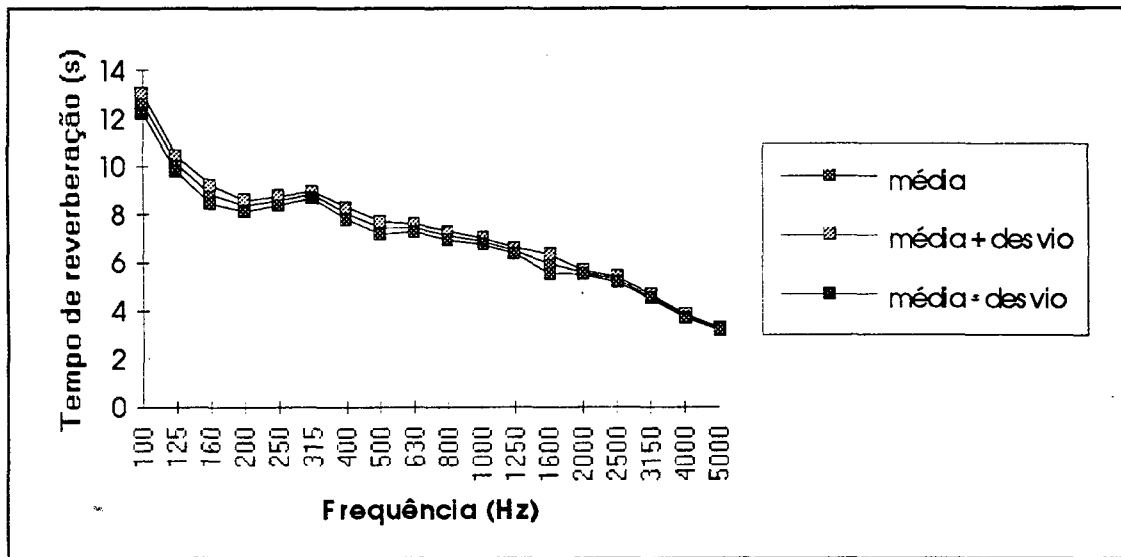


FIGURA 4.3 - Desvio padrão em relação à média entre 5 ensaios de tempo de reverberação -  
microfone 1 / fonte 1

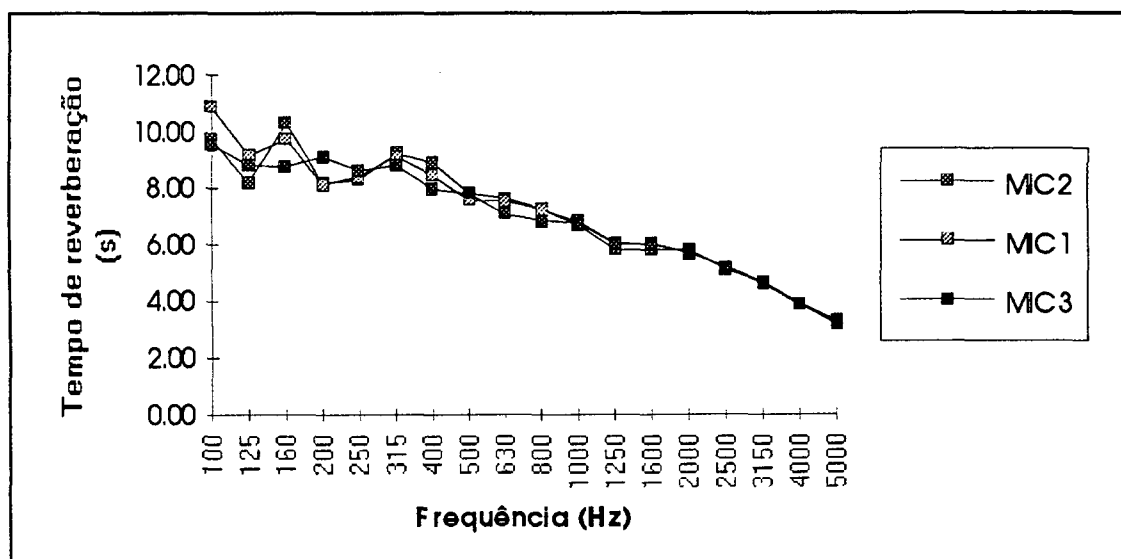


FIGURA 4.4 - Tempo de reverberação -  
microfones 1, 2, 3 / fonte 1

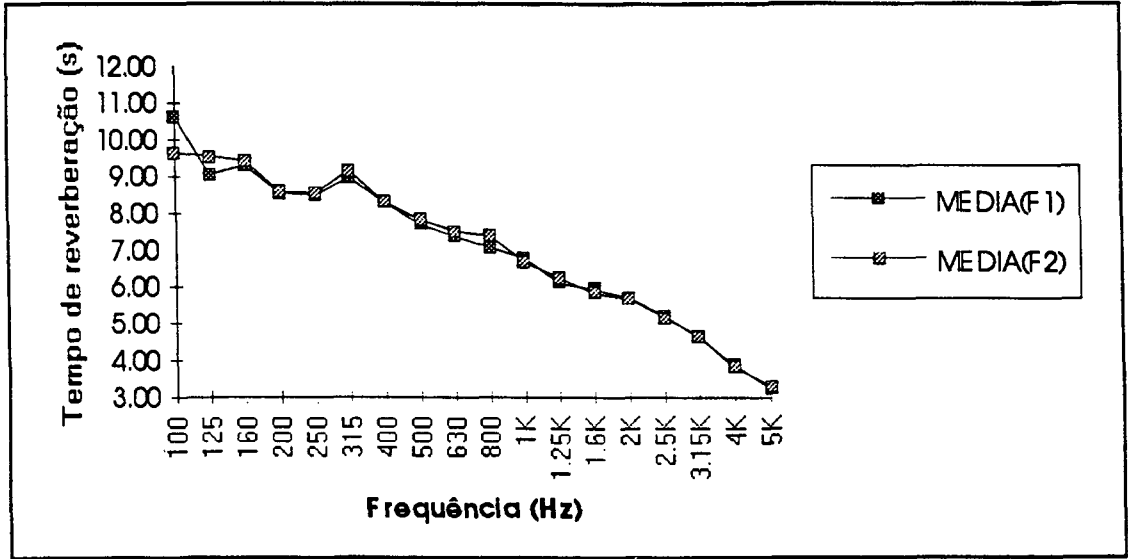


FIGURA 4.5 - Tempo de reverberação na posição de fonte 1 (F1) e na posição de fonte 2 (F2)

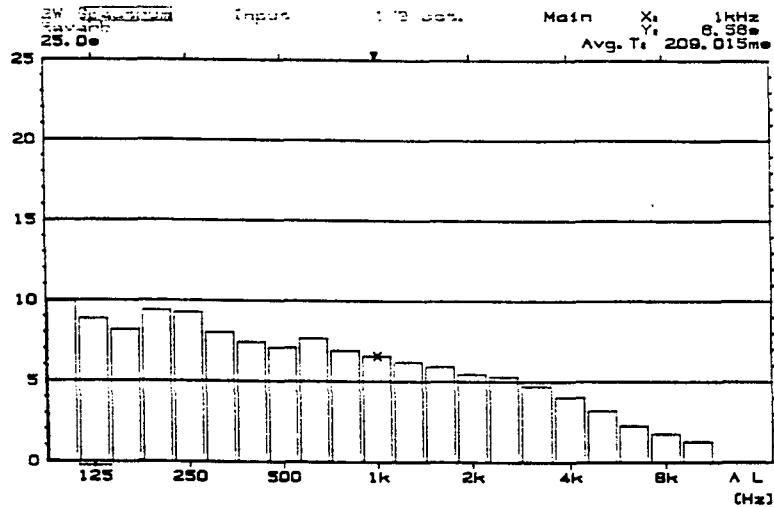


FIGURA 4.6 - Tempo de reverberação utilizando o set up A - ensaio 1

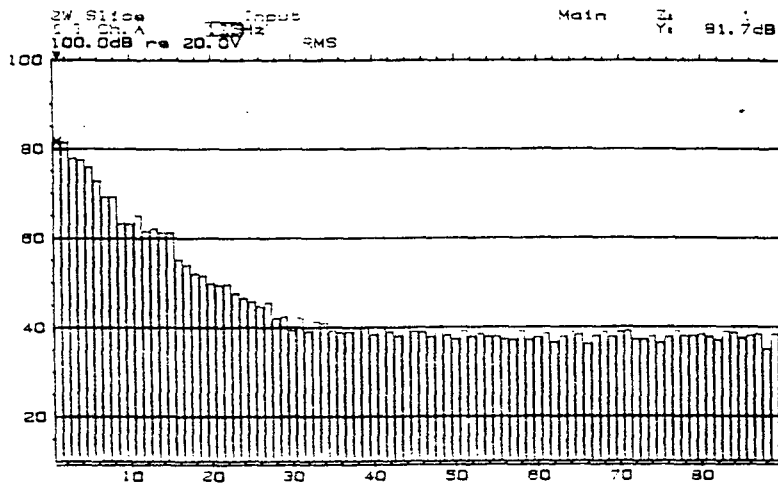


FIGURA 4.7 - Decaimento sonoro na frequência de 125 Hz - set up A/ensaio 1

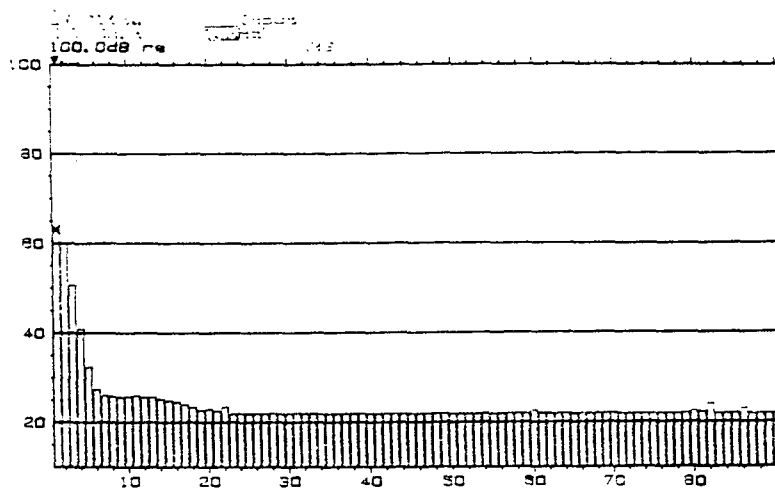


FIGURA 4.8 - Decaimento sonoro na frequência de 10 kHz - set up A/ensaio 1

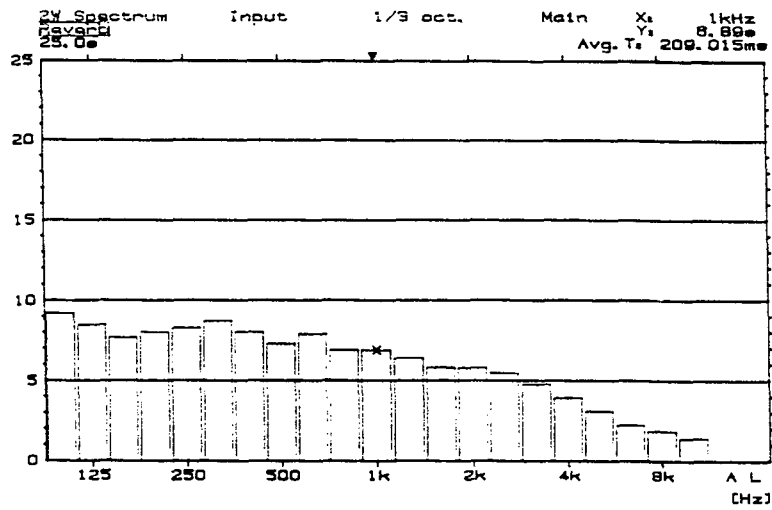


FIGURA 4.9 - Tempo de reverberação utilizando o set up A - ensaio 2

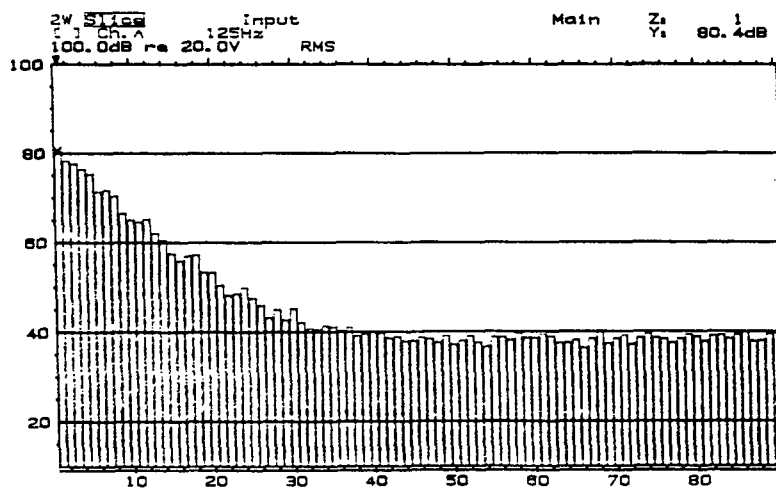


FIGURA 4.10 - Decaimento sonoro na frequência de 125 Hz - set up A/ensaio 2

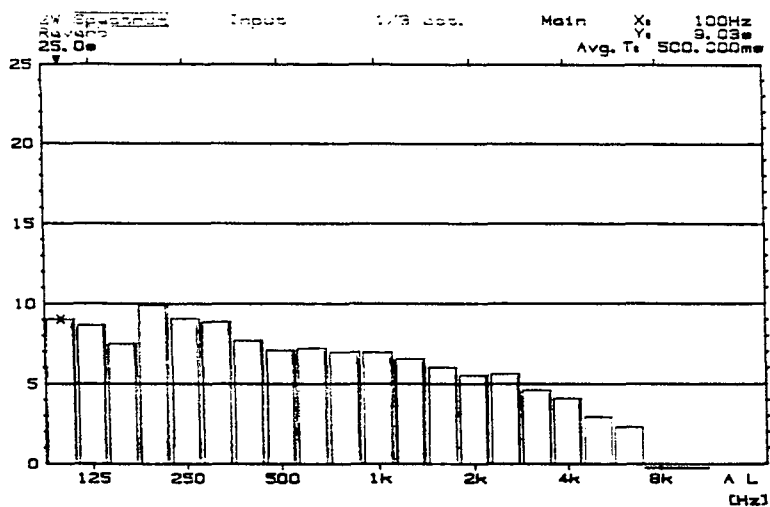


FIGURA 4.11 - Tempo de reverberação utilizando o set up B

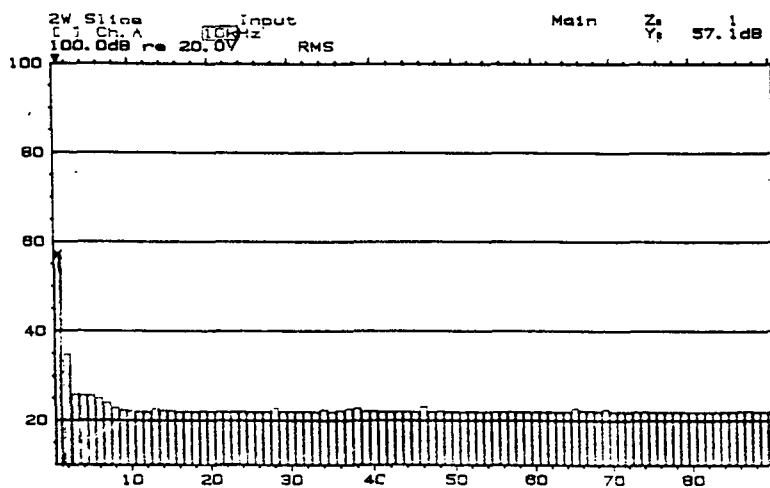


FIGURA 4.12 - Decaimento sonoro na frequência de 10 kHz - set up B

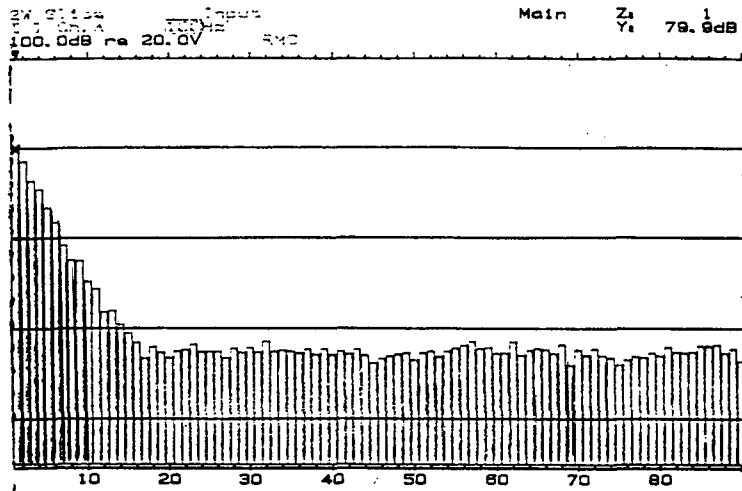


FIGURA 4.13 - Decaimento sonoro na frequência de 100 Hz - set up B

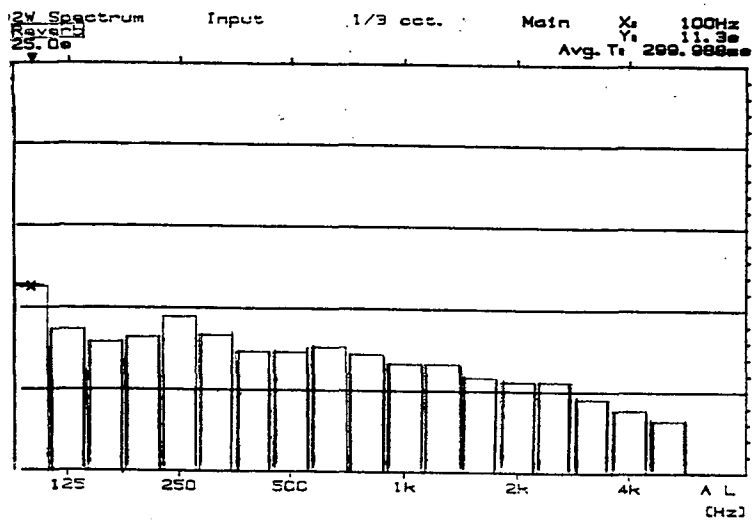


FIGURA 4.14 - Tempo de reverberação utilizando o set up C

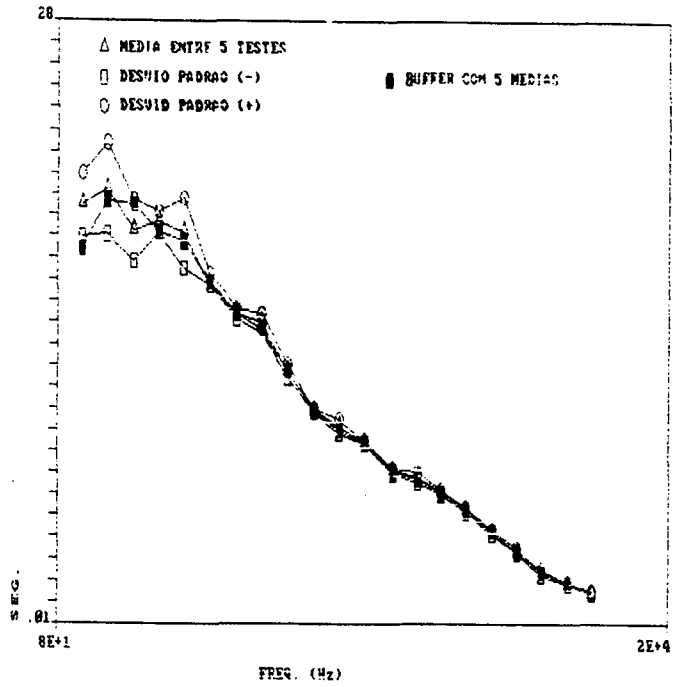


FIGURA 4.15 - Tempo de reverberação - média entre 5 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 5 testes (ensaio 1)

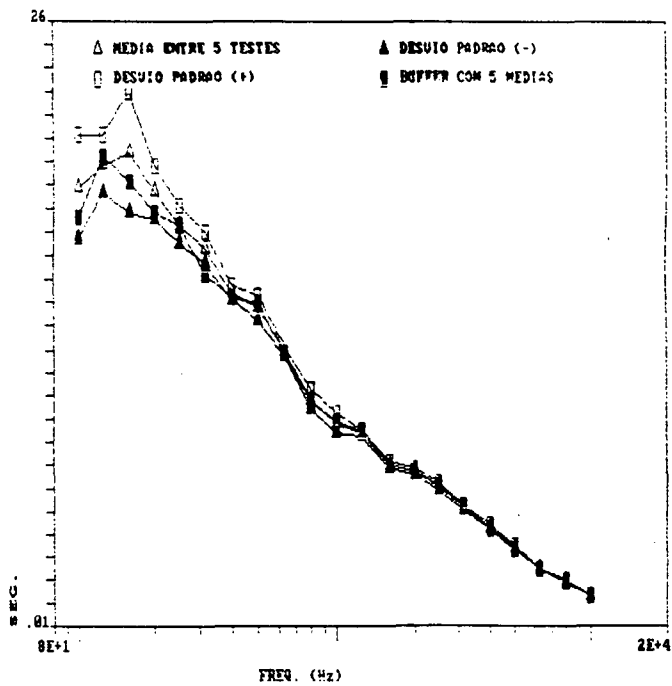


FIGURA 4.16 - Tempo de reverberação - média entre 5 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 5 testes (ensaio 2)

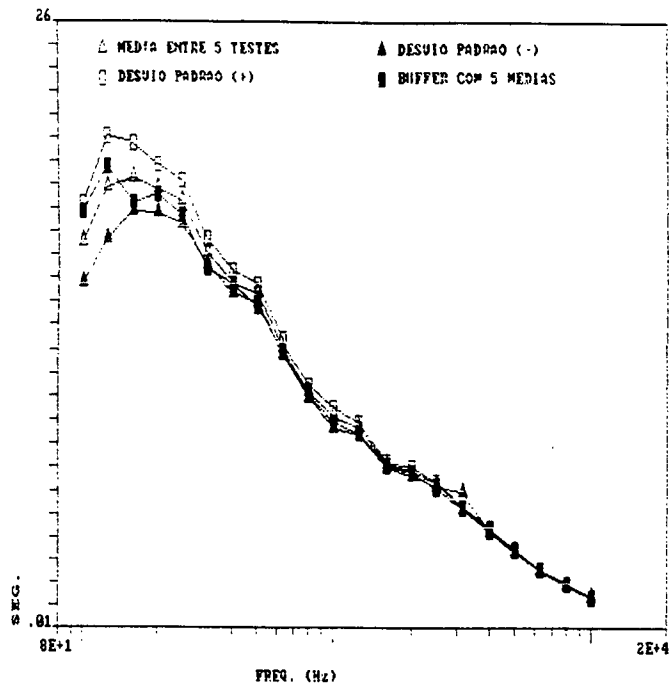


FIGURA 4.17 - Tempo de reverberação - média entre 5 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 5 testes (ensaio 3)

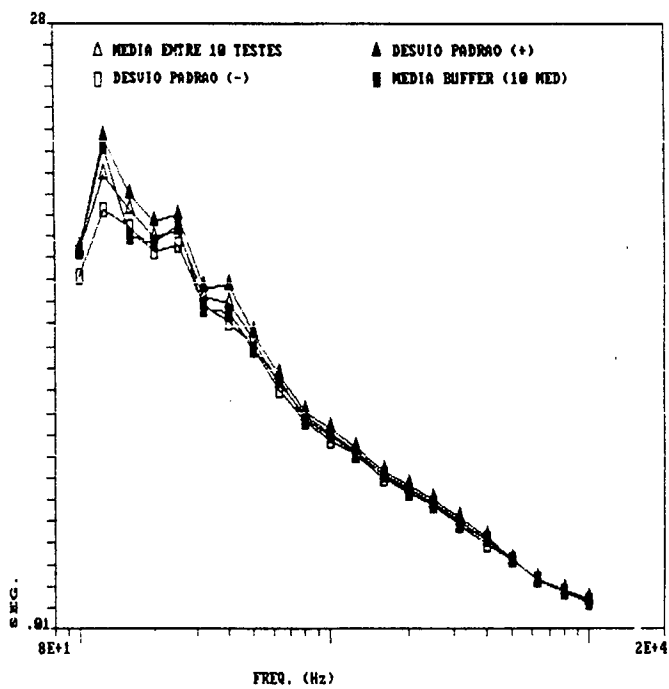


FIGURA 4.18 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 1/fonte 1)



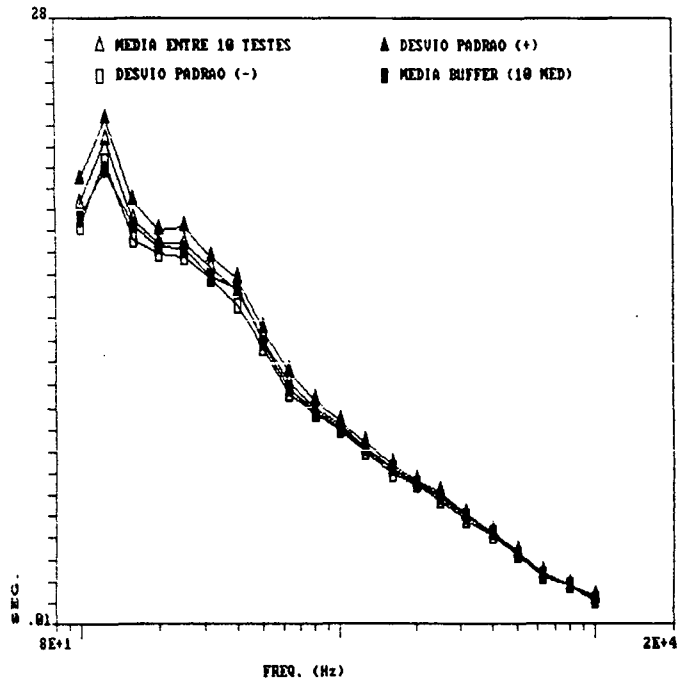


FIGURA 4.19 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 1/fonte 2)

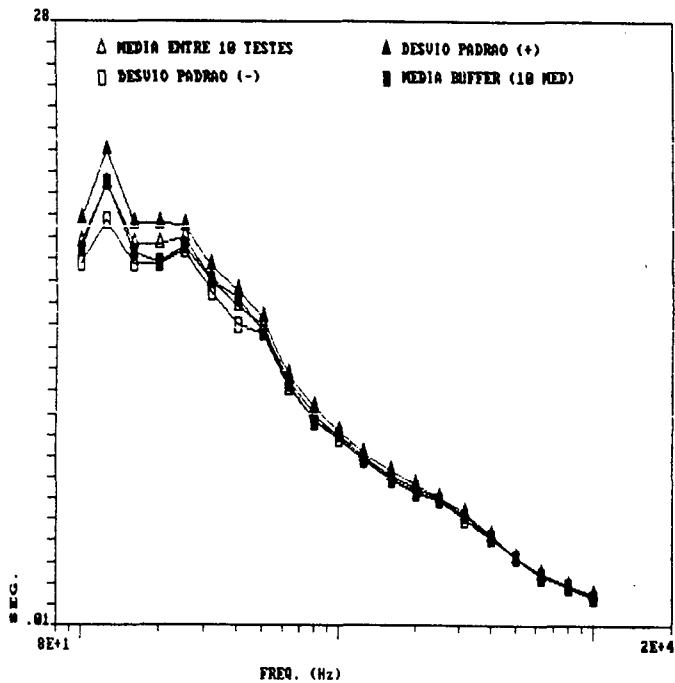


FIGURA 4.20 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 2/fonte 1)

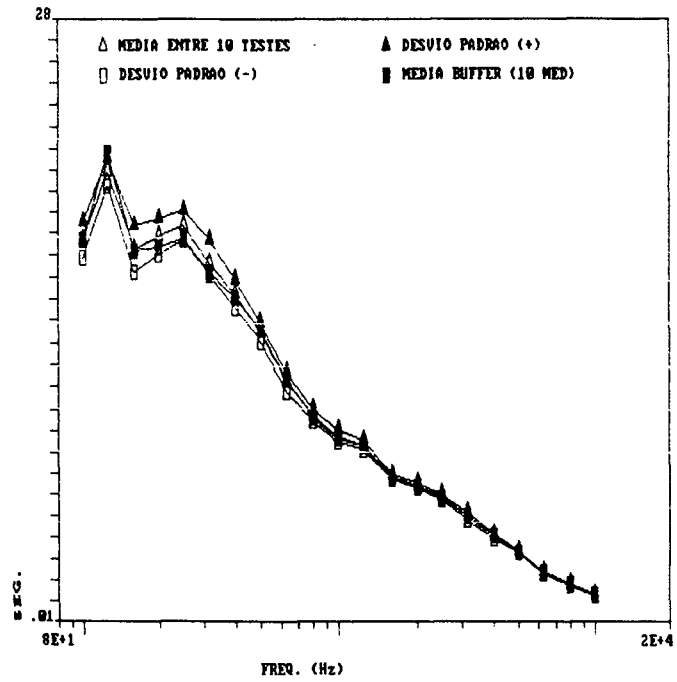


FIGURA 4.21 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 2/fonte 2)

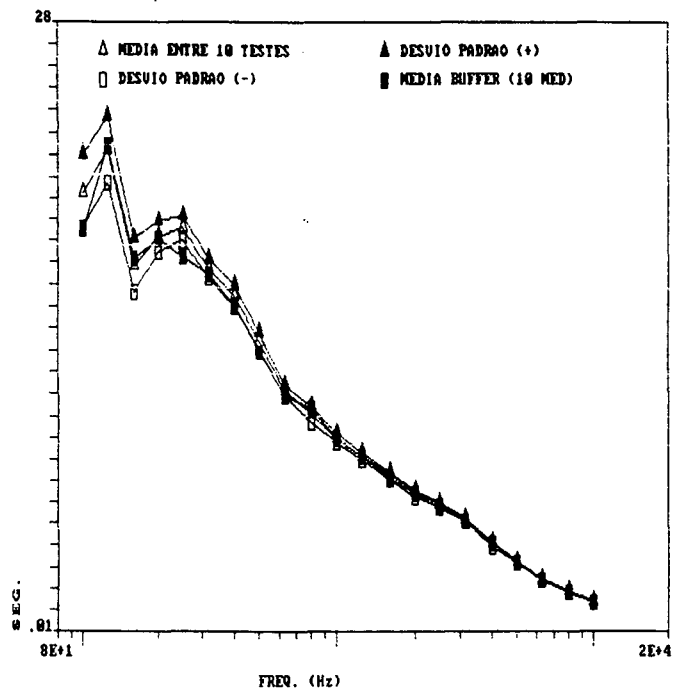


FIGURA 4.22 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 3/fonte 1)

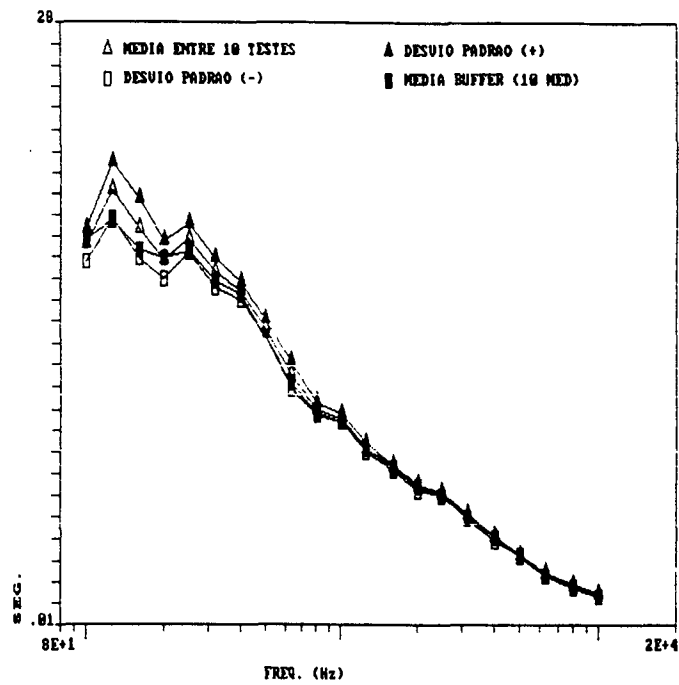


FIGURA 4.23 - Tempo de reverberação - média entre 10 testes e amplitude do desvio padrão X média efetuada pelo *buffer* entre 10 testes (mic. 3/fonte 2)

## CAPÍTULO 5

### MEDIÇÃO DE ABSORÇÃO SONORA DE BAFFLES

Nos capítulos anteriores foram estudados o método de medição de absorção sonora normalizado e as incertezas do método de medição de tempo de reverberação (Cap. 3), e ainda, o controle do método de medição adotado (Cap. 4). Uma vez estudados o método de medição, seu controle e incertezas, passamos, neste capítulo, à etapa de ensaios experimentais da pesquisa.

#### 5.1 - Introdução

Foram realizados ensaios, conforme a Norma ISO354 [14], de absorção sonora em câmara reverberante para diversas configurações de *baffles* - com e sem chapa de madeira entre os materiais de absorção SONEX ; sem espaçamento de ar entre placas; com espaçamento de ar de 30 mm, 60 mm, 75 mm e 90 mm.

O mesmo procedimento foi adotado em todos os ensaios: foram medidos 2 decaimentos para cada um dos 3 microfones utilizados. Este processo foi repetido para duas posições da fonte sonora, totalizando 12 decaimentos para cada banda de frequência.

Para cada montagem o ensaio foi integralmente repetido por 5 vezes, de forma a ser possível apresentar a precisão dos resultados de absorção sonora para cada banda de frequência. Os resultados de absorção sonora para cada montagem apresentados neste capítulo foram calculados pela média dos resultados destes cinco ensaios idênticos. Portanto, o coeficiente de absorção sonora médio de cada banda de frequência apresentado foi obtido a partir de 60 decaimentos (12 decaimentos por ensaio x 5 testes).

Os equipamentos utilizados, bem com sua montagem é a mesma utilizada nos testes referentes ao Capítulo 4.

Foram investigados os seguintes itens:

1) Coeficiente de absorção das placas acústicas

Esta medição foi realizada conforme as recomendações para medição de coberturas horizontais na Norma ISO 354 [14].

2) Absorção sonora de *baffles* pendurados aos pares

A amostra constou de painéis compostos de duas placas acústicas penduradas face a face.

3) Absorção sonora de *baffles* pendurados com espaçamento de ar

Foram utilizadas como amostras painéis compostos de duas placas acústicas com espaçamento de ar entre elas. Os espaçamentos de ar entre as placas variaram entre 30, 60, 75 e 90 mm.

4) Absorção sonora de *baffles* pendurados com uma chapa de madeira

Estas medições foram realizadas com painéis compostos de duas placas acústicas entremeadas por uma chapa de madeira, sem espaçamento de ar entre placas.

5) Absorção sonora de *baffles* pendurados com uma chapa de madeira e com espaçamento de ar

Semelhante ao item 4, porém com espaçamento de ar entre as placas acústicas.

6) Absorção sonora de um número variável de *baffles*

Foram realizados ensaios com *baffles* compostos de duas placas acústicas penduradas face a face, com o propósito de verificar o número ótimo de painéis a serem utilizados como amostra no interior da câmara reverberante.

## 5.2 - Arranjo de Teste

### 5.2.1 - Amostra de teste

#### 1) Material

Espuma flexível de poliuretano poliéster, com retardantes à chama, desenvolvida especialmente para aplicações acústicas. Especificação: SONEX 20/35 (Fig. 5.1), cor cinza grafite. Fabricante: Illbruck Industrial Ltda.

Densidade:  $32\text{Kg/m}^3$

Passagem de ar através da espuma:  $1,4\text{ pés}^3/\text{min}$  (ensaio conforme norma NBR 8517 [25])

Diferencial de pressão:  $125 \pm 1\text{ Pa}$

#### 2) Dimensões

comprimento: 900 mm

largura: 450 mm

espessura: 20 mm

#### 3) Montagem

##### (i) TESTE A - Amostra no piso da câmara

Disposição: Amostra de teste retangular montada contra o piso da câmara.

Área de Superfície:  $11,34\text{ m}^2$ .

(ii) TESTE B - Baffles pendurados no teto da câmara reverberante ( Ver esquema na Fig. 5.2)

Constituição do painel: duas placas SONEX com e sem chapa de madeira entre placas, sem espaçamento de ar e com espaçamento de ar de 30 mm, 60 mm, 75 mm e 90 mm. Cada painel foi afixado, na vertical, a uma placa de madeira com 90 x 20 x 2 mm, sustentada por uma estrutura metálica suspensa até o teto.

Dimensões da chapa de madeira: 900 x 550 mm.

Disposição: 3 fileiras de 4 pares de painéis, suspensos verticalmente, dispostos no teto da câmara. Cada par, paralelo ao par vizinho.

Área de superfície: 12,00 m<sup>2</sup>

(iii) TESTE C - Influência do espaçamento entre *baffles* pendurados no teto da câmara reverberante

Constituição do painel: Duas placas SONEX penduradas face a face, verticalmente, sem espaçamento de ar entre placas. Os painéis foram afixados como no Teste B.

Disposição: A disposição dos painéis foi similar ao Teste B, porém, a cada teste foram colocados 3 painéis adicionais no interior da câmara. Procurou-se manter a maior distância possível entre os painéis. O número de painéis no interior da câmara variou de 3 a 24 unidades.

Área de Superfície: 12,00 m<sup>2</sup>

### 5.2.2 - Procedimento de ensaio

Número de posições de microfone: 3

Número de posições da fonte sonora: 2 (localizadas nos cantos da câmara)

Número de registro por microfone: 4 (dois para cada posição da fonte)

Número de repetições de cada teste: 5

Número total de decaimentos por banda de frequência dos resultados apresentados: 60

Ruído utilizado: ruído rosa

### 5.2.3 - Set Up de medição

O *set up* utilizado nos ensaios de absorção sonora de *baffles* foi o seguinte:

<i>IW</i>	<i>Ch.A</i>	<i>Auto Spectrum</i>	
<i>Bandwidth</i>	: <i>1/3 oct.</i>		<i>100Hz 5kHz</i>
<i>Averaging</i>	: <i>Lin.</i>	<i>T: 299.988 s</i>	
<i>Start on</i>	: <i>Generator</i>	<i>Delay: 0 s</i>	
<i>Input</i>	: <i>Multi 80</i>	<i>Rate: T</i>	<i>Man. Re-start</i>
<i>Buffer</i>	: <i>Avg. Multi 6</i>		
<i>Ch. A</i>	: <i>Direct 8V + 22.4Hz Lin.</i>		<i>1.00V/V</i>
<i>Generator</i>	: <i>Burst 0dB Pink random</i>	<i>On: 6.000 s</i>	<i>Off: 15.899 s</i>



### 5.3 - Método de Cálculo

Abaixo se encontram descritos as expressões matemáticas utilizadas para cálculo dos resultados dos ensaios de absorção sonora de *baffles*.

#### 5.3.1 - Cálculo da área de absorção sonora equivalente, A

A equação utilizada para o cálculo da área de absorção sonora equivalente A (descrita no Cap. 4), conforme a Norma ISO 354 é a seguinte:

$$A = 55,3 \frac{V}{c} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (5.1)$$

onde:

A é a área de absorção sonora equivalente, em metros quadrados

V é o volume, em metros cúbicos, da câmara reverberante vazia;

T<sub>1</sub> é o tempo de reverberação, em segundos, da câmara reverberante vazia;

T<sub>2</sub> é o tempo de reverberação, em segundos, da câmara reverberante contendo a amostra de teste;

c é a velocidade do som no ar, em metros por segundos.

Nota: para temperaturas na faixa de 15 a 30°C, a velocidade do som no ar, c, pode ser calculada pela fórmula

$c = 331 + 0,6 t$  onde t é a temperatura do ar em graus Celsius.

### 5.3.2 - Cálculo da área de absorção sonora equivalente por placa acústica, $A(m^2/placa)$

$$A(m^2 / placa) = \frac{A}{N} \quad (5.2)$$

onde:

A é a área de absorção sonora equivalente, em metros quadrados

N é o número de placas SONEX no interior da câmara

### 5.3.3 - Coeficiente de redução sonora, CRS

Calculado pela média aritmética da área de absorção sonora equivalente por placa acústica nas bandas de oitava de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, conforme a equação (2.1) descrita no Capítulo 2.

#### Observação:

Para cada teste foram utilizadas as fórmulas enumeradas acima, porém com alteração de alguns parâmetros, a saber:

(i) TESTE A

Equação 5.2, N = 28 placas (distribuídas em uma área de 11,34 m<sup>2</sup>)

(ii) TESTE B

Equação 5.2, N = 48 placas (distribuídas em uma área de 12 m<sup>2</sup>)

### (iii) TESTE C

Equação 5.2, N varia ente 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 e 48 placas (distribuídas em uma área de 12 m<sup>2</sup>)

## 5.4 - Resultados Experimentais

### 5.4.1 - Estatística aplicada à metrologia

A essência da determinação dos valores de precisão é a verificação da habilidade de um determinado método de teste em se repetir dentro de uma faixa de valores esperada [21]. A incerteza da medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns desses componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições[21].

Abaixo estão representadas as técnicas estatísticas utilizadas para indicar o valor que representa melhor a precisão dos resultados de absorção sonora de *baffles* apresentados nesta pesquisa:

#### 1) Média Aritmética

A média aritmética amostral  $\bar{x}$ , é definida pela expressão:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.3)$$

onde:

$x_i$  valores individuais do conjunto

$n$  é a quantidade de valores individuais (o número de ensaios realizados para cada montagem)

## 2) Desvio padrão amostral

A avaliação de dispersão frequentemente utilizada, é o desvio padrão amostral  $S$ , que tem a mesma dimensão da média amostral. Ver equação (3.4) no Capítulo 3.

## 5.5 - Procedimento

O procedimento de ensaio adotado para este estudo estatístico foi mantido, para todos os ensaios, o mais constante possível, conforme recomendações da Norma ISO 5725 [26]: foram utilizadas a mesma instrumentação, mesma amostra de teste, mesmo operador e foram controladas a temperatura e umidade relativa do ar. Os ensaios foram realizados em um curto intervalo de tempo.

## 5.6 - Análise dos Resultados

Todos os resultados dos ensaios de *baffles* são comparados à absorção das placas acústicas ensaiadas no piso da câmara segundo a Norma ISO 354 [14]. O objetivo foi verificar o ganho com a utilização das placas acústicas instaladas como *baffles*.

Não foram constatadas grandes variações nos resultados dos ensaios das várias configurações de *baffles*. Porém, em todas as configurações, os resultados se apresentam melhores para os *baffles* principalmente para as frequências acima de 500 Hz.

Para uma análise mais detalhada, nas Figuras 5.3 - 5.7 estão representados os resultados de cada diferente montagem de *baffles* pendurados comparados com os resultados dos ensaios realizados com os mesmos contra o piso da câmara

Observa-se que, nas frequências acima de 2,0 kHz, quando testados com uma chapa de madeira, os *baffles* apresentam maior absorção quanto menor for o espaçamento de ar entre placas (Fig. 5.8). A tendência é inversa quando os *baffles* são testados sem chapa de madeira (Fig. 5.9).

Na Figura 5.10 é possível verificar a influência espaçamento entre os painéis de *baffles* pendurados no teto da câmara reverberante. Observa-se que o número ótimo de *baffles* a serem ensaiados se encontra entre 3 e 12 painéis.

No Anexo I (Fig. AI.1 - AI.11) se encontram os resultados de precisão de cada ensaio - o desvio padrão foi calculado em relação aos 5 ensaios realizados para cada montagem. Também, neste mesmo Anexo, na Tabela AI.1, é possível observar os valores da área de absorção sonora equivalente por placa acústica dos 5 ensaios efetuados para cada montagem. A média aritmética entre tais resultados, bem como os respectivos desvios padrão, encontram-se na Tabela AI.2. Os resultados da Tabela AI.3 são referentes à área de absorção sonora equivalente por placa acústica das montagens variando o número de painéis no interior da câmara e a Tabela AI.4 apresenta os coeficientes de redução sonora de cada montagem.

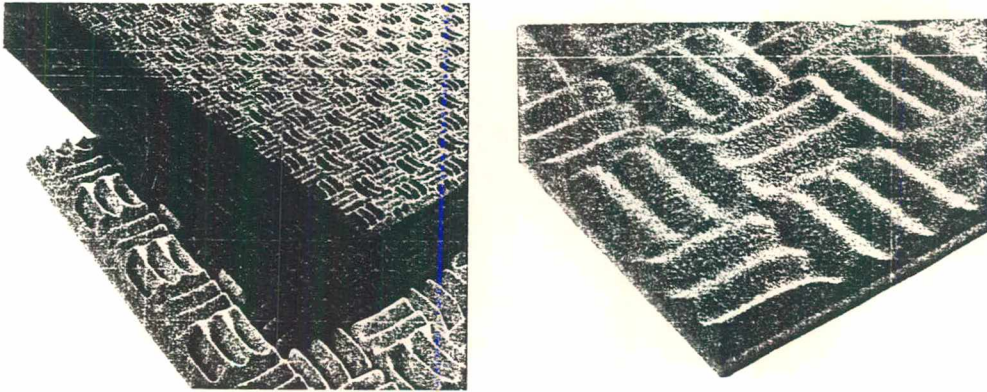


FIGURA 5.1 - Espuma SONEX

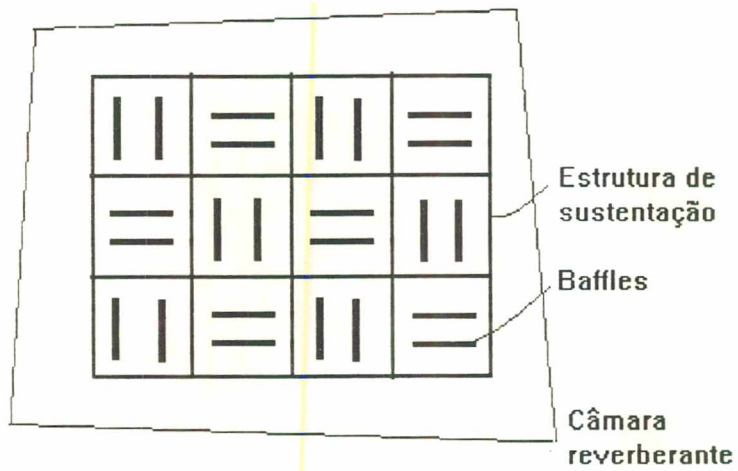


FIGURA 5.2 - Esquema de montagem dos *baffles* pendurados no teto da câmara reverberante

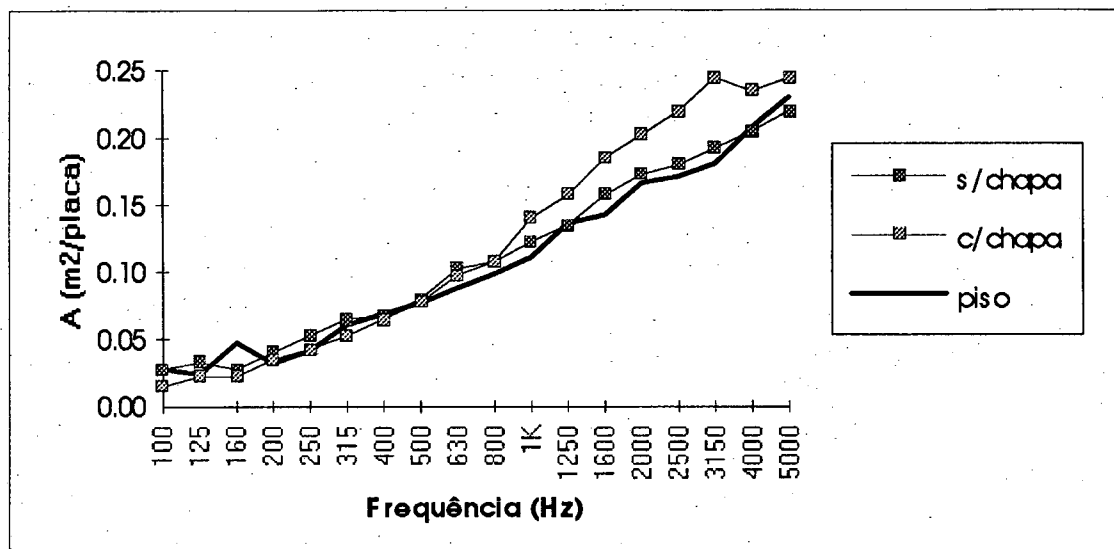


FIGURA 5.3 - Área de absorção sonora equivalente por placa - baffles sem espaçamento de ar, com e sem chapa de madeira instalada

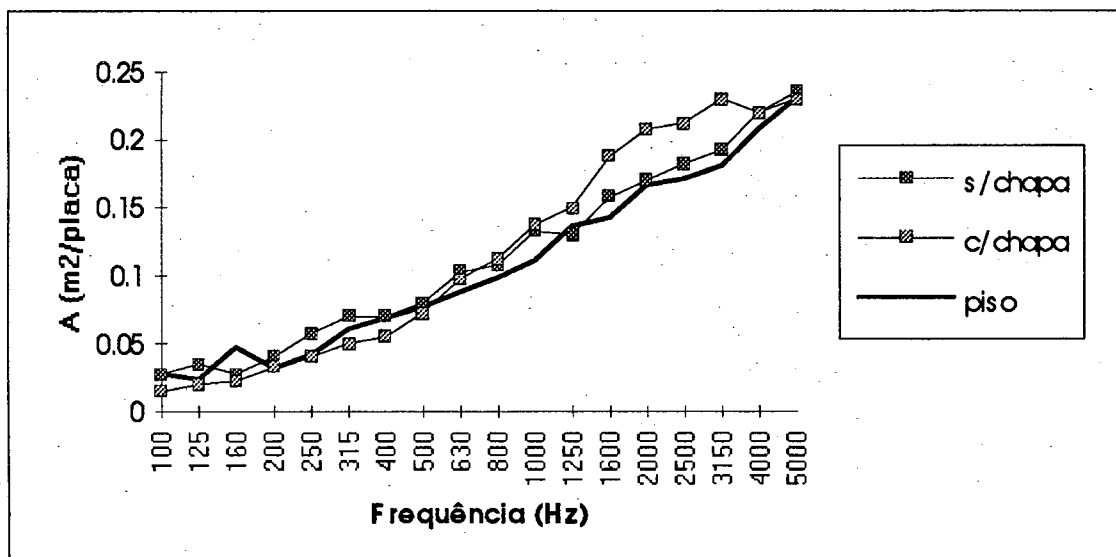


FIGURA 5.4 - Área de absorção sonora equivalente por placa - baffles com espaçamento de ar 30 mm , com e sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

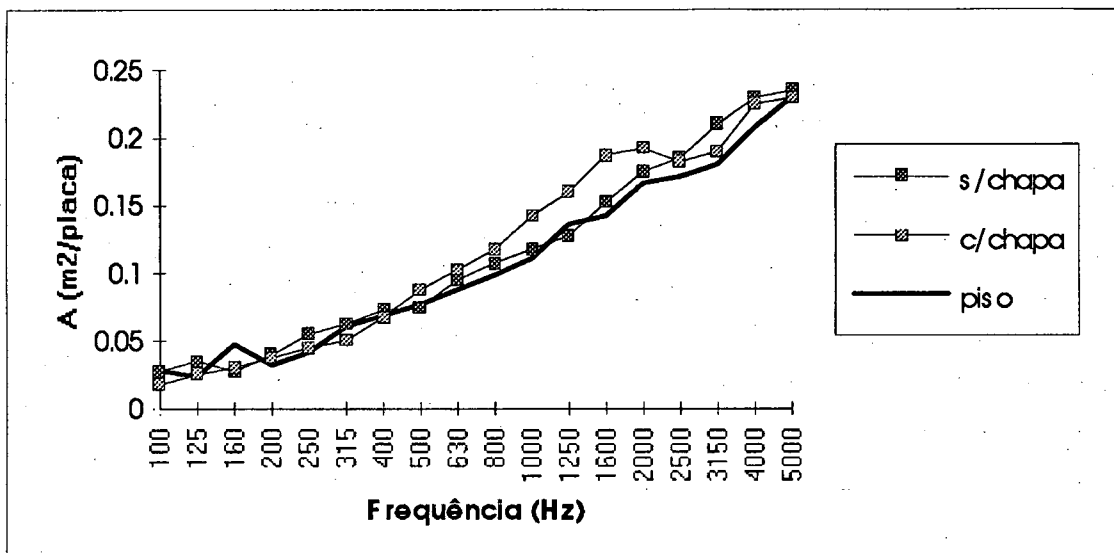


FIGURA 5.5 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* com espaçamento de ar 60 mm , com e sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

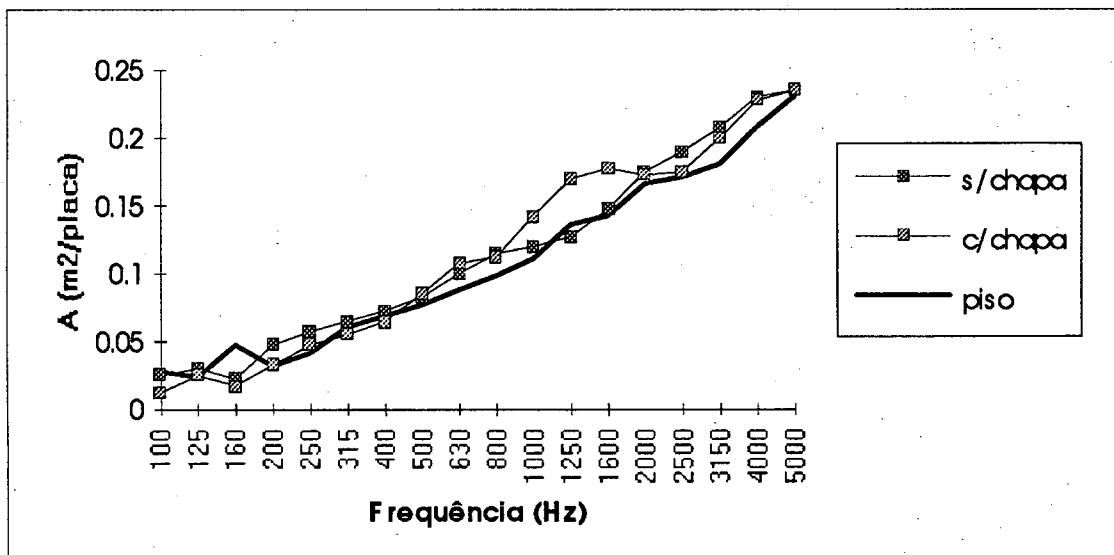


FIGURA 5.6 - Área de absorção sonora equivalente por placa - *baffles* com espaçamento de ar 75 mm , com e sem chapa de madeira instalada X amostras no piso



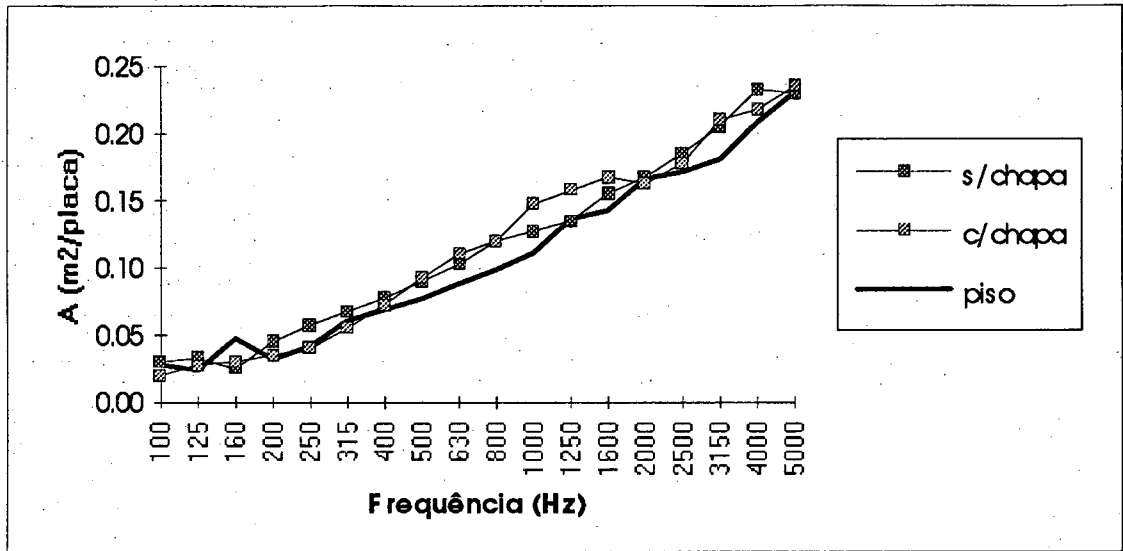


FIGURA 5.7 - Área de absorção sonora equivalente por placa - baffles com espaçamento de ar 90 mm , com e sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

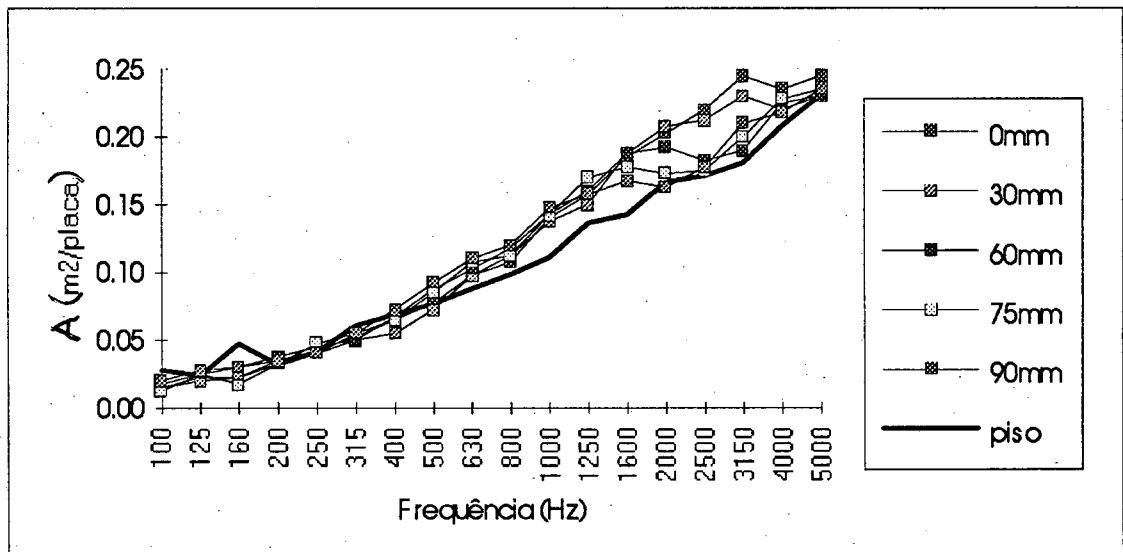


FIGURA 5.8 - Área de absorção sonora equivalente por placa - baffles com espaçamento de ar 30, 60, 75, 90 mm , com chapa de madeira instalada X amostras no piso

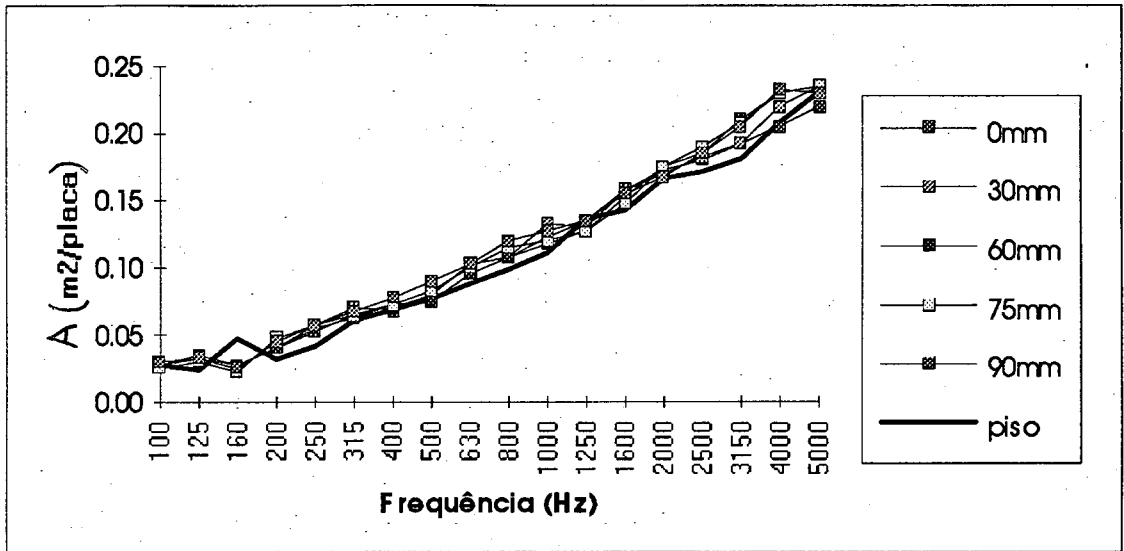


FIGURA 5.9 - Área de absorção sonora equivalente por placa - baffles com espaçamento de ar 30, 60, 75, 90 mm, sem chapa de madeira instalada X amostras no piso

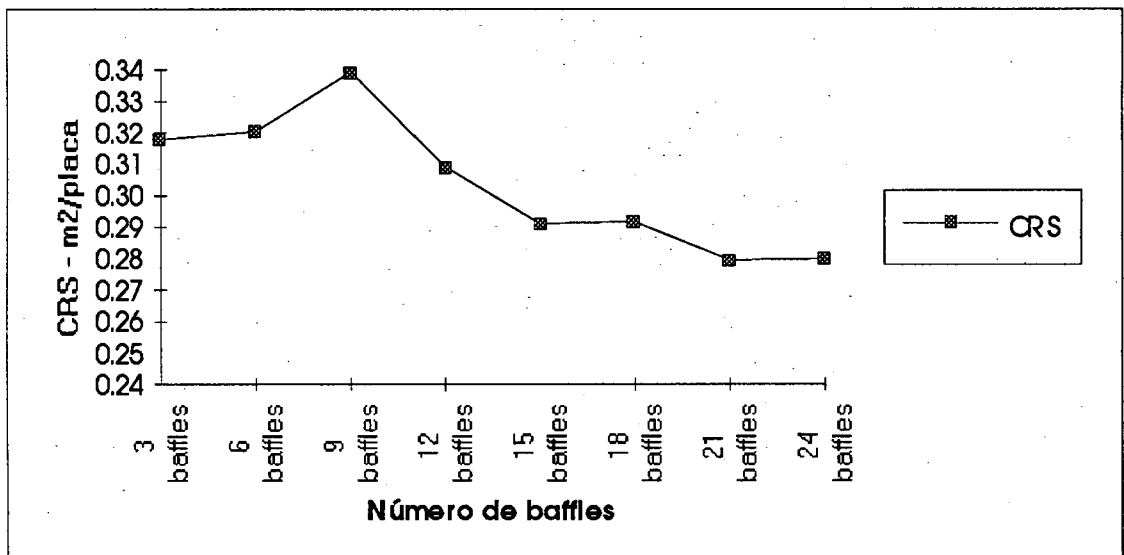


FIGURA 5.10 - Coeficiente de Redução Sonora - 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 baffles

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES**

Nesta pesquisa foram estudados o método de medição de absorção sonora normalizado e as incertezas do método de medição de tempo de reverberação (Cap. 3), a avaliação do sistema de medição adotado (Cap. 4) e, também, realizados ensaios experimentais em diversas configurações de *baffles* (Cap. 5). Neste capítulo, se encontram relatadas as conclusões finais desta pesquisa, subdivididas de acordo com os itens mencionados acima.

#### **6.1 - Método de Medição de Tempo de Reverberação em Câmara Reverberante**

1. De um modo geral, o fator de influência maior na variação dos testes de tempo de reverberação é a posição de microfone, principalmente nas frequências abaixo de 160 Hz;
2. É importante destacar a importância do controle de todos os componentes que fazem parte da medição de tempo de reverberação em câmara reverberante. É sugerido que, realizando-se um grande número de medições independentes, é possível melhorar de maneira eficaz a medição e avaliação de erros deste tipo de teste;
3. Os resultados apresentados não devem ser entendidos como uma resposta definitiva às dúvidas existentes no processo de medição de tempo de reverberação, mas como um ponto de partida para um desenvolvimento e uma abertura ainda maior das idéias no que se refere à precisão de medições de tempo de reverberação em câmara reverberante.

## 6.2 - Avaliação do Sistema de Medição Adotado

1. Quando há uma grande diferença entre o tempo de reverberação em altas e baixas frequências, se faz necessário encontrar um correto balanço entre o número de espectros para o cálculo do tempo de reverberação;
2. Quando analisando o desvio padrão relativo ao valor absoluto do tempo de reverberação para cada frequência, observa-se que os mesmos se apresentam significativos nas frequências abaixo de 315 Hz. Nas altas frequências não há necessidade de preocupações;
3. Quando utilizando um Analisador de Frequências, a precisão dos resultados de ensaios não se altera significativamente com o incremento de número de repetições;
4. Um estudo da reprodutibilidade do método de medição se faz desejável para verificação da acuidade do Analisador de Frequências

## 6.3 - Absorção Sonora de *Baffles*

1. Tendência geral: os *baffles* estudados, apresentam maior absorção quando suspensos do que contra uma superfície rígida, principalmente nas bandas de frequências acima de 500 Hz;
2. *Baffles* atuando em conjunto com uma chapa de madeira apresentam maior absorção do que os sem chapa de madeira;
3. Quando atuando com a chapa de madeira, os *baffles* com menor espaçamento de ar apresentam maior absorção, nas bandas de frequências acima de 2kHz;
4. Quando sem chapa de madeira, os *baffles* com maior espaçamento de ar apresentam maior absorção nas bandas de frequências altas;

5. Nas altas frequências, os efeitos dos espaçamentos de ar se apresentam mais evidentes;
6. O número ótimo de *baffles* a serem ensaiados se encontra entre 3 e 12 painéis.

#### 6.4 - Sugestões Quanto à Continuidade da Pesquisa

Apesar de exaustivos ensaios, os resultados de absorção sonora de *baffles* apresentados nesta pesquisa não oferecem diferenças significativas, sugerindo a continuação deste estudo utilizando placas com diferentes características. É recomendado usar absorventes acústicos com maior espessura. É interessante observar que, então, os resultados podem não se apresentar com a mesma tendência observada neste estudo, já que se tratava de uma amostra de espessura bem reduzida, de baixa absorção acústica.

É recomendada a realização de um estudo da incerteza do método de medição de tempo de reverberação da câmara reverberante contendo os *baffles* pendurados. Destaca-se, também, a necessidade do estabelecimento de um método de medição de absorção sonora de placas suspensas normalizado, permitindo a obtenção de conformidade entre resultados de ensaios executados em diferentes condições.

É interessante observar que o uso de softwares de ray tracing é uma alternativa bem eficiente para fins comparativos, já que simplifica e facilita as investigações, e serve para nortear os ensaios experimentais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cops, A. Absorption properties of baffles for noise control in industrial halls. Applied Acoustics 18 (1985), 435-448.
2. Raynoise Rev 2.0 - User's Manual. Numerical Integration Technologies N. V, 1993.
3. Grundy, N. A. ; Smith, T. J. B.; Webb, J. D. Practical building acoustics. /s.n.t./ p. 13.
4. Ibidem, p. 14.
5. Cremer, Lothar. Principles and applications of room acoustics. Applied Science Publishers LTD, 1982. v. 1, p. 140.
6. Gerges, Samir, N. Y. Ruído : fundamentos e controle. Florianópolis: S. N. Y. Gerges,1992, p. 229.
7. Porges, G. Applied Acoustics. Edward Arnould Limited, London, 1977.
8. Gerges, Samir, N. Y. Ruído : fundamentos e controle. Florianópolis: S. N. Y. Gerges,1992, p. 258.
9. Ibidem, p. 300.
10. Catálogo SONEX. Illbruck Industrial Ltda.
11. Manual de Acústica - BIDIM. Rhodia.
12. Kosten, W. C. Behavior of Absorbing Materials./s.n.t./p.49.

13. Ibidem, p.50.
14. ISO 354 - 1985(E). Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room.
15. Gerges, Samir, N. Y. Ruído : fundamentos e controle. Florianópolis: S. N. Y. Gerges,1992, p. 253.
16. Ibidem, p. 255.
17. Kortchmar, L. Um estudo estatístico do método de medição de absorção sonora em câmara reverberante. Anais do 14 Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Curitiba,Nov. 1993.
18. Gerges, Samir, N. Y. Ruído : fundamentos e controle. Florianópolis: S. N. Y. Gerges,1992, p. 254.
19. Ibidem, p.313.
20. ISO/IEC/OIML/BIPM/1992 (E), Guide to the expression of uncertainty in measurement.
21. Cremer, Lothar. Principles and applications of room acoustics. Applied Science Publishers LTD, 1982. v. 1, p. 326.
22. Ibidem, p. 340.
23. Ibid. p. 328.
24. Ibid. p 322.
25. NBR 8517/84, Espumas flexíveis de poliuretano - determinação da passagem de ar através da espuma.

26. ISO 5725-1986 (E) - Precision of test methods - determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests.



## **ANEXO I**

*(resultados relativos ao Capítulo 5)*

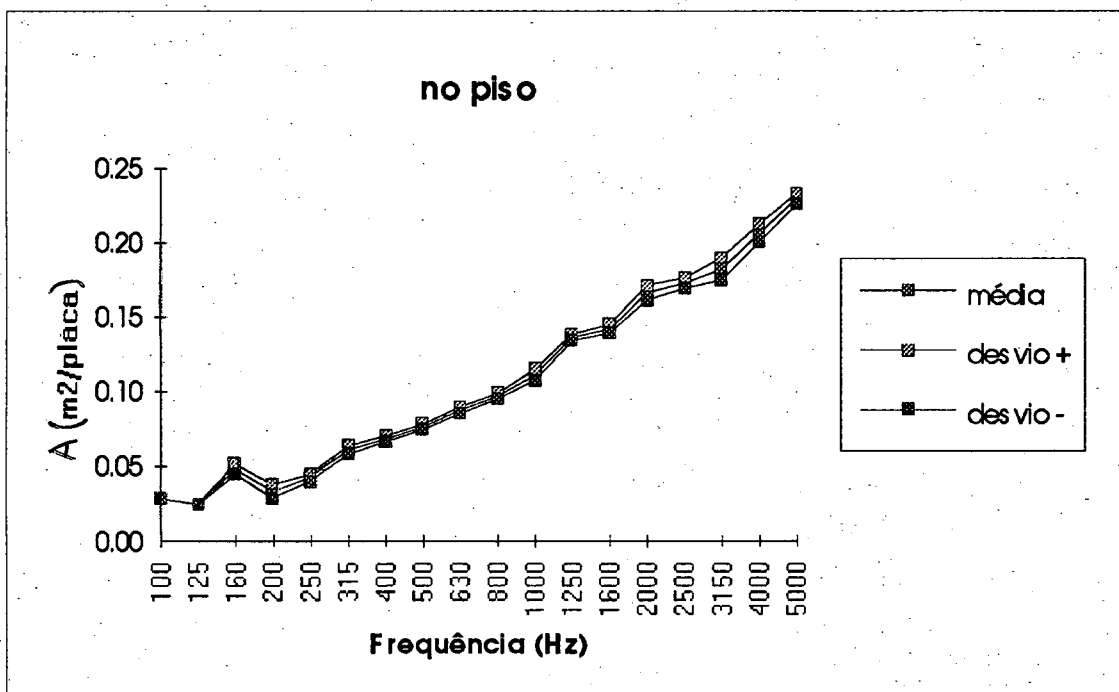


FIGURA AI.1 - Placas acústicas no piso - amplitude do desvio padrão

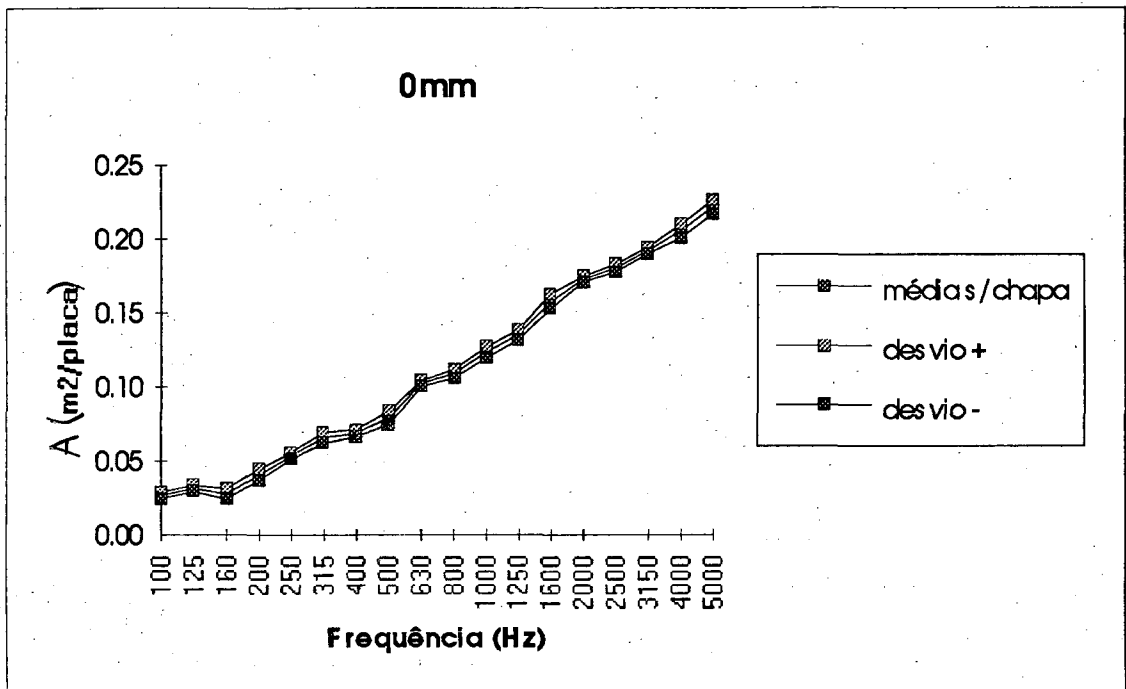


FIGURA AI.2 - *Baffles* sem espaçamento de ar (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

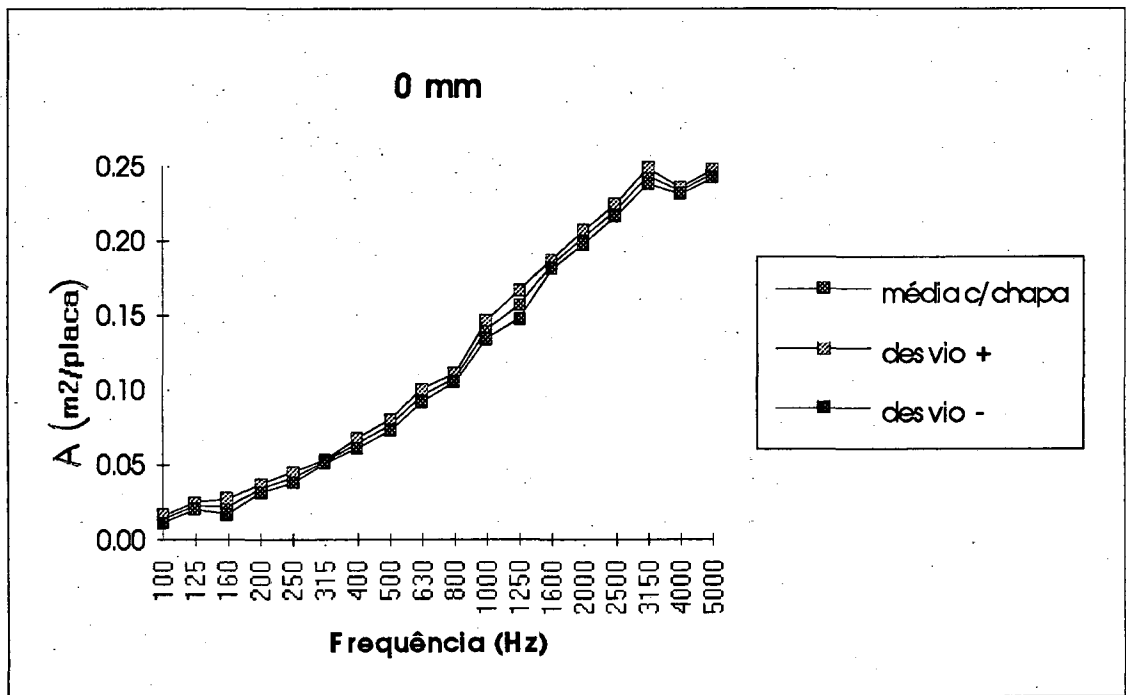


FIGURA AI.3 *Baffles* sem espaçamento de ar (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

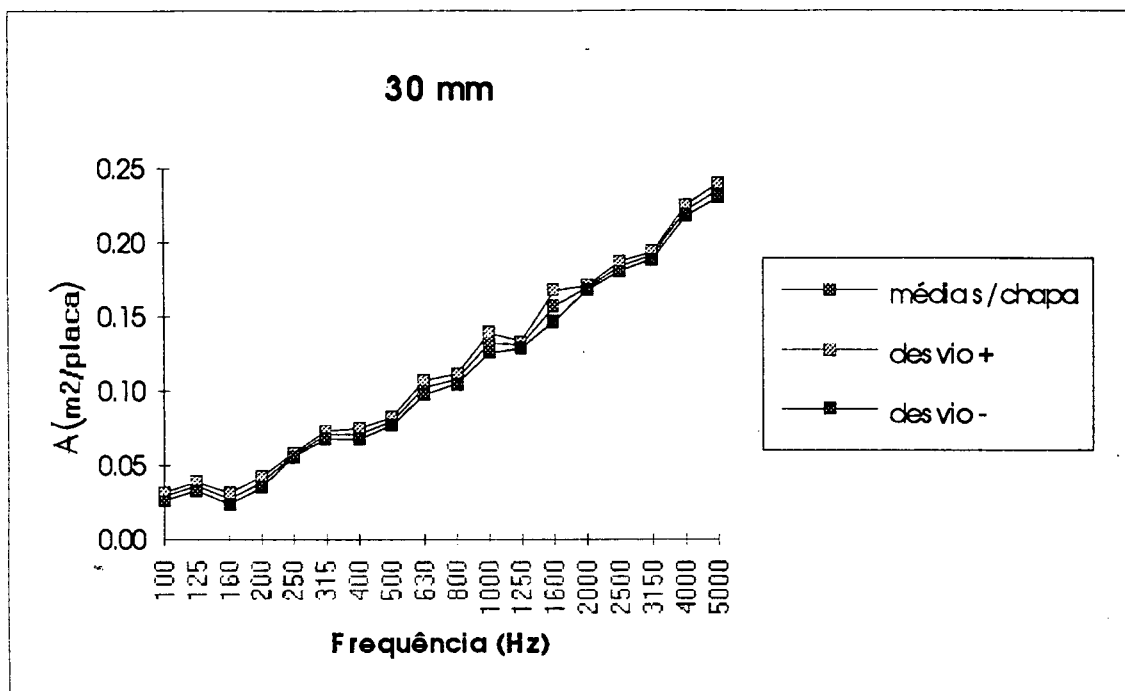


FIGURA AI.4 - *Baffles* com espaçamento de ar 30 mm (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

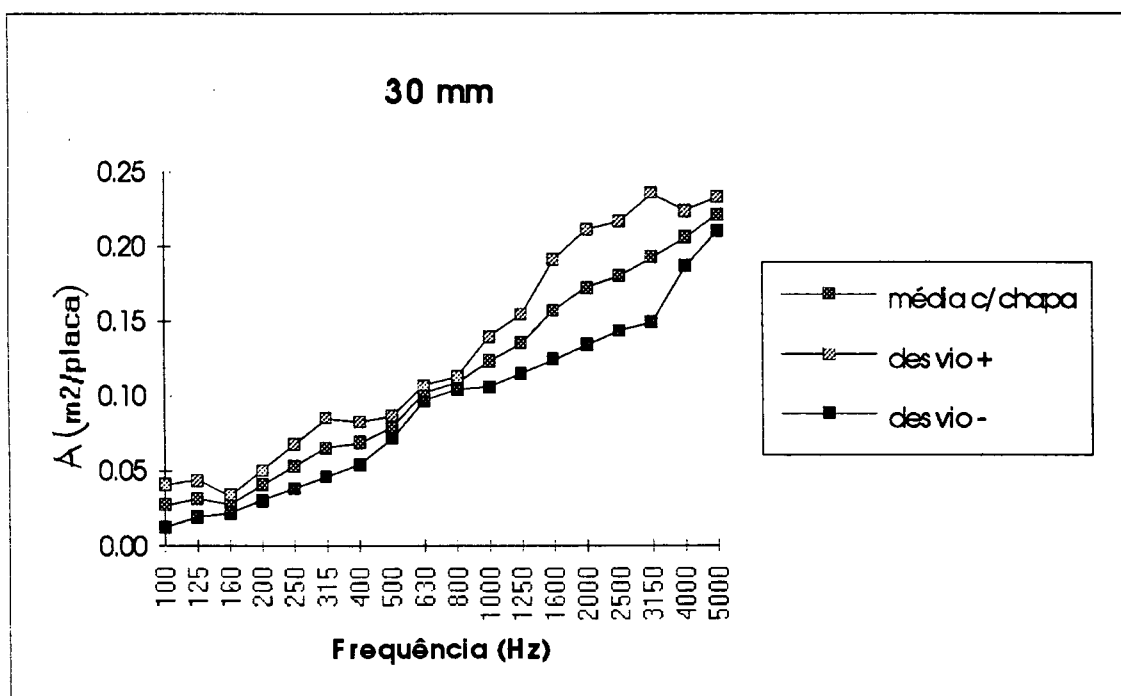


FIGURA AI.5 - *Baffles* com espaçamento de ar 30 mm (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

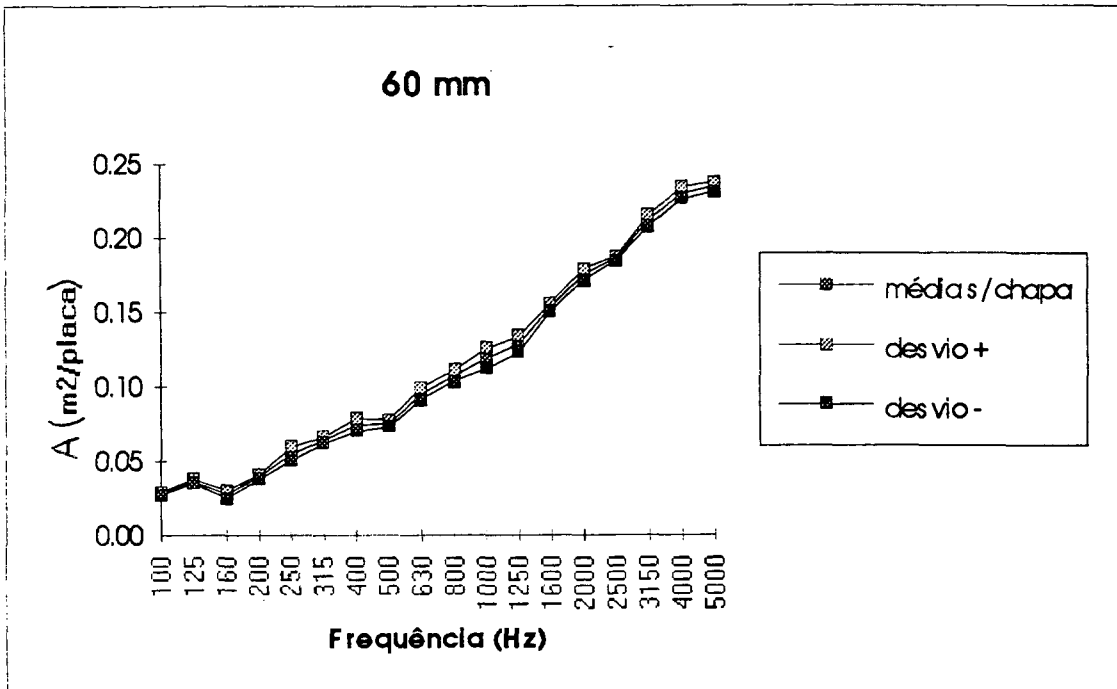


FIGURA AI.6 - *Baffles* com espaçamento de ar 60 mm (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

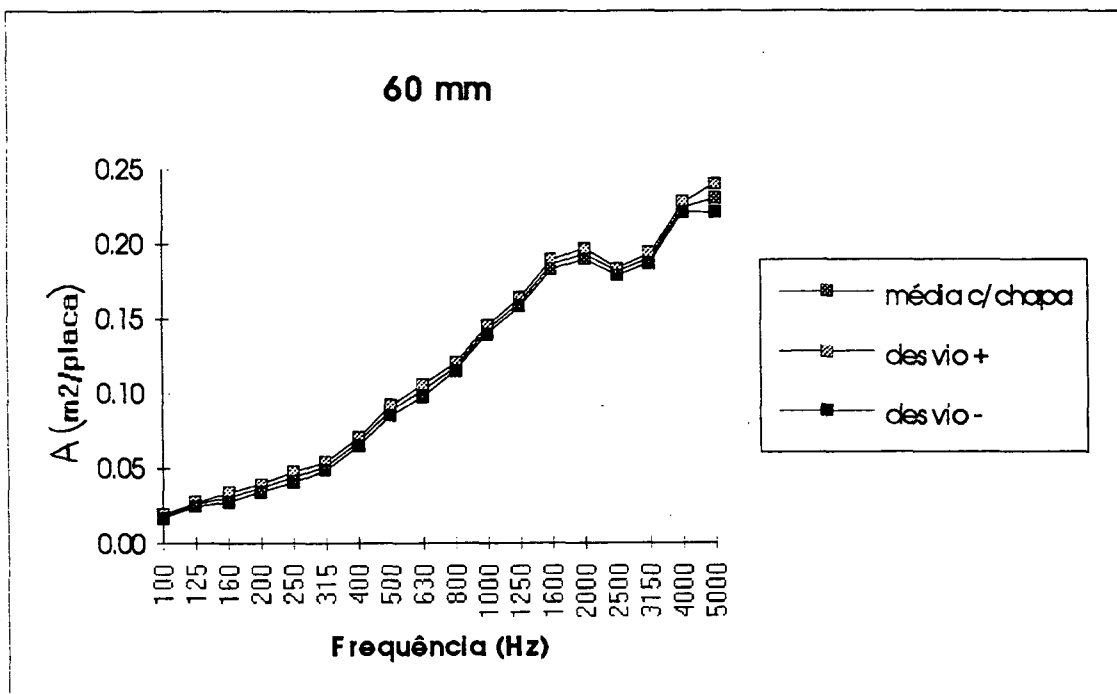


FIGURA AI.7 - *Baffles* com espaçamento de ar 60 mm (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

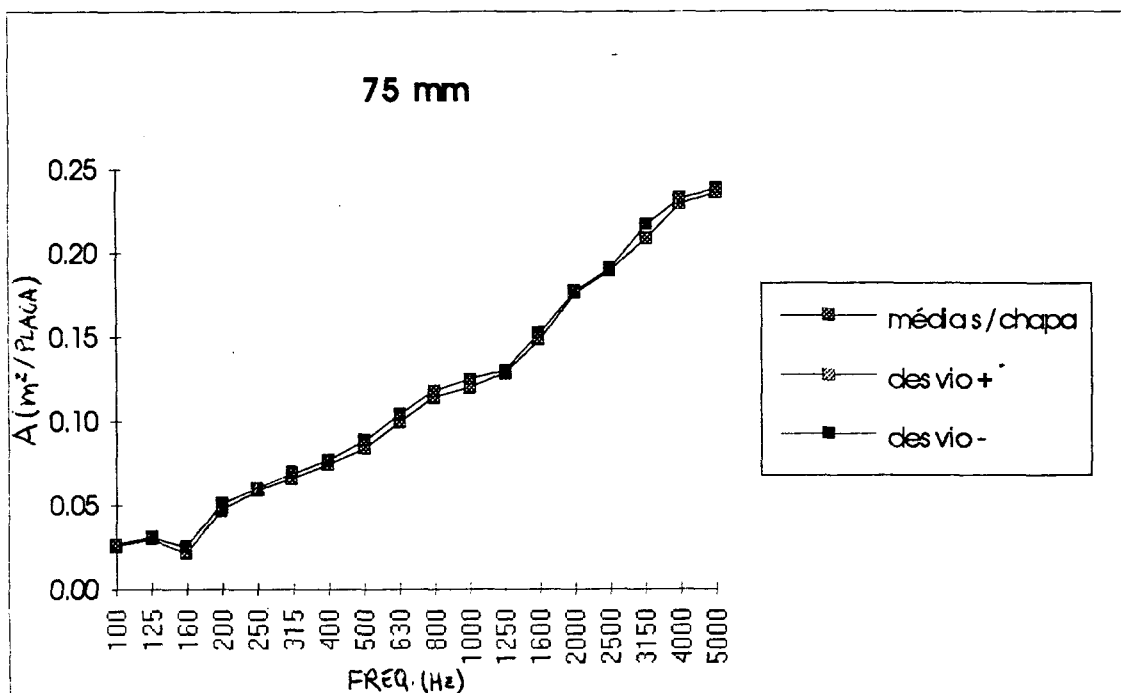


FIGURA AI.8 - *Baffles* com espaçamento de ar 75 mm (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

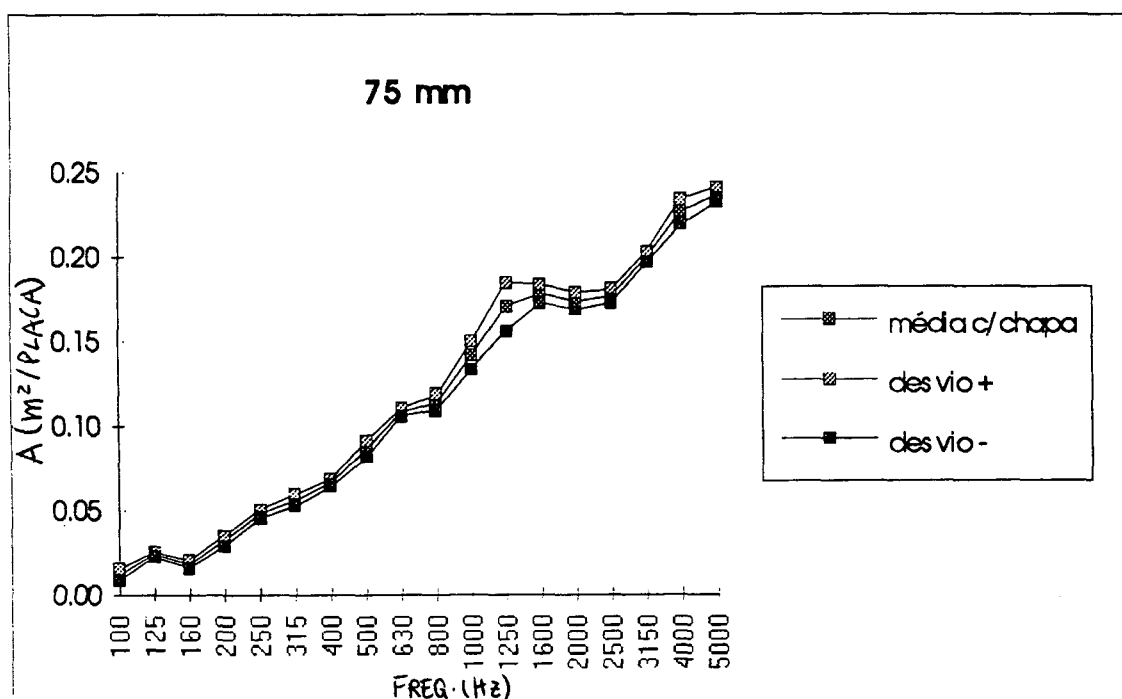


FIGURA AI.9 - *Baffles* com espaçamento de ar 75 mm (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

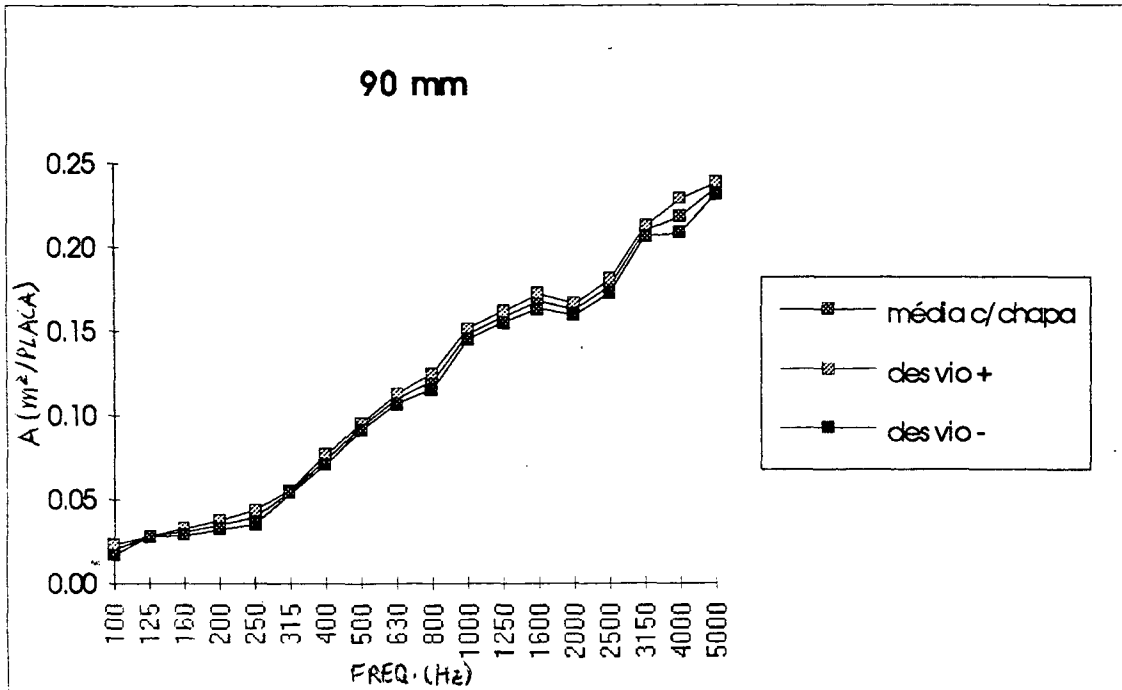


FIGURA AI.10 - *Baffles* com espaçamento de ar 90 mm (sem chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

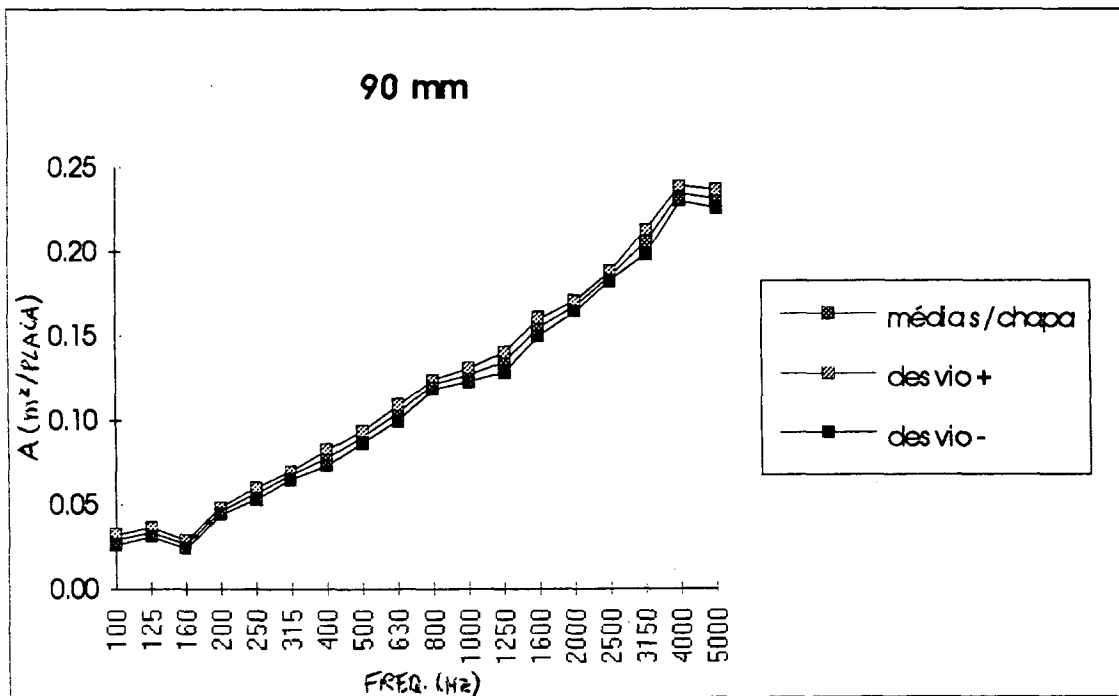


FIGURA AI.11 - *Baffles* com espaçamento de ar 90 mm (com chapa de madeira) - amplitude do desvio padrão

piso da câmara					
FREQ.	T1	T2	T3	T4	T5
100	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
125	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
160	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04
200	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
250	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
315	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
400	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
500	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07
630	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
800	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10
1000	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11
1250	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13
1600	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14
2000	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17
2500	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17
3150	0.19	0.17	0.18	0.18	0.18
4000	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20
5000	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23

Tabela AI.1 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica (m<sup>2</sup>/placa) dos  
5 ensaios - amostra no piso da câmara

FREQ.	0 mm c/ chapa de madeira					0 mm s/ chapa de madeira				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
100	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
125	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
160	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03
200	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04
250	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06
315	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07
400	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
500	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09
630	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.10
800	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
1000	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12
1250	0.16	0.14	0.16	0.17	0.16	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14
1600	0.18	0.18	0.19	0.18	0.19	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15
2000	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.17	0.18	0.17	0.17	0.17
2500	0.22	0.22	0.23	0.23	0.22	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
3150	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20
4000	0.23	0.24	0.24	0.23	0.24	0.21	0.21	0.20	0.20	0.21
5000	0.25	0.24	0.25	0.24	0.24	0.22	0.22	0.23	0.22	0.23

Tabela AI.2 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica (m<sup>2</sup>/placa) dos  
5 ensaios - baffles sem espaçamento de ar



FREQ.	30 mm s/ chapa de madeira					30 mm c/ chapa de madeira				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
100	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
125	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
160	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
200	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
250	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04
315	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05
400	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
500	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08
630	0.11	0.10	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
800	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11
1000	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14
1250	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.16	0.15	0.14	0.16
1600	0.16	0.15	0.17	0.17	0.15	0.19	0.19	0.19	0.18	0.19
2000	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
2500	0.18	0.19	0.19	0.19	0.18	0.21	0.22	0.21	0.21	0.21
3150	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	0.23	0.23	0.24	0.23	0.23
4000	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.23	0.23
5000	0.24	0.23	0.23	0.23	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24

Tabela AI.3 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $m^2$ /placa) dos 5 ensaios - baffles com espaçamento de ar 30 mm

FREQ.	60 mm s/ chapa de madeira					60 mm c/ chapa de madeira				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
100	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
125	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
160	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
200	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04
250	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
315	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05
400	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
500	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
630	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11
800	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
1000	0.11	0.12	0.13	0.12	0.11	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14
1250	0.13	0.12	0.14	0.13	0.13	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17
1600	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16	0.19	0.19	0.19	0.18	0.19
2000	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.20	0.19	0.19	0.20	0.19
2500	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
3150	0.21	0.21	0.22	0.22	0.21	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
4000	0.23	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22
5000	0.24	0.23	0.23	0.24	0.23	0.22	0.22	0.24	0.23	0.24

Tabela AI.4- Área de absorção sonora equivalente por placa acústica ( $m^2$ /placa) dos 5 ensaios - baffles com espaçamento de ar 60 mm

FREQ.	75 mm s/ chapa de madeira					75 mm c/ chapa de madeira				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
100	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
125	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
160	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
200	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
250	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
315	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06
400	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
500	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09
630	0.11	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
800	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11
1000	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.15	0.14	0.14	0.13	0.15
1250	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.17	0.17	0.17	0.15	0.19
1600	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.18	0.19	0.18	0.17	0.18
2000	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17
2500	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18
3150	0.21	0.22	0.21	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
4000	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.24	0.22	0.23
5000	0.24	0.24	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.24

Tabela AI.5 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica (m<sup>2</sup>/placa) dos 5 ensaios - baffles com espaçamento de ar 75 mm

FREQ.	90 mm s/ chapa de madeira					90 mm c/ chapa de madeira				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
100	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
125	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
160	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
200	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
250	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
315	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06
400	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07
500	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10
630	0.10	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
800	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13
1000	0.12	0.13	0.12	0.13	0.13	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
1250	0.13	0.13	0.14	0.14	0.13	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16
1600	0.15	0.16	0.16	0.15	0.16	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17
2000	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17	0.16	0.16	0.17
2500	0.18	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18
3150	0.20	0.20	0.20	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
4000	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.22	0.21	0.21	0.22	0.24
5000	0.22	0.23	0.24	0.24	0.23	0.24	0.23	0.24	0.23	0.24

Tabela AI.6 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica (m<sup>2</sup>/placa) dos 5 ensaios - baffles com espaçamento de ar 90 mm

mm	30 mm			60 mm			75 mm			90 mm			piso								
freq	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio		
01	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00
02	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.03	0.01	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
03	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00
04	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00	0.04	0.01	0.04	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00
05	0.00	0.05	0.00	0.06	0.00	0.05	0.01	0.05	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	0.05	0.00	0.06	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00
06	0.00	0.07	0.00	0.07	0.00	0.07	0.02	0.06	0.00	0.05	0.00	0.07	0.00	0.06	0.00	0.07	0.00	0.05	0.00	0.06	0.00
07	0.00	0.07	0.00	0.07	0.00	0.07	0.01	0.07	0.00	0.07	0.00	0.07	0.00	0.07	0.00	0.08	0.00	0.07	0.00	0.07	0.00
08	0.00	0.08	0.00	0.08	0.00	0.08	0.01	0.08	0.00	0.09	0.00	0.08	0.00	0.09	0.00	0.10	0.00	0.11	0.00	0.09	0.00
10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.01	0.10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	0.11	0.00	0.12	0.00	0.12	0.00	0.10	0.00
11	0.00	0.11	0.00	0.11	0.00	0.11	0.00	0.11	0.00	0.12	0.00	0.11	0.00	0.11	0.00	0.12	0.00	0.12	0.00	0.10	0.00
14	0.01	0.12	0.00	0.13	0.01	0.12	0.02	0.12	0.01	0.14	0.00	0.12	0.01	0.14	0.01	0.13	0.00	0.15	0.00	0.11	0.00
16	0.01	0.14	0.00	0.13	0.00	0.14	0.02	0.13	0.01	0.16	0.00	0.13	0.00	0.17	0.01	0.13	0.01	0.16	0.00	0.14	0.00
18	0.00	0.16	0.01	0.16	0.01	0.16	0.03	0.15	0.00	0.19	0.00	0.15	0.00	0.18	0.01	0.16	0.01	0.17	0.00	0.14	0.00
20	0.00	0.17	0.00	0.17	0.00	0.17	0.04	0.18	0.00	0.19	0.00	0.18	0.00	0.17	0.01	0.17	0.00	0.16	0.00	0.17	0.00
22	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.18	0.04	0.19	0.00	0.18	0.00	0.19	0.00	0.18	0.00	0.19	0.00	0.18	0.00	0.17	0.00
24	0.01	0.19	0.00	0.19	0.00	0.19	0.04	0.21	0.00	0.19	0.00	0.21	0.01	0.20	0.00	0.21	0.01	0.21	0.00	0.18	0.01
23	0.00	0.21	0.00	0.22	0.00	0.21	0.02	0.23	0.00	0.22	0.00	0.23	0.00	0.23	0.01	0.23	0.00	0.22	0.01	0.21	0.01
24	0.00	0.22	0.00	0.23	0.00	0.22	0.01	0.23	0.00	0.23	0.01	0.24	0.00	0.24	0.00	0.23	0.01	0.23	0.00	0.23	0.00

Tabela AI.7 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica (m<sup>2</sup>/placa) de cada montagem - média aritmética e desvio padrão

FREQ	3 PARES	6 PARES	9 PARES	12 PARES	15 PARES	18 PARES	21 PARES	24 PARES
100	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
125	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
160	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
200	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
250	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05
315	0.12	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06
400	0.09	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07
500	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
630	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10
800	0.10	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10
1000	0.13	0.11	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10
1250	0.17	0.15	0.13	0.14	0.12	0.12	0.12	0.11
1600	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13	0.13
2000	0.16	0.19	0.16	0.17	0.17	0.15	0.15	0.15
2500	0.18	0.21	0.20	0.19	0.17	0.20	0.19	0.17
3150	0.23	0.24	0.20	0.23	0.21	0.21	0.20	0.19
4000	0.27	0.24	0.25	0.23	0.22	0.20	0.21	0.21
5000	0.03	0.26	0.21	0.18	0.15	0.12	0.20	0.13

Tabela AI.8 - Área de absorção sonora equivalente por placa acústica (m<sup>2</sup>/placa) de diferentes números de baffles

3 PARES	6 PARES	9 PARES	12 PARES	15 PARES	19 PARES	21 PARES	24 PARES
0.32	0.32	0.34	0.31	0.29	0.29	0.29	0.28

Tabela AI.9 - Coeficiente de redução de ruído ( $m^2/placa$ ) de diferentes números de painéis de *baffles*

## **ANEXO II**

*(simulação numérica em software de raios acústicos - RAYNOISE)*

# MODELAGEM NUMÉRICA

## *Introdução*

Em decorrência do alto custo e do consumo de tempo das técnicas de simulação experimentais, tais como equipamentos e necessidade de instalações específicas, e, principalmente, devido ao crescente desenvolvimento dos computadores, as simulações através do uso de *softwares* de raios acústicos se tornaram uma boa alternativa para predição de fenômenos acústicos em espaços internos e ao ar livre.

O RAYNOISE é um programa de computador avançado, projetado para simular o comportamento acústico de qualquer volume arbitrário, tais como teatros, salas de conferência, oficinas ou galpões industriais. Devido à aproximação genérica, pode ser também aplicado à geometrias abertas, tais como acústica ambiental e de exteriores. O RAYNOISE é baseado em um algoritmo geométrico, chamado de *Conical Beam Method*, um algoritmo de traçado de imagem combinado entre fonte e raio. Os campos de aplicação do RAYNOISE incluem, principalmente, o controle de ruído industrial, acústica de salas e acústica ambiental.

## ***Controle de Ruído Industrial***

Na acústica industrial, o foco principal é a determinação do Nível de Pressão Sonora (NPS) causado por máquinas em galpões industriais. Estes níveis podem ser calculados utilizando-se o RAYNOISE. Os resultados são apresentados em “mapas de ruído”, permitindo uma rápida avaliação de áreas ruidosas. Os “mapas de ruído” são calculados baseados nos seguintes dados:

- o Nível de Pressão Sonora das máquinas no ambiente em bandas de oitava (63Hz-8kHz);
- a forma geométrica do ambiente;
- as características de absorção das paredes, piso e teto.

Uma vez que todos os dados foram inseridos, é possível analisar "cenários" diferentes e avaliar qualitativamente e quantitativamente o resultado de certas modificações, tais como:

- trocas de absorvedores;
- reorganização da disposição do maquinário;
- modificações na geometria do ambiente;
- reduções nos Níveis de Pressão Sonora das máquinas.

Cada fonte sonora pode ser levada em consideração separadamente ou em combinação com outra fonte. Isto pode ser útil, por exemplo, na avaliação da contribuição de cada fonte sonora no NPS global.

## ***Acústica de Salas***

Na acústica de salas, onde a característica transiente do som é de grande importância, o mesmo algoritmo pode ser utilizado para obtenção de respostas impulsivas. Estas são as bases para a avaliação e otimização da inteligibilidade da sala e da performance musical, através de parâmetros de qualidade, tais como:

- Tempo de Decaimento Próximo;

- Definição;

- Índice de Inteligibilidade;

- Índice de Claridade;

- Razão Sinal/Ruído;

- Eficiência Lateral.

O RAYNOISE apresenta esses parâmetros de qualidade na forma de mapas *iso-contour* [2]. Os reflectogramas e os caminhos dos raios sonoros podem também ser visualizados, permitindo, desta maneira, o estudo da forma da sala em relação às reflexões.

## ***Acústica Ambiental***

O RAYNOISE pode ser utilizado no campo da acústica ambiental para a determinação do impacto ambiental de ruído das fábricas, auto-estradas e ferrovias, modeladas através de fontes planas ou fontes alinhadas. Um algoritmo de difração de primeira ordem permite a otimização do projeto de telas e barreiras (posição, comprimento e altura).



## ***Modelagem Numérica em Acústica Geométrica***

O RAYNOISE é baseado nos princípios de acústica geométrica e, desta forma, sujeita às suas restrições. A acústica geométrica assume que onda sonora se comporta como raios sonoros, exatamente como a geometria de ondas ópticas se comportam como raios de luz. Os raios acústicos são refletidos pelas superfícies sólidas e perdem parte de sua energia a cada obstáculo que alcançam. Esta aproximação é somente válida para altas frequências, já que negligencia o aspecto de onda do comportamento sonoro. Desta forma, todas as interferências e fenômenos de difração são - numa primeira aproximação - descartados.

O Mirror Image Source Method e o Ray Tracing Method são dois algoritmos de computador já conhecidos, que vêm sendo aplicados por várias décadas. Eles são descritos no Manual do Usuário [2].

## ***Características de Análise do RAYNOISE***

### ***Aspectos Gerais***

- Modelamento de geometrias abertas ou fechadas consistindo de um número ilimitado de superfícies;
- superfícies consistindo de no máximo 20 pontos;
- modelo de absorção de paredes baseado nos coeficientes de absorção de Sabine em bandas de oitava;
- banco de dado de materiais;

- condições atmosféricas (temperatura e umidade relativa);
- números de raios e ordem de fonte de imagem especificados pelo usuário;
- banco de dados de alto-falantes;
- número ilimitado de microfones.

### ***Método***

- Um método combinado de traçamento de raios/fonte-imagem-espelho, chamado de *Conical Beam Method*;

### ***Cálculo do Ecograma***

- Fontes sonoras com tempo de decaimento, potência em relação à frequência e diretividade definidos pelo usuário;
- número de microfones ilimitado.

## ***Cálculo de Mapas de Critério***

- Número ilimitado de fontes sonoras de diferentes tipos (pontual, linear e plano) com tempo de decaimento, potência em relação à frequência e diretividade definidos pelo usuário;
- número ilimitado de superfícies de recepção;
- Nível de Pressão Sonora (dB e dB/A);
- Energia Direta (dB);
- razão de energia total/direta;
- Definição (%);
- Claridade (dB);
- Razão-sinal-ruído (dB);
- Eficência Lateral (%);
- Tempo de Decaimento Próximo (s);
- Índice de Inteligibilidade (-);
- condições de contorno especiais em telas e barreiras, modeladas por um algoritmo de difração de primeira ordem.

## ***Simulação dos Ensaaios Experimentais de Tempo de Reverberação***

O propósito desta simulação foi iniciar a compreensão do RAYNOISE, através do estudo do *Early Decay Time* - EDT do modelo da câmara reverberante do INMETRO. As características do ensaio, bem como as características da sala de teste foram mantidos o mais próximo possível da realidade. Os resultados da simulação não são apresentados, já que fizeram parte de uma primeira experiência que necessita ainda de alguns ajustes.

### ***Descrição do Modelo***

A câmara reverberante, de volume  $211 \text{ m}^3$ , foi modelada idênticamente à câmara do INMETRO se utilizando do próprio programa para gerar as superfícies (Fig. AII.1). As posições da fonte sonora, bem como a localização de uma superfície de recepção que simula o plano onde se encontram os microfones, foram determinadas de maneira a simular o ensaio experimental, conforme representado na Figura AII.2.

### ***Arquivo de Comandos***

A seguir se encontram listados os comandos de entrada de uma simulação para obtenção do *Early Decay Time* da câmara reverberante contendo a amostra de teste no chão, uma superfície de recepção e uma posição da fonte sonora (Fig. AII.3).

{RAYNOISE - System for Geometrical Acoustics

{Titulo ..... EDT da camara c/amostra no piso  
{Data ..... 30 de junho, 1994  
{Numero de "nodes"..... 21  
{Numero de elementos ..... 35  
{Numero de superficie de recepcao .. 1  
{Numero de fonte sonora ..... 1

{selecao da opcao de calculo  
OPTION GLOBAL RETURN

{geracao de nodes da camara reverberante

MESH NODE 1 POSITION 0 0 0 RETURN  
NODE 2 POSITION 6.49 0 0 RETURN  
NODE 3 POSITION 5.19 7.31 0 RETURN  
NODE 4 POSITION 0 6.32 0 RETURN  
NODE 5 POSITION 0 5.47 4.95 RETURN  
NODE 6 POSITION 0 3.47 5.31 RETURN  
NODE 7 POSITION 0 3.47 4.95 RETURN  
NODE 8 POSITION 0 1.34 5.34 RETURN  
NODE 9 POSITION 0 1.34 4.99 RETURN  
NODE 10 POSITION 0 0 5.23 RETURN  
NODE 11 POSITION 6.49 0 5.46 RETURN  
NODE 12 POSITION 6.04 2.55 4.99 RETURN  
NODE 13 POSITION 6.04 2.55 5.35 RETURN  
NODE 14 POSITION 5.67 4.62 4.96 RETURN  
NODE 15 POSITION 5.67 4.62 5.34 RETURN  
NODE 16 POSITION 5.33 6.51 4.99 RETURN

{definicao dos elementos da camara reverberante

ELEMENT 20 CONNECTIVITY 1 2 3 4 RETURN  
ELEMENT 21 CONNECTIVITY 1 10 11 2 RETURN  
ELEMENT 22 CONNECTIVITY 3 4 5 16 RETURN  
ELEMENT 23 CONNECTIVITY 5 6 15 16 RETURN  
ELEMENT 24 CONNECTIVITY 6 7 14 15 RETURN  
ELEMENT 25 CONNECTIVITY 7 8 13 14 RETURN  
ELEMENT 26 CONNECTIVITY 12 13 8 9 RETURN  
ELEMENT 27 CONNECTIVITY 11 12 9 10 RETURN  
ELEMENT 28 CONNECTIVITY 4 5 6 7 RETURN  
ELEMENT 29 CONNECTIVITY 4 7 8 9 RETURN  
ELEMENT 30 CONNECTIVITY 1 9 10 RETURN  
ELEMENT 31 CONNECTIVITY 3 16 15 14 RETURN  
ELEMENT 32 CONNECTIVITY 6 7 14 15 RETURN  
ELEMENT 33 CONNECTIVITY 3 12 13 14 RETURN  
ELEMENT 34 CONNECTIVITY 2 11 12 RETURN  
ELEMENT 35 CONNECTIVITY 1 4 9 RETURN  
ELEMENT 36 CONNECTIVITY 2 3 12 RETURN  
RETURN

{ acrescimo de "nodes" para receiversurface

MESH NODE 500 POSITION 0 0 1.5 RETURN  
NODE 600 POSITION 6.49 0 1.5 RETURN  
NODE 700 POSITION 5.19 7.31 1.5 RETURN  
NODE 800 POSITION 0 6.32 1.5 RETURN

```
{acrescimo de "nodes" para amostra no chao
NODE 400 POSITION 1 1 0 RETURN
NODE 410 POSITION 4.15 1 0 RETURN
NODE 420 POSITION 4.15 4.6 0 RETURN
NODE 430 POSITION 1 4.6 0 RETURN
RETURN
```

```
{definicao da superficie de recepcao
MESH ELEMENT 900 CONNECTIVITY 500 600 700 800 RETURN
RETURN
RECEIVERSURFACE 1
ELEMENT 900
FINENESS 4
RETURN
```

```
{definicao da superficie da amostra
MESH ELEMENT 440 CONNECTIVITY 400 410 420 430 RETURN
RETURN
```

```
{selecao de materiais no banco de dados (RAYNOISE.MAT)
MATERIAL-DATABASE
SELECT 903
SELECT 901
EXTRACT
RETURN
```

```
{especificacao do material selecionado nos elementos
ASSIGN
MATERIAL 1
ELEMENT ALL
RETURN
```

```
ASSIGN
MATERIAL 2
ELEMENT 440
RETURN
```

```
EXTRACT ELEMENTS
```

```
{definicao da fonte sonora
SOURCE 1
NAME SPEAKER
LEVEL 90 90 90 90 90 90 90 90
POSITION 6.39 0.10 0.30
RETURN
```

```
EXTRACT SOURCE 1
```

```
EXTRACT SUMMARY
```

```
{definicao os parametros de calculo
PARAMETERS
ORDERREFLECTION 20
RAYS 10000
RETURN
```

```
{"compute maps": selecao de fontes e superficies de recepcao
MAPP SOURCE ALL RECE ALL RETU
```

{"postprocess maps": selecao de fontes e superficiees de recepcão  
POST SOUR ALL RECE ALL RETU

{escreve resultados em arquivo formatado  
OUTPUT RESULT FORMAT FREE FILE EUAMOS.RES

{le resultados em arquivo formatado  
INPUT RESULT FORMAT FREE FILE EUAMOS.RES

{vizualizacão dos resultados para 125 Hz  
PLOT CONTOUR RESU EDT FREQ 125Hz RETURN

## *Comentários*

O uso do RAYNOISE se encontra em fase de estudo. Estas primeiras simulações realizadas utilizando o programa serviram para a compreensão do novo método. Não se esperava, portanto, fazer uma análise dos resultados, já que não era objetivo desta pesquisa de mestrado. Este estudo será realizado posteriormente.

O programa permite rápida entrada de dados e consequente saída de resultados. O RAYNOISE apresenta bastante opções de cálculo, permitindo um estudo criterioso de acústica. A possibilidade de entrada do modelo da sala através de um programa CAD foi testada e não apresentou dificuldades, sendo uma maneira bastante prática de modelar quaisquer volumes.

A resolução gráfica é bastante satisfatória, possibilitando uma saída de resultados de fácil compreensão. Na Figura AII.4 se encontra um exemplo de resultado de EDT pra a frequência de 500 Hz. O programa também conta com várias opções de representação gráfica do modelo em estudo, na Figura AII.5 se encontram discretizadas as várias superfícies que foram modeladas para obtenção do modelo.



# RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

Rev 2.0A WINDOWS 15-AUG-1993

RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

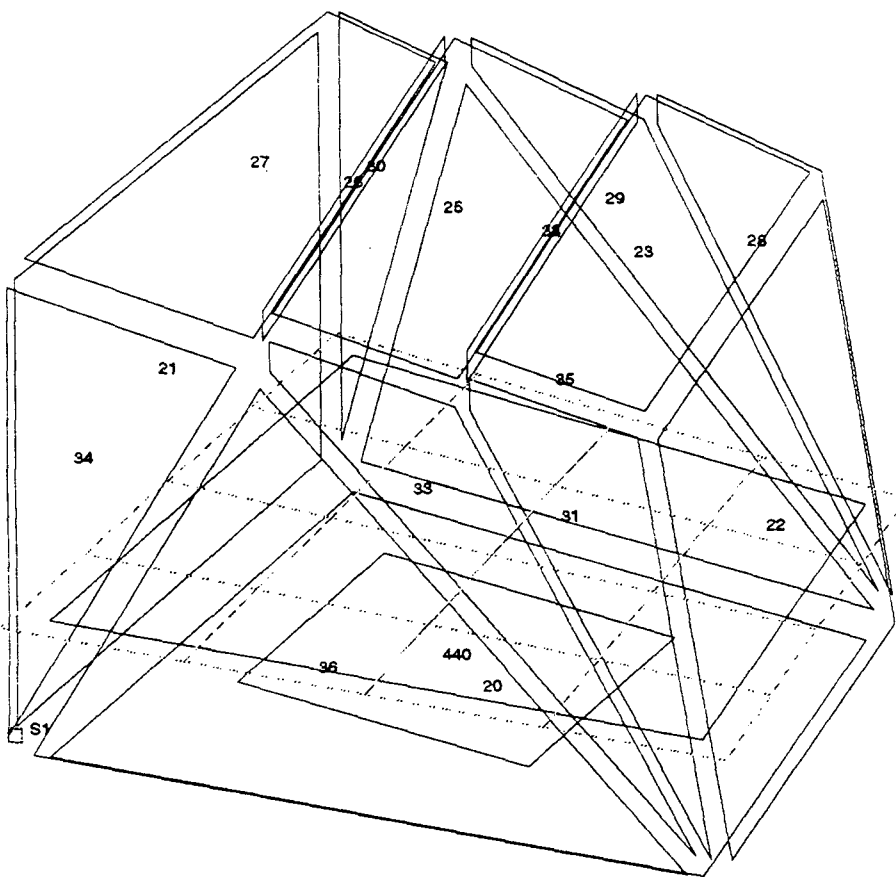


FIGURA AII.1 - Superfícies numeradas do modelo da câmara reverberante do INMETRO

# RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

Rev 2.0A WINDOWS 15-AUG-1993

RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

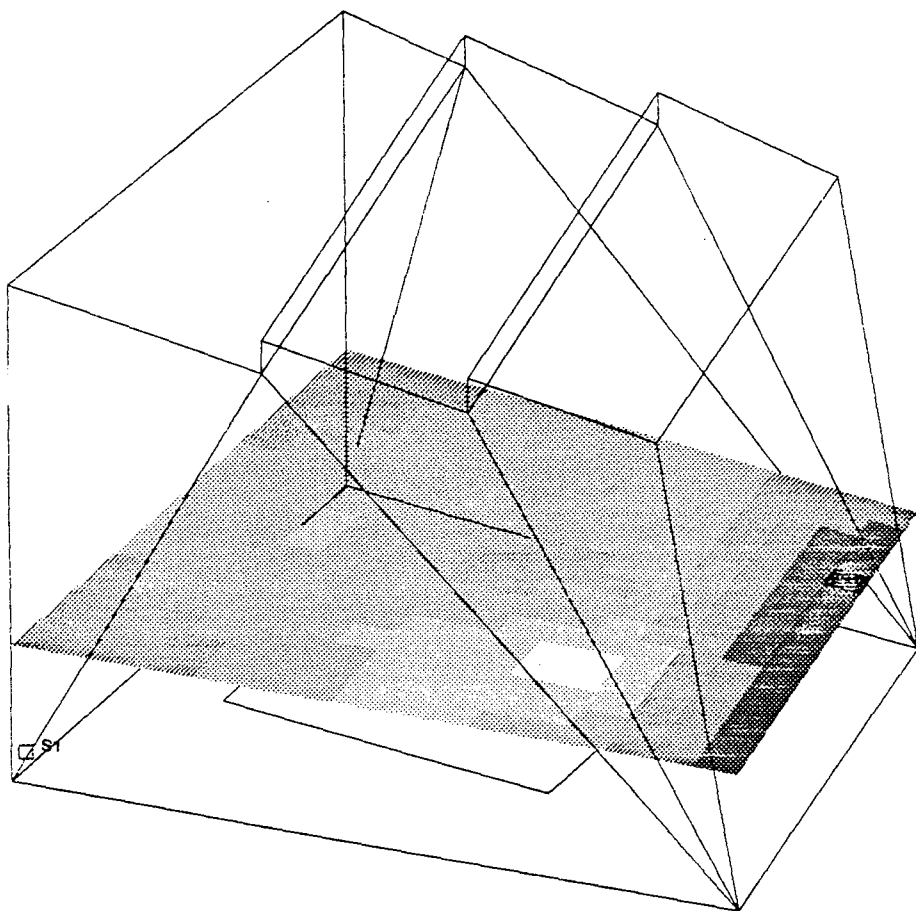
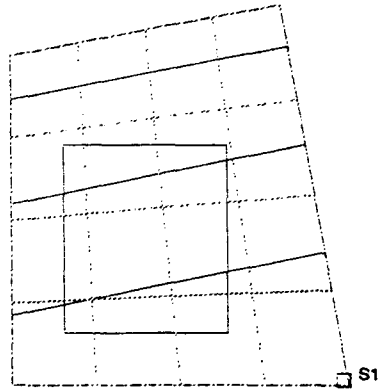
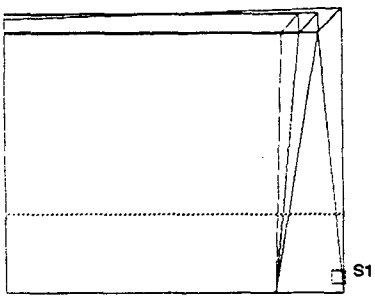


FIGURA AII.2 - Posição da fonte sonora e superfície de recepção

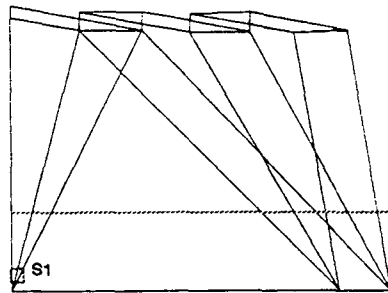
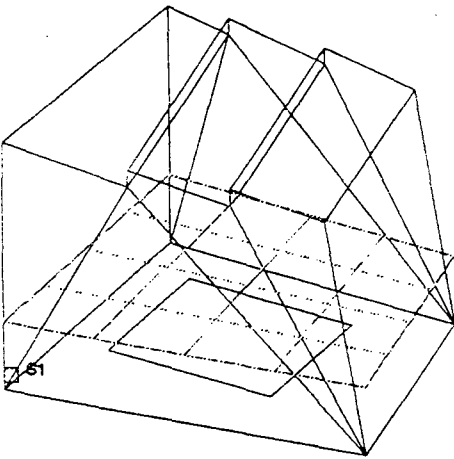
# RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

Rev 2.0A WINDOWS 15-AUG-1993

RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS



Y  
X



Z  
Y

FIGURA AII.3 - Vistas da câmara reverberante

# RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

Rev 2.0A WINDOWS 15-AUG-1993

RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

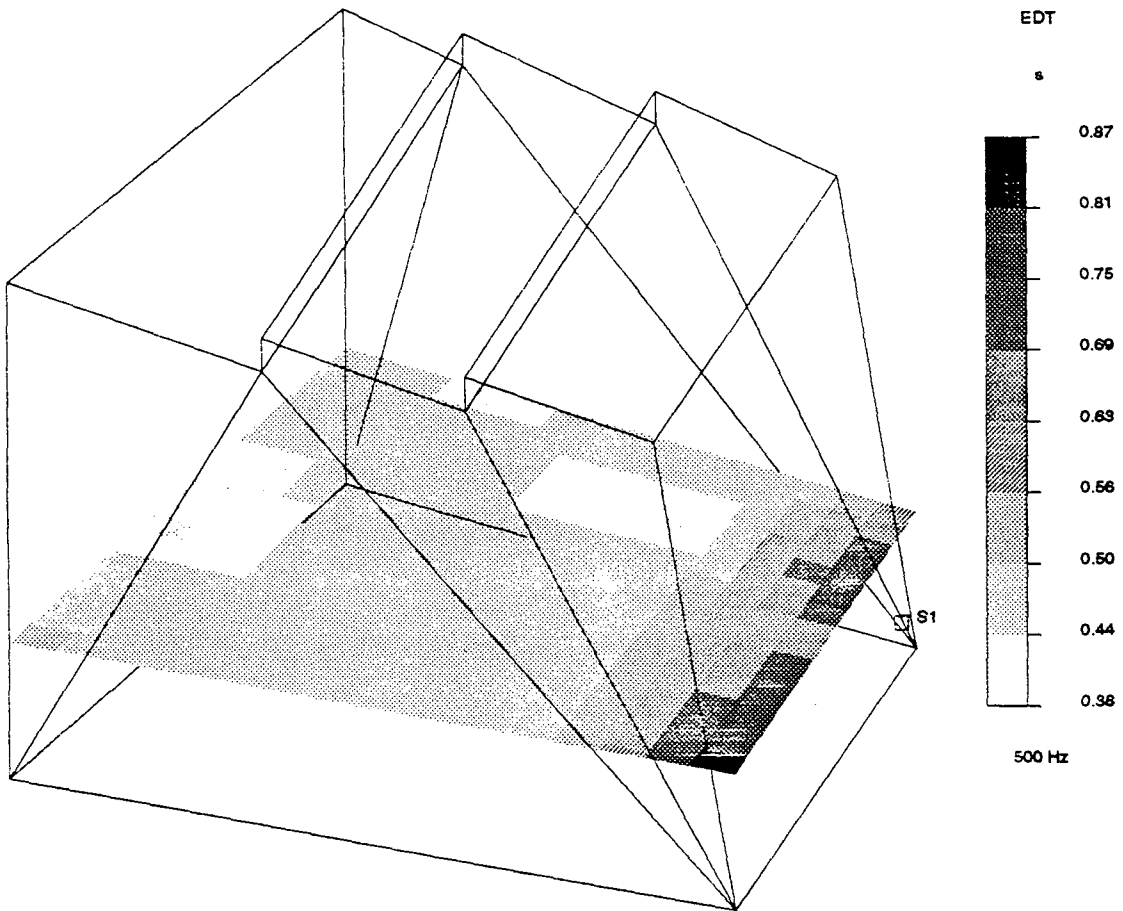


FIGURA AII.4 - Resultado Típico de EDT para 500 Hz

# RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

Rev 2.0A WINDOWS 15-AUG-1993

RAYNOISE - SYSTEM FOR GEOMETRICAL ACOUSTICS

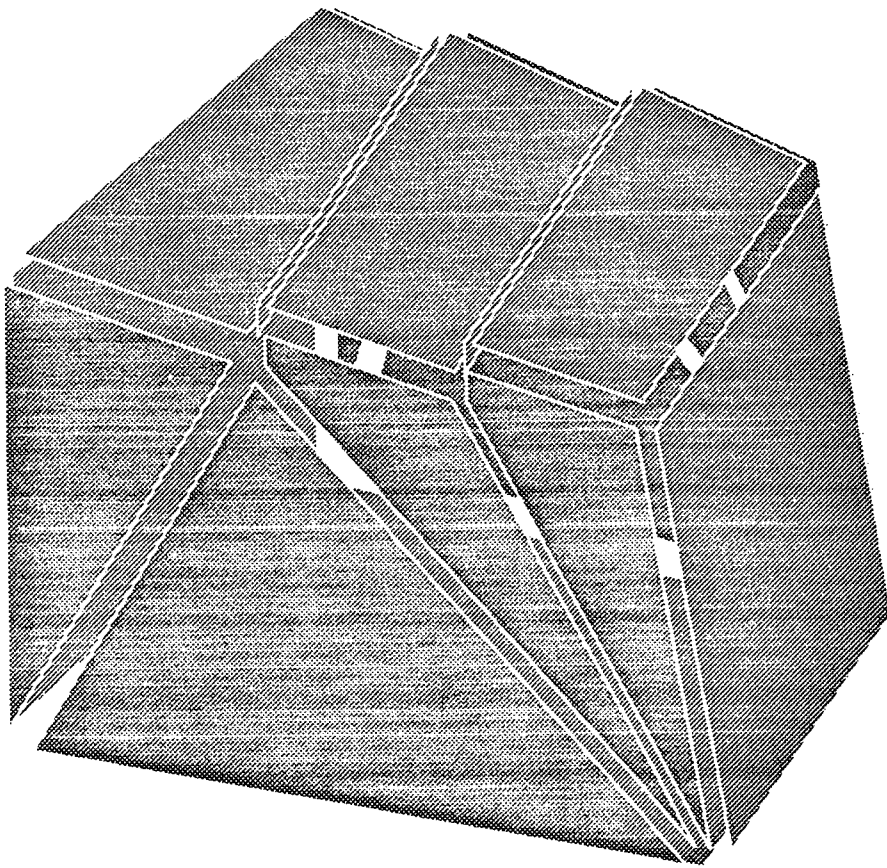


FIGURA AII.5 - Superfícies que compõem o modelo da câmara reverberante do INMETRO

## **ANEXO III**

*(fotografias da etapa experimental da pesquisa - montagem dos ensaios no  
Laboratório de Ensaio Acústicos - INMETRO)*

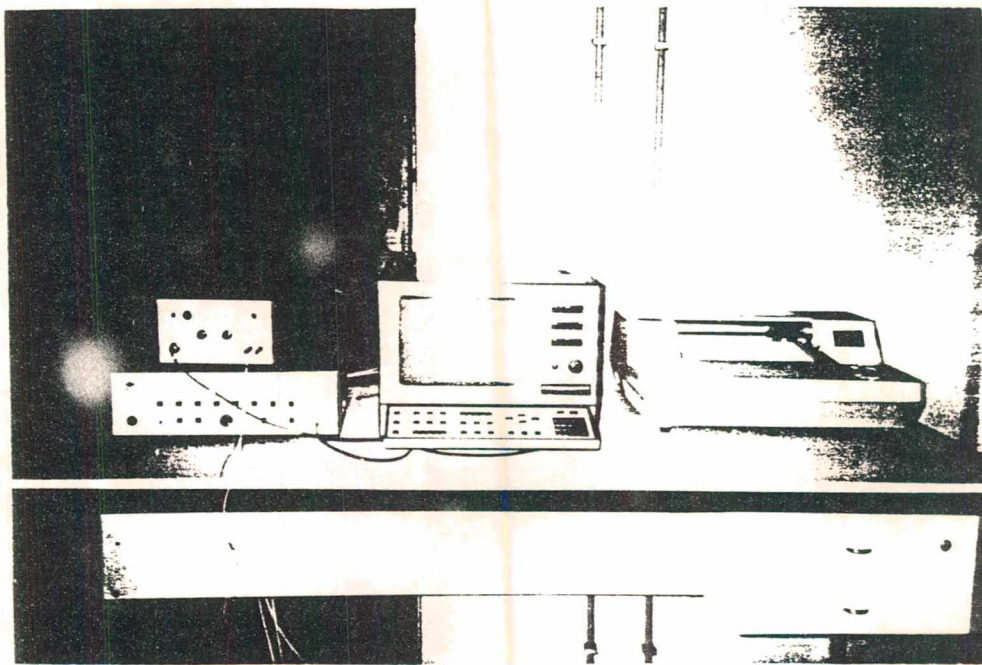


FIGURA AIII.1 - Equipamentos utilizados na medição de tempo de reverberação

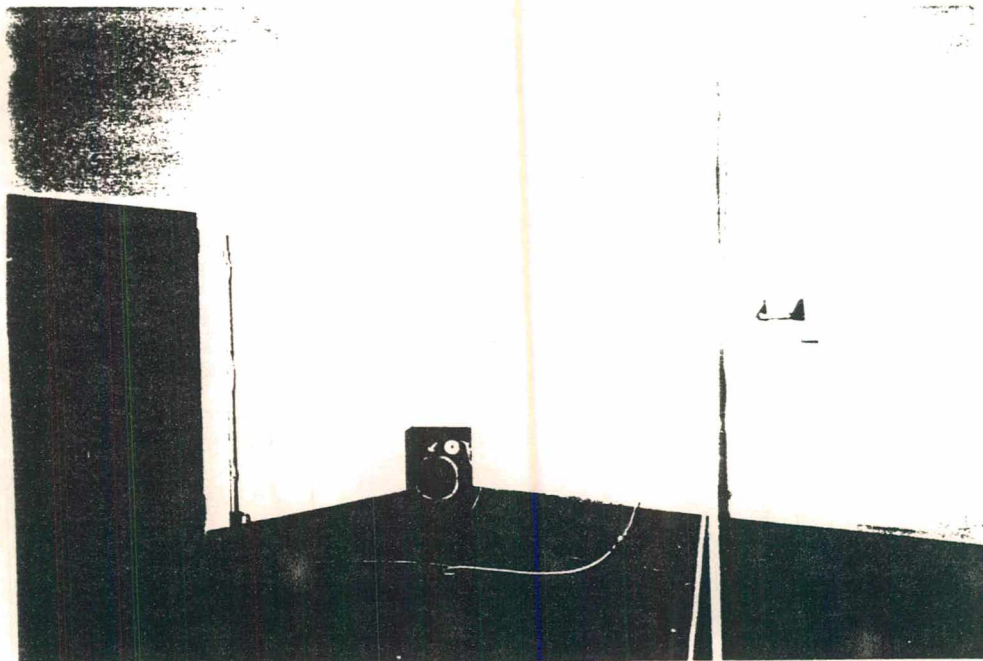


FIGURA AIII.2 - Câmara reverberante (INMETRO) - fonte sonora e microfones

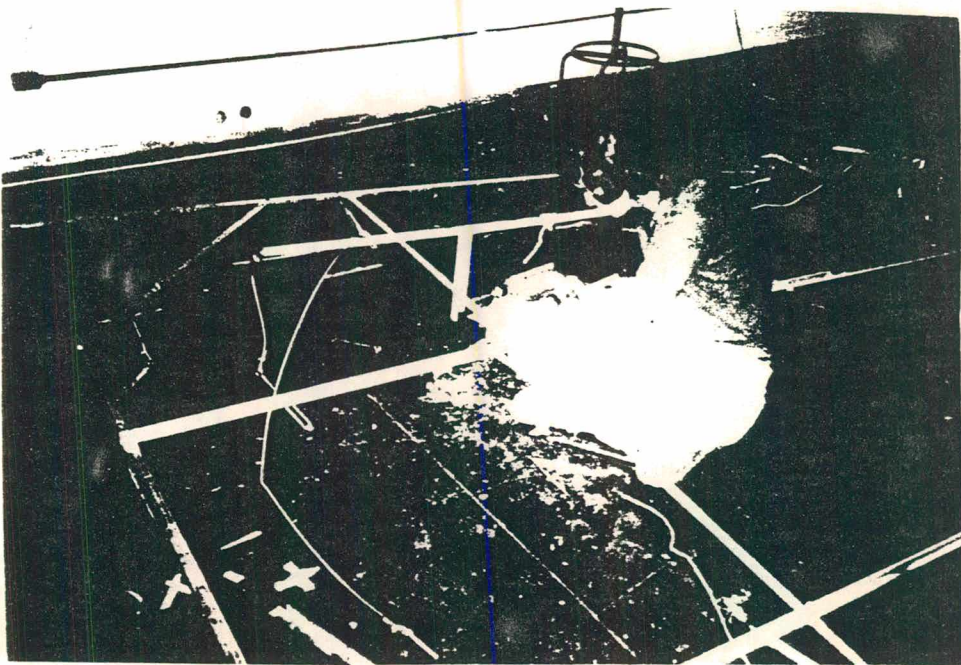


FIGURA AIII.3 - Confecção da estrutura de sustentação dos *baffles* (duas fases)



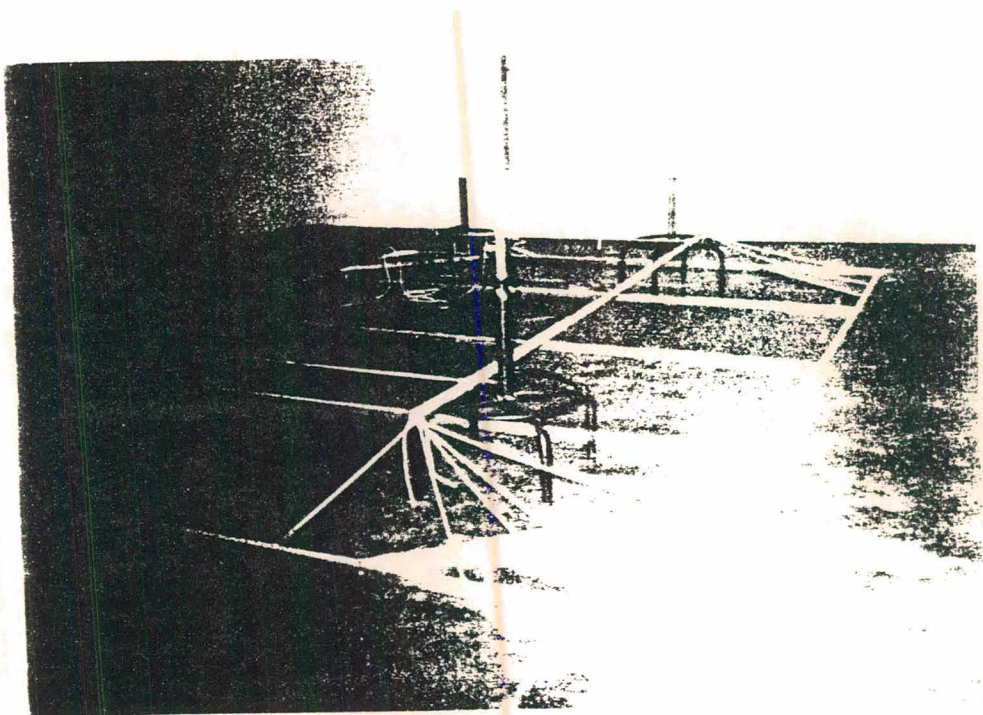


FIGURA AIII.4 - Montagem da estrutura metálica de sustentação dos *baffles*

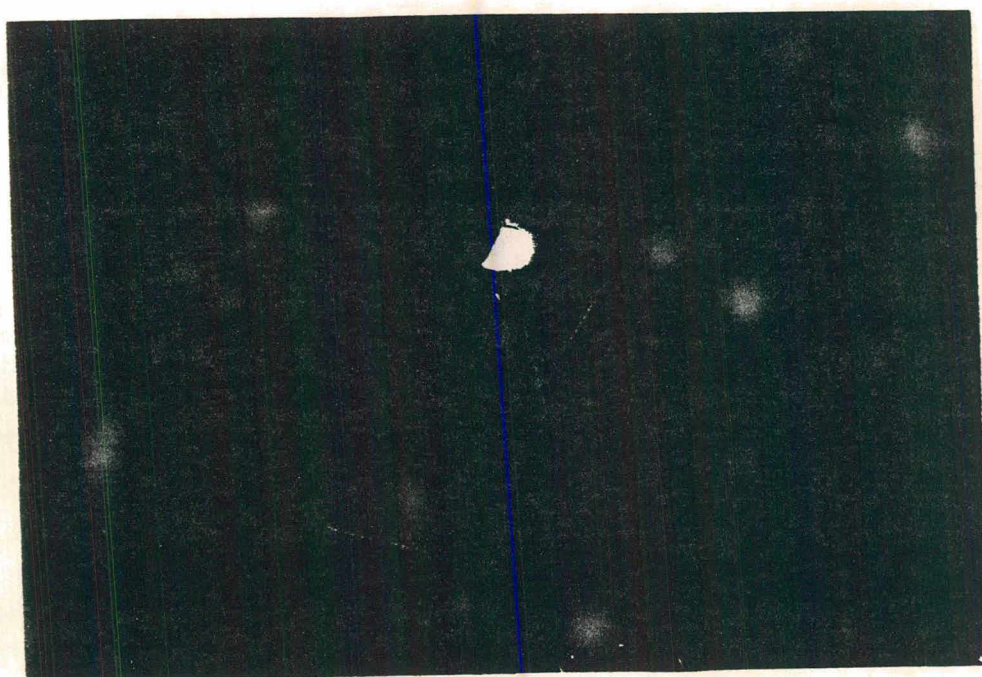


FIGURA AIII.5 - Fixação das roldanas para elevação da estrutura de sustentação dos baffles

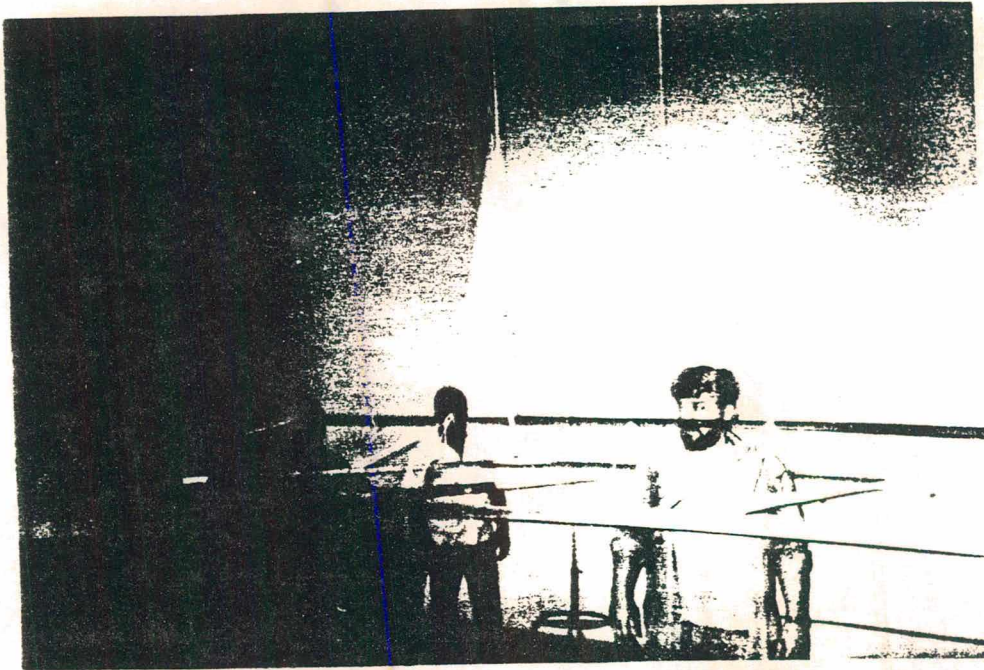


FIGURA AIII.6 - Sistema de elevação da estrutura de sustentação dos *baffles* (duas fases)

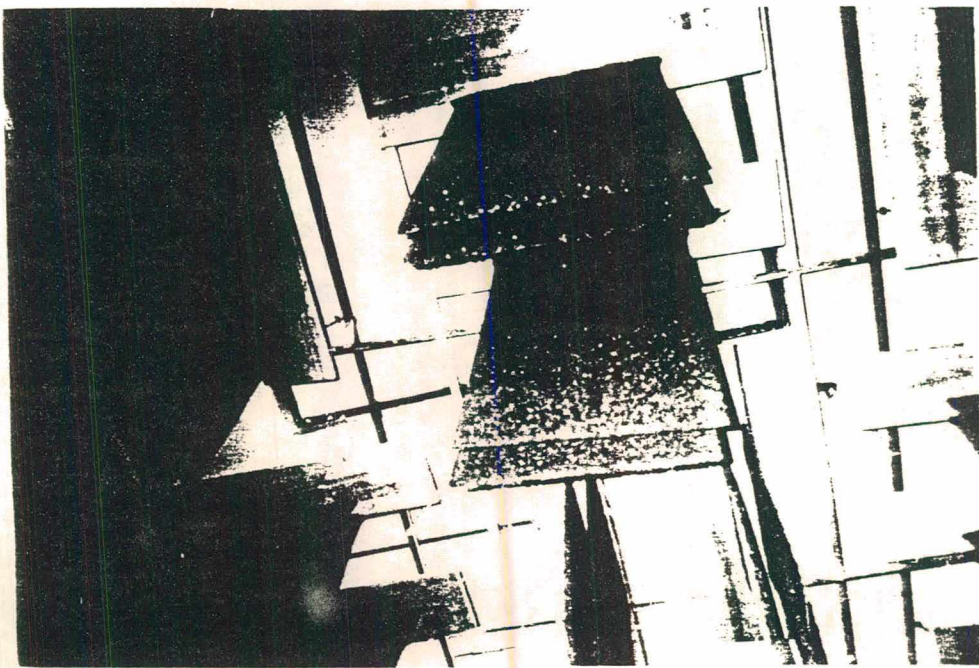
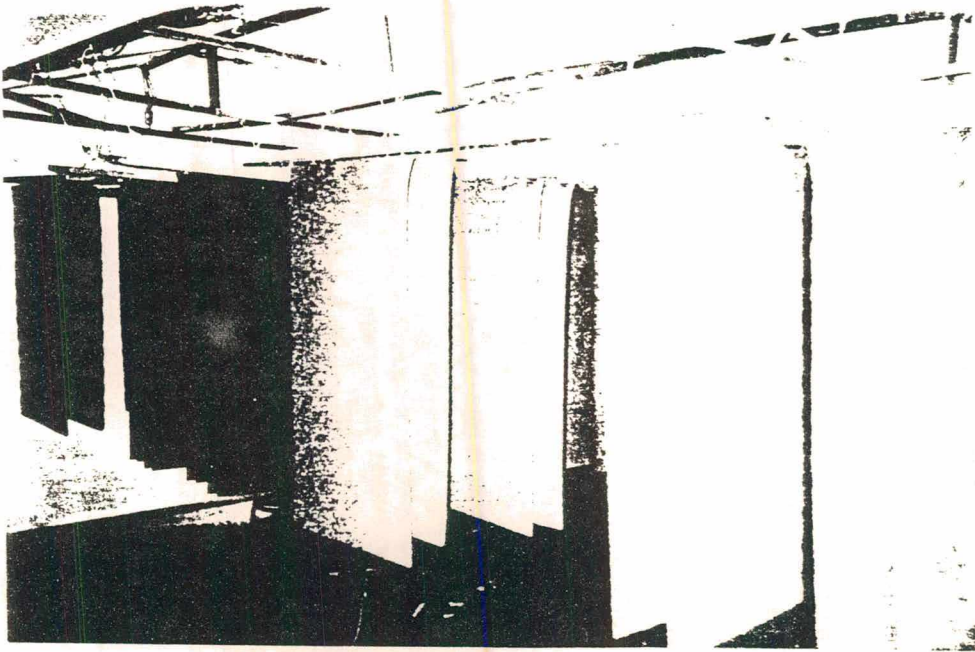


FIGURA AIII.7 - Baffles com espaçamento de ar (duas vistas)

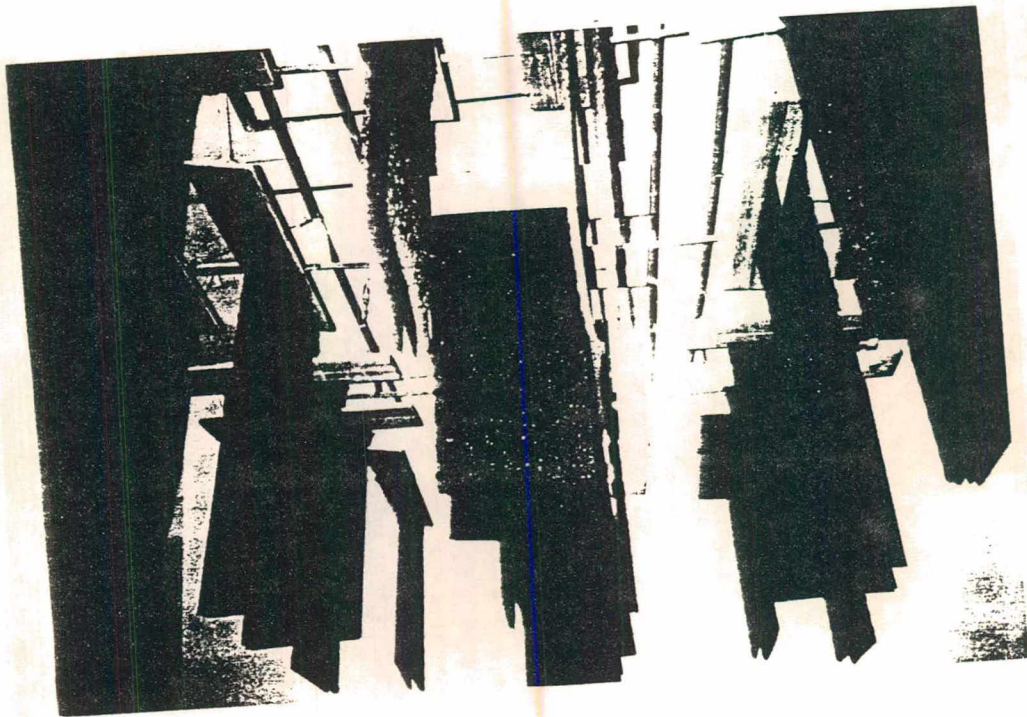


FIGURA AIII.8 - Baffles com espaçamento de ar no teto da câmara

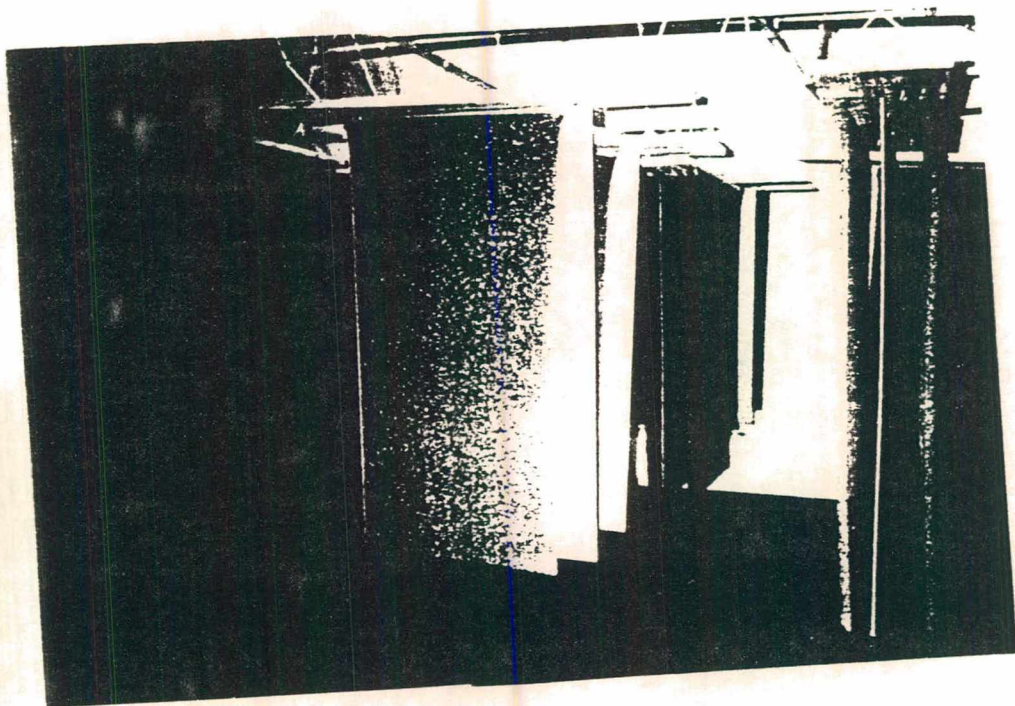


FIGURA AIII.9 - Baffles com chapa de madeira