

MARCELO DE GODOY

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS PRÁTICOS DE
MONTAGEM NOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE ABSORÇÃO SONORA
DE SISTEMAS DE FORRO SUSPENSO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia**

**São Paulo
2004**

ON

MARCELO DE GODOY

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS PRÁTICOS DE
MONTAGEM NOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE ABSORÇÃO SONORA
DE SISTEMAS DE FORRO SUSPENSO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia**

**Área de concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador: Professor Doutor
Sylvio Reynaldo Bistafa**

**São Paulo
2004**

Para meu pai.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente ao meu orientador neste trabalho, Prof. Dr. Sylvio Bistafa, pelo apoio e pela fundamental fonte de conhecimentos, assim como pela paciência durante as repentinas mudanças de tema e as minhas ausências, às vezes um tanto quanto prolongadas.

Agradeço ao Prof. Dr. João Gualberto A. Baring, responsável por minha iniciação profissional na Acústica, por ter sido meu primeiro professor de Acústica, e pelo suporte tão importante durante nossa convivência no Laboratório de Acústica.

Também devo muito ao chefe e pesquisador MSc. Peter Joseph Barry, minha eterna fonte de respostas a qualquer hora, pelo apoio incondicional e imprescindível para a conclusão desta pesquisa, pela amizade, pelas boas risadas e pelos assuntos descontraídos, mesmo quando a situação não era de pura alegria.

Ao Dr. Fulvio Vittorino, que como chefe ou pesquisador, sempre esteve solícito a esclarecer dúvidas, a dar conselhos e a autorizar o que fosse preciso para a conclusão deste trabalho.

Aos técnicos Paulo Carnio e José Paulo dos Santos, companheiros de laboratório, pela força e pela amizade a qualquer momento, sem as quais nada teria saído do papel.

A Priscila Ribeiro dos Santos, por sua participação especial, cheia de leveza e descontração.

Agradeço ao IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, que tornou possível este trabalho, fornecendo toda a estrutura necessária.

Também devo muito à Prof^ª. Dra. Stellamaris R. Bertolli, por seus conhecimentos, seus conselhos e sua simpatia, e pela gentileza de participar das bancas de qualificação e de defesa deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Arlindo Tribess, pelos conselhos e dicas, e por ter aceitado a incômoda tarefa de ter que estudar uma Acústica tão específica para participar das bancas de qualificação e defesa.

Ao Dr. Marco Nabuco, pelas valiosas dicas acústicas e burocráticas de quem conhece o assunto.

Obrigado também à Isover e a Carlos Caruy, pela gentileza no fornecimento das amostras de ensaio.

E a tantos outros que, com certeza, colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Ensaio de amostras “tipo E”	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura do Trabalho	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. O pioneirismo de Sabine	5
2.2. A fórmula de Sabine: evoluções e alternativas	6
2.3. Fontes de discrepâncias	8
2.4. A norma ISO 354 (2003).....	11
2.5. Ensaio de forros suspensos	13
3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	17
3.1. Mecanismos de absorção sonora	17
3.1.1. Atenuação sonora do ar	17
3.1.2. Absorção sonora devido à reflexão	18
3.1.3. Painéis vibrantes	19
3.1.4. Painéis perfurados	19
3.1.5. Absorvedores de painel	20
3.1.6. Absorvedores discretos	22
3.1.7. Materiais porosos ou fibrosos	23
3.2. Quantificação da absorção sonora	26
3.3. Medição da reverberação e cálculo da absorção sonora	27
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	34
4.1. Procedimento de ensaio	35
4.2. Painéis de forro	36
4.3. Suporte de madeira e perfilado metálico	37
4.4. Parâmetros estudados	39

4.4.1. Influência da absorção sonora do suporte de madeira	39
4.4.2. Influência da vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante	39
4.4.3. Influência de aberturas controladas nos painéis da amostra	40
4.4.4. Influência da variação do volume da câmara reverberante devido à presença da amostra	40
4.4.5. Verificação da presença de modos acústicos no interior do volume delimitado pelo suporte de madeira	41
4.4.6. Influência da exposição das laterais dos painéis de forro	42
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	45
5.1. Coeficientes de absorção sonora da amostra - montagem tipo A	45
5.2. Absorção sonora do suporte de madeira	49
5.3. Vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante...	53
5.4. Exposição das laterais dos painéis de forro	57
5.5. Aberturas controladas nos painéis de forro	62
5.6. Presença de modos acústicos no interior do volume delimitado pelo suporte de madeira	66
5.7. Variação do volume da câmara reverberante sobre os cálculos devida à presença da amostra	69
6. CONCLUSÕES	72
6.1. Considerações gerais	72
6.2. Influência da absorção sonora do suporte de madeira	73
6.3. Influência da vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante	74
6.4. Influência de aberturas controladas nos painéis da amostra.....	74
6.5. Influência da exposição das laterais dos painéis de forro	75
6.6. Verificação da presença de modos acústicos no interior do volume delimitado pelo suporte de madeira	76
6.7. Influência da variação do volume da câmara reverberante sobre os cálculos devida à presença da amostra.....	78
6.8. Comentários sobre a incerteza das medições	78
6.9. Considerações finais	79
6.10. Propostas para novas pesquisas	79
ANEXO - MÉTODO DE MEDIÇÃO POR RESPOSTA IMPULSIVA INTEGRADA E MLS	81
A.1. Sistema de medições do Laboratório de Acústica do IPT	81
A.2. A resposta impulsiva de sistemas LIT e a integral de convolução	83
A.3. Método de resposta impulsiva integrada em acústica	85
A.4. Medições utilizando sinais MLS	87
LISTA DE REFERÊNCIAS	92

APÊNDICE - QUALIFICAÇÃO DA CÂMARA REVERBERANTE DO LAC	AP-1
AP.1. Características da câmara reverberante	AP-1
AP.2. Exigências da norma e o processo de qualificação	AP-2
AP.3. Processo de qualificação	AP-5
AP.4. Resultados	AP-6

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Modos acústicos axiais de primeira, segunda e terceira ordens relativos ao comprimento e à largura do espaço de ar enclausurado.	42
Tabela 5.1	Dados do ensaio com a amostra disposta no piso da câmara.	46
Tabela 5.2	Comparação dos dados do ensaio com a amostra disposta no piso da câmara, com a película plástica para cima e para baixo.	48
Tabela 5.3	Comparação dos valores de absorção sonora do suporte de madeira, dos painéis de forro e da montagem completa.	50
Tabela 5.4	Comparação dos coeficientes de absorção sonora da amostra completa por dois métodos de cálculo.	52
Tabela 5.5	Dados dos ensaios das três configurações de vedação suporte-piso.	56
Tabela 5.6	Dados dos ensaios das três configurações de vedação entre painéis.	60
Tabela 5.7	Dados dos ensaios de três configurações de abertura no painel.	64
Tabela 5.8	Comparação dos resultados da amostra com e sem a presença da tábua.	67
Tabela 5.9	Comparação dos coeficientes de absorção sonora conforme dois tipos de cálculo.	67
Tabela A.1	Comparação entre medições por MLS e por sinal interrompido.	90
Tabela AP.1	Valores máximos corrigidos de absorção sonora da câmara vazia.	AP-4
Tabela AP.2	Relações entre as principais medidas da câmara.	AP-7
Tabela AP.3	Coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.	AP-11
Tabela AP.4	Média dos coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.	AP-12

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Montagem de amostra tipo E-300.	3
Figura 3.1	Corte de um absorvedor de painel.	20
Figura 3.2	Ressonador de Helmholtz.	22
Figura 3.3	Material fibroso ou poroso disposto junto à parede rígida.	24
Figura 3.4	Material fibroso ou poroso disposto distanciado da parede rígida.	25
Figura 3.5	Comparação dos coeficientes de absorção sonora de painéis de lã de rocha de 30 mm de espessura (a) montados junto à parede de concreto; (b) montados distanciadados de 50 mm da parede de concreto. (Fonte: KUTTRUFF, 1991).	26
Figura 3.6	Cálculo do tempo de reverberação a partir do decaimento sonoro.	29
Figura 4.1	Amostra tipo E-300.	34
Figura 4.2	Pontos de microfone e de fonte utilizados nos ensaios.	36
Figura 4.3	Detalhe do suporte de madeira.	37
Figura 4.4	Perfilado metálico em T apoiado no perfil em L.	38
Figura 4.5	Corte com as dimensões do perfil de alumínio em T.	38
Figura 4.6	Esquema da abertura no painel de forro.	40
Figura 4.7	Suporte sem e com a tábua de madeira disposta diagonalmente.	41
Figura 4.8	Situação real de montagem do sistema de forro suspenso.	42
Figura 4.9	Detalhe da montagem E-300.	43
Figura 4.10	Montagem E-300 com as juntas entre painéis de forro cobertas.	43
Figura 5.1	Amostra disposta no piso da câmara reverberante.	46
Figura 5.2	Coefficientes de absorção sonora da amostra disposta no piso da câmara.	47
Figura 5.3	Comparação entre amostras dispostas no piso da câmara.	49
Figura 5.4	Comparação dos valores de absorção sonora do suporte de madeira, dos painéis de forro e da montagem completa.	51
Figura 5.4	Comparação dos coeficientes de absorção sonora da amostra completa por duas formas de cálculo.	49
Figura 5.5	Comparação dos coeficientes de absorção sonora da amostra completa por duas formas de cálculo.	53
Figura 5.6	Apoio do perfilado.	54
Figura 5.7	Disposição dos painéis.	54
Figura 5.8	Amostra sem vedação montada na câmara reverberante.	54
Figura 5.9	Fresta entre o suporte e o piso da câmara.	55
Figura 5.10	Detalhe da vedação com a fita adesiva.	55
Figura 5.11	Trecho descoberto.	55
Figura 5.12	Amostra com dupla vedação suporte-piso montada na câmara reverberante.	56
Figura 5.13	Comparação entre as configurações de vedação suporte-piso.	57
Figura 5.14	Vedação com a fita adesiva.	58
Figura 5.15	Detalhe da vedação.	58
Figura 5.16	Amostra com vedação entre painéis montada na câmara reverberante.	58

Figura 5.17	Amostra com dupla vedação entre painéis montada na câmara reverberante.	59
Figura 5.18	Comparação entre as configurações de vedação entre painéis	61
Figura 5.19	Corte do painel.	63
Figura 5.20	Destacamento da parte cortada.	63
Figura 5.21	Detalhe da abertura.	63
Figura 5.22	Posicionamento da abertura.	63
Figura 5.23	Ampliação da abertura.	63
Figura 5.24	Posicionamento da nova abertura.	63
Figura 5.25	Comparação entre as configurações de abertura no painel.	65
Figura 5.26	Posicionamento da tábua.	66
Figura 5.27	Disposição da tábua.	66
Figura 5.28	Comparação dos resultados da amostra com e sem a presença da tábua.	68
Figura 5.29	Comparação dos coeficientes de absorção sonora conforme dois tipos de cálculo.	71
Figura A.1	Sistema de medição de tempo de reverberação.	82
Figura A.2	Comparação entre as médias dos tempos de reverberação por ambos os métodos de medição	91
Figura A.3	Comparação entre os desvios-padrão de ambos os métodos.	91
Figura AP.1	Planta da câmara reverberante com indicações da posição da amostra e dos pontos de microfone.	AP-8
Figura AP.2	Amostra utilizada nos testes, composta de painéis de espuma de poliuretano.	AP-9
Figura AP.3	Posicionamento dos difusores.	AP-10
Figura AP.4	Coefficientes de absorção sonora por área instalada de difusores	AP-12
Figura AP.5	Média dos coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.	AP-13
Figura AP.6	Curvas dos tempos de reverberação da câmara vazia para cada área instalada de difusores.	AP-14
Figura AP.7	Curvas da absorção sonora da câmara vazia para cada área instalada de difusores.	AP-15
Figura AP.8	Cavidades e vedação entre o pórtico e as câmaras.	AP-16
Figura AP.9	Curvas de absorção sonora da câmara vazia e com difusores (49 m ²), com e sem a vedação das frestas com perfis metálicos	AP-17
Figura AP.10	Curva de absorção sonora da configuração final da câmara	AP-17

RESUMO

Este trabalho apresenta e analisa uma série de resultados de medições de absorção sonora de uma amostra de forro suspenso, no intuito de investigar a influência de parâmetros práticos de montagem da amostra sobre os coeficientes de absorção sonora obtidos. O material utilizado nos ensaios é mantido o mesmo, enquanto são variados, independentemente, apenas os parâmetros de montagem estudados. Também são analisados alguns parâmetros de cálculo dos coeficientes de absorção sonora. Os ensaios foram realizados em uma câmara reverberante e executados conforme o método da norma ISO 354 (2003). A montagem da amostra foi feita seguindo o “tipo E-300” da mesma norma, utilizando painéis de lã de vidro revestidos na face aparente com uma película plástica. Também são apresentados os dados da qualificação da câmara reverberante, feita de acordo com a metodologia apresentada no Anexo A da norma ISO 354 (2003), assim como uma introdução ao método de medição por Resposta Impulsiva Integrada e MLS utilizado nos ensaios. Os resultados da pesquisa demonstram que alguns dos parâmetros estudados podem influir consideravelmente sobre os resultados finais, enquanto outros aparentam não ter importância sobre os mesmos.

ABSTRACT

This work presents the results of an investigation into the influence of mounting conditions on the measured sound absorption of a suspended ceiling specimen. A series of measurements and analyses were carried out using a fixed standard sample, varying independently different mounting parameters and introducing controlled leaks. The measurements were performed in a reverberation room using the methods of the ISO 354 (2003) standard. The mounting system chosen was the “type E-300” of the standard and the test specimen consisted of fiberglass wool ceiling panels covered with a plastic film on the exposed face. Initially, the reverberation chamber was re-qualified in accordance with Annex A of the latest version of the standard (2003) - the data are presented. Also, some parameters effecting the calculation of the sound absorption coefficients are considered and an introduction to the Integrated Impulse Response measuring method and MLS signals, used in the tests, are presented. The results show, specifically for suspended ceilings, that some of the specimen mounting parameters appear to have considerable influence over the test results, while others seem to have no importance to the final coefficients.

1 INTRODUÇÃO

O conceito de absorção sonora como entendido hoje nasceu no final do século XIX, com as pesquisas do físico americano Wallace Clement Sabine. Este foi encarregado de solucionar problemas acústicos do auditório do Fogg Art Museum (SABINE, 1900), quando era professor da cadeira de física na Universidade de Harvard. Até então, nenhuma formulação havia sido desenvolvida para o comportamento do som em um recinto fechado. A partir de estudos utilizando um tubo de órgão sintonizado em 512 Hz e um cronômetro, Sabine relacionou formalmente o comportamento do som reverberante em um ambiente fechado com a absorção sonora do mesmo.

Desde então, a questão da absorção sonora tem sido exaustivamente estudada em suas mais diversas formas e aplicações. Novas teorias descrevendo os fenômenos envolvidos foram formuladas, novos materiais absorventes e suas aplicações foram desenvolvidos, métodos de ensaio e equipamentos de medição foram criados e aprimorados continuamente.

Ainda assim, dúvidas e dificuldades até hoje permeiam os conceitos envolvidos. A falta de teorias definitivas sobre o campo difuso e o efeito de bordas (NABUCO, 2002) faz com que os métodos de ensaio de absorção sonora ainda apresentem incertezas relativamente altas quando comparados com outros tipos de medições acústicas. Este fato, conseqüentemente, reflete-se na especificação e na aplicação de materiais absorventes, colaborando com erros de projetos e com a disseminação de conceitos equivocados.

O principal método de ensaio de absorção sonora em laboratório é o chamado método de câmara reverberante, considerado o método que fornece resultados mais próximos aos de uma aplicação real do produto testado. A norma ISO 354 (2003), que o Laboratório de Acústica do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) utiliza para realizar seus procedimentos de ensaio, é a principal norma internacional para ensaios de absorção sonora em câmara reverberante. Esta norma apresenta os conceitos, determina o método de medição e os cálculos necessários, qualifica a câmara reverberante e, além disso, determina uma série de condições às quais a amostra deve ser submetida, quanto ao tipo, às dimensões e aos tipos de montagem da mesma na câmara. Este último parâmetro é identificado como sendo

uma das fontes das incertezas de resultados citados anteriormente, e é o foco desta pesquisa.

1.1 Ensaio de amostras “tipo E”

A montagem “tipo E” da norma ISO 354 busca simular um sistema de forro suspenso, ou seja, um sistema de forro em que há um espaço de ar entre os painéis de forro e a laje (ou telhado, etc.), chamado *plenum*. Esta configuração é muito comum em aplicações práticas, como em escritórios, supermercados, pavilhões, auditórios, etc. O plenum, no caso, geralmente é utilizado para acomodar instalações elétricas, instalações de controle de incêndio e dutos de ar-condicionado.

Um sistema de forro com plenum é capaz de proporcionar altos coeficientes de absorção sonora, dependendo das características e da instalação dos painéis de forro utilizados. Este atributo é largamente utilizado em tratamentos acústicos de ambientes nos quais se deseja atingir uma redução do nível de ruído através do controle da reverberação. Um exemplo típico é o dos escritórios panorâmicos, nos quais os níveis de ruído produzidos costumam ser um fator de perturbação e de perda de produtividade (ASID, 1996). Além de promover a redução do ruído, um sistema de forro adequado pode melhorar a privacidade da fala em ambientes amplos.

A determinação dos coeficientes de absorção sonora de um sistema de forro suspenso pelo método de câmara reverberante é muito mais complexa do que um ensaio de um sistema de forro simples, sem plenum. Diante da freqüente inviabilidade prática da instalação de um sistema de forro com plenum em uma câmara reverberante, a montagem “tipo E” da norma ISO 354 determina que o ensaio seja feito em um sistema invertido, montado no piso da câmara, consistindo em um suporte estanque no qual é fixada uma estrutura delgada (em geral, um perfilado metálico) na qual os painéis de forro são acomodados. Desta forma, tem-se um sistema em que os painéis de forro e o suporte delimitam um volume de ar, simulando o plenum (ver Capítulos 4 e 5). A fotografia da Figura 1.1 ilustra este tipo de montagem.

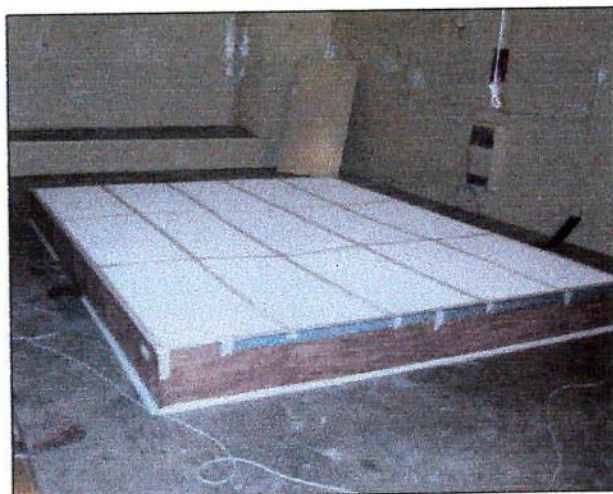


Fig.1.1: Montagem de amostra tipo E-300.

Este tipo de montagem é o mais utilizado por laboratórios no mundo todo para se testar um sistema de forro com plenum. No entanto, constatam-se grandes desvios quando são comparados os valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos por laboratórios diferentes (ver Capítulo 2). Apesar de haver um estudo anterior sobre as causas de tais discrepâncias (ver Capítulo 2), o problema nunca foi estudado minuciosamente.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa propõe-se a analisar algumas das variáveis mais significativas da montagem de amostra “tipo E”, buscando identificar, qualificar e quantificar as principais causas de interferências nos resultados do ensaio de absorção sonora em câmara reverberante, devidas a detalhes de montagem da amostra. Também são analisados alguns parâmetros de cálculo dos coeficientes de absorção sonora. Análises paramétricas independentes demonstrarão o grau de interferência de cada variável. Além disso, buscar-se-á nas principais teorias da acústica um embasamento para os resultados observados.

1.3 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica do tema, apresentando as evoluções práticas e teóricas que envolveram as medições de absorção sonora desde o final do século XIX, assim como as limitações que ainda hoje persistem. Também neste capítulo são discutidos itens importantes da norma ISO 354 (2003).

O Capítulo 3 apresenta os conceitos fundamentais associados ao ensaio de absorção sonora em câmara reverberante, incluindo a descrição do método apresentado na norma citada.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia experimental para os ensaios das amostras de forro conforme a montagem “tipo E-300” da norma ISO 354. O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados dos ensaios. No Capítulo 6 são feitas as conclusões sobre o trabalho, assim como recomendações para novas pesquisas.

A norma ISO 354 possibilita que a medição dos tempos de reverberação seja feita segundo dois métodos diferentes: por sinal interrompido ou por resposta impulsiva integrada. O segundo método será utilizado, por ser mais moderno, mais rápido e, notadamente, fornecer resultados mais confiáveis. O Anexo dedica-se exclusivamente a apresentar uma introdução ao método de medição por resposta impulsiva integrada utilizando o sinal MLS (do inglês, “Maximum Length Sequence”).

No Apêndice é apresentada uma descrição da câmara reverberante nº1 do Laboratório de Acústica do IPT, assim como de seu processo de qualificação. Não é o objetivo desta pesquisa o estudo aprofundado da difusão sonora na câmara. Assim, a qualificação antecede aos testes visando apenas garantir a uniformidade do campo sonoro, conforme os requisitos apresentados na norma ISO 354.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O pioneirismo de Sabine

No ano de 1895, a direção do Fogg Art Museum, museu de artes da Universidade de Harvard, em Boston, estava descontente com o seu recém inaugurado auditório. A imponente sala apresentava um sério problema: era difícil a compreensão de aulas e palestras por seus ouvintes. Disposta a resolver o problema, a direção do museu contratou para tal o então professor da cadeira de física da mesma Universidade, Wallace Clement Sabine (1868-1919).

Ao iniciar seu trabalho, Sabine deparou-se com a escassa literatura sobre o tema, que fornecia apenas dados esparsos e incertos sobre o comportamento do som em ambientes fechados, levando o pesquisador a iniciar seus estudos sem nenhum embasamento matemático precedente.

Em 1900, cinco anos após o início dos estudos, Sabine publicou no periódico “The American Architect” um trabalho intitulado “Reverberation” (SABINE, 1992), no qual o pesquisador discorreu sobre o conceito de *reverberação*, como sendo a “permanência” do som em um ambiente fechado, devido às inúmeras reflexões do som nas superfícies deste ambiente. Apesar de o tema já ter sido estudado anteriormente (HENRY, 1981; RAYLEIGH, 1945), nenhuma relação teórica havia sido desenvolvida.

A inspiração científica de Sabine levou-o a associar, matematicamente, o fenômeno da reverberação a outro, que intitulou *absorção sonora*, pelo qual materiais convertem parte da energia acústica incidente sobre eles em outras formas de energia, principalmente calor. Assim, Sabine atribuía certo “poder de absorção sonora” a vários tipos de materiais, constatando que a falta de materiais com “poder de absorção sonora” relativamente alto resultava em uma maior reverberação no ambiente.

Disposto a quantificar esta relação, Sabine desenvolveu um método para medir o tempo de duração do som reverberante utilizando-se de um tubo de órgão (sintonizado em 512 Hz), um cronômetro e os ouvidos. Após realizar experimentos em diversos tipos de salas, e empregando diversos voluntários para as medições,

Sabine desenvolveu a seguinte expressão matemática, relacionando o chamado *tempo de reverberação* (T , em segundos), o volume do ambiente (V , em m^3) e a *área equivalente de absorção sonora* (A , em m^2 [sabine]¹) do mesmo (ver Capítulo 3).

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad (2.1)$$

Com esta fórmula, que atualmente é empregada pelas principais normas de cálculo de coeficientes de absorção sonora em câmaras reverberantes (ISO 354 (2003); ASTM C453 (1999); BS 3638 (1963)), Sabine consolidou o que possivelmente foi a descoberta mais importante no estudo da acústica de salas até hoje. Além de possibilitar o desenvolvimento de testes para a determinação dos coeficientes de absorção sonora de materiais (que seriam implementados mais tarde), sua aplicação permite, em teoria, determinar-se o tempo de reverberação de um ambiente antes mesmo de este ser construído, representando assim um grande avanço na arquitetura e na engenharia da época, e favorecendo a comunicação e as artes.

2.2 A fórmula de Sabine: evoluções e alternativas

Foram necessários 30 anos até que a expressão desenvolvida por Sabine fosse formalmente questionada. Pesquisas envolvendo testes em câmaras reverberantes deram margem a uma série de dúvidas sobre a validade dos resultados alcançados por Sabine, especificamente em relação a sua fórmula.

Ao constatar que, na fórmula de Sabine, o tempo de reverberação não convergia para zero quando os coeficientes de absorção sonora convergiam para seu máximo, Eyring desenvolveu uma nova expressão, baseada no fato de que o som é absorvido apenas durante a reflexão em uma superfície, e não de forma contínua. A proposta de Eyring admitia um novo mecanismo para o cálculo da absorção sonora a partir dos coeficientes de absorção sonora, mecanismo este logarítmico e não mais linear.

De fato, em 1930, em um trabalho publicado no *Journal of the Acoustical Society of America*, Eyring propôs a seguinte fórmula como alternativa à de Sabine (EYRING, 1930):

¹ Inclui-se [sabine] após a área de absorção sonora para diferenciar esta unidade da medida de área física.

$$T = \frac{-0,16V}{S \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (2.2)$$

Sendo:

T o tempo de reverberação em uma dada faixa de frequências (s);

V o volume do ambiente (m^3);

S a área do ambiente (m^2);

$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum S_i \alpha_i$ = média ponderada dos coeficientes de absorção sonora do ambiente, em uma dada faixa de frequências (m^2 [sabine]).

Três anos depois, Sette publicou no mesmo periódico (SETTE, 1933) uma outra alternativa para a fórmula de Sabine, elevando a complexidade em relação à fórmula proposta por Eyring, pois, seguindo apontamentos de um trabalho publicado por Millington no ano anterior (MILLINGTON, 1932), a expressão para o cálculo do tempo de reverberação não mais admitia a média aritmética dos diversos coeficientes de absorção sonora dos materiais presentes no ambiente considerado. A expressão, conhecida como equação de Millington e Sette, é apresentada a seguir.

$$T = \frac{0,16V}{\sum -S_i \ln(1-\alpha_i)} \quad (2.3)$$

Sendo:

T o tempo de reverberação em uma dada faixa de frequências (s);

V o volume do ambiente (m^3);

S_i a porção de área do ambiente coberta com um determinado material (m^2);

α_i o coeficiente de absorção sonora do material que cobre a área S_i .

Em uma publicação de 1933, Eyring novamente voltaria ao assunto, debatendo sobre as alternativas propostas (EYRING, 1933).

Com o passar dos anos, a evolução tecnológica e novos estudos trouxeram muita polêmica ao assunto. Uma das fontes de dúvidas e de novas teorias foi um programa interlaboratorial de ensaios de absorção sonora em câmara reverberante, promovido

por L. Cremer em 1958, envolvendo vários países (KOSTEN, 1960). Opiniões contrastantes a respeito das fórmulas que deveriam ser empregadas para o cálculo dos coeficientes de absorção sonora em câmaras reverberantes dividiam os pesquisadores. Fitzroy demonstrou uma limitação na fórmula de Eyring, ao supor uma distribuição não uniforme dos coeficientes de absorção sonora nas superfícies da câmara reverberante (FITZROY, 1959). Em um artigo de 1966, Gomperts chegou a desqualificar todas as fórmulas então propostas, sugerindo um método puramente empírico para a determinação dos coeficientes de absorção sonora em câmara reverberante (GOMPERTS, 1966). Embleton, por sua vez, propôs uma modificação na fórmula de Eyring, baseada em um modelo simplificado do campo sonoro no interior de uma câmara reverberante em que a distribuição da absorção sonora é desigual (EMBLETON, 1971).

Mais recentemente, Hodgson desenvolveu trabalhos (HODGSON, 1993; 1996) em que compara características das fórmulas de Sabine e de Eyring quando utilizadas em ambientes que não necessariamente câmaras reverberantes, expondo as limitações de cada uma das fórmulas. Dance (DANCE ET. AL., 1999) validou a fórmula de Millington por meio de um programa computacional de simulação de campos sonoros.

Diante de todas as discussões teóricas e experimentais, a única certeza parece ser a falta de conclusões a respeito da fórmula ideal para o cálculo de coeficientes de absorção sonora em câmaras reverberantes. Talvez, por esta razão, a fórmula escolhida para tal, pela maioria das normas internacionais, desde o primeiro rascunho da ISO 354 (ISO, 1963), seja a expressão mais simples, ou seja, a pioneira fórmula de Sabine.

2.3 Fontes de discrepâncias

Um dos pontos centrais de toda discussão conceitual sobre absorção sonora é a *difusão sonora*. A falta de um campo sonoro difuso no interior de uma câmara reverberante é uma das principais fontes de discrepâncias de resultados entre ensaios executados em diferentes laboratórios. De fato, o campo difuso é uma idealização, um modelo teórico de um campo sonoro, sob o qual diversas teorias e métodos podem existir. A condição de contorno garantida pelo campo difuso ancora todos os

métodos de medição em câmara reverberante, incluindo o de absorção sonora. Assim, todas as fórmulas de cálculo de coeficientes de absorção sonora, apresentadas no item anterior, assumem como premissa a existência de um campo sonoro difuso. Todas as normas internacionais de medição de coeficientes de absorção sonora em câmara reverberante, incluindo a norma ISO 354, que será usada na parte experimental deste trabalho, especificam que o campo sonoro no interior da câmara deve ser “suficientemente” difuso. Por fim, a própria construção de uma câmara reverberante tem como propósito a obtenção de um campo sonoro difuso em seu interior.

Segundo sua definição mais conhecida, a difusão sonora ocorre quando há uniformidade de pressão sonora no ambiente. Ou seja, em qualquer ponto de um volume de ar no qual o campo sonoro seja considerado difuso, a pressão sonora deve ser a mesma. Esta definição foi formalmente repudiada por Schultz (SCHULTZ, 1971). Outra definição comum é a de que qualquer ponto de um campo sonoro difuso apresenta a mesma probabilidade de fluxo de energia acústica em todas as direções (JACOBSEN, 1979). Em outra definição, discorrida por Kuttruff (KUTTRUFF, 1991), o campo sonoro difuso é composto de infinitas ondas planas com fases aleatórias, propagando-se uniformemente em todas as direções.

Em um estudo recente, Jacobsen idealiza que o campo sonoro difuso pode ser obtido somente em campo livre, produzido por fontes sonoras distantes e incoerentes, gerando ruído aleatório, e distribuídas uniformemente em todas as direções (JACOBSEN e ROISIN, 2000). Esta condição, segundo o autor citado, se afasta da situação alcançada em uma câmara reverberante, em que geralmente apenas uma fonte sonora é utilizada de cada vez, e o campo difuso é propiciado pela geometria da câmara.

Para a maioria dos autores, porém, a difusão sonora pode ser suficientemente aproximada em uma câmara reverberante *grande e vazia*, dotada de *difusores* estáticos. Com exceção de baixas frequências, a saber, frequências abaixo da “frequência de Schroeder” (SCHROEDER, 1996), que apresentam baixa densidade modal no interior da câmara (KUTTRUFF, 1991), pode-se considerar que tal câmara reverberante, vazia e com difusores, quando devidamente qualificada (ver Apêndice),

apresenta um campo sonoro satisfatoriamente difuso tanto em decaimento como em regime permanente.

O consenso geral prossegue quando se considera que o campo difuso no interior de uma câmara reverberante é seriamente afetado pela presença de uma amostra com alta absorção sonora, posicionada em uma das superfícies da câmara. Desde a década de 30 (CHRISLER, 1934) busca-se descrever o efeito da presença de uma amostra de alta absorção sonora no campo difuso.

A deficiência no campo difuso é tida como a principal causa das discrepâncias entre resultados de ensaios de absorção sonora de diferentes laboratórios. Vários estudos foram feitos buscando modelar o campo difuso, ora utilizando-se equações de onda, ora medições de correlação, ora métodos estatísticos. Porém, a falta de um método definitivo para se quantificar a difusividade do campo sonoro (NABUCO, 2002), principalmente durante o decaimento, afasta as discussões de uma conclusão.

Outra importante fonte de discrepâncias entre resultados de ensaios de absorção sonora é a difração sonora que ocorre junto ao perímetro da amostra ensaiada, também conhecida como efeito de borda. O efeito das ondas difratadas faz com que os coeficientes de absorção sonora medidos na câmara reverberante sejam maiores do que os reais (KUTTRUFF, 1991). Pesquisas experimentais desenvolvidas por Chrisler (CHRISLER, 1934) e Bartel (BARTEL, 1981) apontam que os coeficientes de absorção sonora são sensivelmente dependentes da relação entre a área e o perímetro da amostra ensaiada.

Por enquanto, ainda não há um modelamento teórico totalmente aceito para o fenômeno, ainda que a complexidade e o impacto do problema sejam menores do que no caso da difusão sonora. Uma alternativa sensata para se minimizar as discrepâncias entre resultados de diferentes laboratórios e configurações de montagem da amostra, devido ao efeito de borda, é a limitação normativa de uma faixa estreita para a área da amostra, assim como de sua relação área/perímetro.

A norma ISO 354, por exemplo, determina que a amostra seja disposta na câmara reverberante formando um retângulo com área entre 10 m^2 e 12 m^2 (valores que devem ser corrigidos para câmaras reverberantes acima de 200 m^3), e que a proporção entre as dimensões dos diferentes lados do retângulo esteja entre 0,7 e 1.

Providências como estas não geram, necessariamente, uma determinação mais “fiel” dos coeficientes de absorção sonora obtidos, apenas diminuem as discrepâncias entre resultados de ensaios de um mesmo material realizados em diferentes locais ou condições de montagem. Porém, é fundamental a homogeneização das instruções de montagem de amostra pelas normas internacionais. Por exemplo, enquanto a norma ISO 354 determina que a área da amostra esteja entre 10 m^2 e 12 m^2 , a norma americana ASTM C423 recomenda que o valor de área da amostra seja de $6,69 \text{ m}^2$. Tal diferença entre as normas pode gerar discrepâncias entre os resultados dos ensaios de um mesmo material.

Outra fonte de discrepâncias entre resultados de ensaios é dada pelas características ambientais na câmara reverberante. Um trabalho da década passada (COPS ET AL, 1995) demonstra o impacto da absorção do ar nos coeficientes de absorção sonora medidos, particularmente em frequências acima de 2000 Hz. Felizmente, a norma ISO 354 (2003) contém uma formulação mais complexa do que a anterior para o cálculo da absorção sonora do ar.

2.4 A norma ISO 354 (2003)

A norma ISO 354 (2003) é adotada como padrão para os ensaios de absorção sonora do Laboratório de Acústica do IPT, assim como para os ensaios deste trabalho. Em relação à edição anterior, de 1985, algumas alterações foram feitas, com mais exigências em relação à aquisição e ao tratamento de dados, e incorporando uma série de definições de montagens especiais, importantes no contexto do presente trabalho, antes disponíveis apenas em um adendo publicado em 1997 (ISO, 1997).

O texto de introdução da norma busca explicar a razão de se utilizar uma câmara reverberante para a determinação dos coeficientes de absorção sonora de um material, argumentando que o campo difuso representa uma generalização de todos os campos sonoros aos quais a amostra considerada pode estar exposta. Conforme este texto, o campo sonoro no interior de uma câmara reverberante apropriadamente projetada aproxima-se do campo difuso ideal. Conforme já discutido no item 2.3, esta consideração é fundamental para o embasamento teórico dos cálculos que são apresentados posteriormente.

De acordo com o item 1 da norma, que define seu escopo, apenas os ensaios de absorção sonora em câmara reverberante são considerados. Outros ensaios de absorção sonora, como medições em ambientes diversos, ou medições feitas utilizando-se tubos de impedância ou outros tipos de equipamento, não são contemplados nesta norma.

Como outras normas internacionais sobre o mesmo assunto, a norma ISO 354 (2003) é baseada na fórmula de Sabine. O cálculo da área equivalente de absorção sonora da amostra é feito por meio da diferença entre as áreas equivalentes de absorção sonora da câmara com e sem amostra, acrescida de um termo de correção devido às condições ambientais. Caso a amostra seja uma superfície relativamente homogênea, disposta junto ao piso da câmara reverberante (característica de um material de *revestimento*) pode-se calcular os coeficientes de absorção sonora a partir da área equivalente de absorção sonora da amostra para cada faixa de frequências (ver Capítulo 3).

A área equivalente de absorção sonora da câmara é obtida por meio dos valores dos tempos de reverberação da sala. Segundo o item 3.2 da norma, o tempo de reverberação é o “tempo, em segundos, que seria necessário para o nível de pressão sonora decair de 60 dB após o desligamento da fonte sonora”. Conforme notas neste mesmo item, o decaimento de 60 dB é relativamente difícil de ser obtido, devido ao ruído de fundo na câmara e à limitação de potência dos equipamentos utilizados na maioria dos laboratórios. Assim, a norma admite que o tempo de reverberação possa ser calculado a partir de extrapolações lineares de decaimentos mais curtos.

Esta concessão fundamenta-se no fato de que o decaimento sonoro em um campo difuso apresenta um padrão *linear*, quando medido em nível de pressão sonora (dB) (KUTTRUFF, 1991), conforme define o item 3.1 da norma. Esta condição é idealizada e, em muitos casos, não é confirmada na prática, conforme discutido no item 2.3. O comportamento do decaimento é uma das informações características do campo sonoro, e uma das vertentes de toda a discussão sobre a difusão sonora.

O item 3 da norma apresenta ainda uma das principais alterações desta versão em relação à anterior: a inclusão da opção da utilização do método de medição dos tempos de reverberação por resposta impulsiva integrada, além do método tradicional

de medição por sinal interrompido. O Anexo deste trabalho faz uma introdução ao método de medição por resposta impulsiva integrada, que é utilizado na parte prática deste trabalho.

Outra mudança importante refere-se à quantidade mínima de medições do tempo de reverberação para compor a média que deverá ser usada nos cálculos posteriores (ver Capítulo 3). Enquanto a norma de 1985 exigia a medição de no mínimo 12 decaimentos, sendo no mínimo 3 pontos de microfone e 2 pontos de fonte sonora (para as faixas de frequência de 100 Hz a 250 Hz), a versão da norma de 2003 exige que sejam realizadas medições em 12 combinações independentes de pontos de microfone (no mínimo 3) e pontos de fonte sonora (no mínimo 2). Além disso, para o método de medição por sinal interrompido, a versão de 2003 da norma exige que sejam efetuadas, pelo menos, 3 medições em cada combinação, sendo que, para que a repetitividade do ensaio pelo método de sinal interrompido seja comparável à do ensaio pelo método de resposta impulsiva integrada, devem ser efetuadas 10 medições em cada combinação de ponto de microfone e ponto de fonte sonora. Entende-se que este aumento no número de medições, e a consequente melhoria na qualidade dos dados, sejam respaldados pelo avanço da tecnologia dos equipamentos de medição no período decorrido entre as publicações das duas versões da norma.

Para o método de medição por resposta impulsiva integrada, a norma exige apenas uma medição para cada combinação de ponto de microfone e ponto de fonte sonora, devido ao caráter determinístico deste método (ver Anexo).

2.5 Ensaio de forros suspensos

Sistemas de forro suspenso são utilizados largamente no mundo todo, em uma série de aplicações diferentes, como escritórios (panorâmicos ou não), cinemas, auditórios, pavilhões, entre muitos outros. A característica de um sistema de forro suspenso é a montagem deste distanciado da laje superior, sendo o espaço entre ambos chamado *plenum*, o qual geralmente é utilizado para acomodar instalações elétricas, instalações de controle de incêndio e dutos de ar-condicionado.

A utilização dos sistemas de forro suspenso em escritórios é de especial destaque, devido à sua larga disseminação mundial. A versatilidade demandada no desenho dos escritórios modernos fez com que a utilização de sistemas de forro suspenso e de

divisórias se tornasse um padrão mundial. Por outro lado, as pesquisas envolvendo a produtividade em escritórios, elevam aspectos acústicos, como níveis de ruído de fundo, privacidade e sistemas de mascaramento acústico, a um grau de mais alta importância na busca da melhoria da produtividade e da qualidade de vida dos empregados no ambiente de trabalho (ASID, 1996). Neste contexto, sistemas de forro suspenso com características de absorção sonora desempenham um papel fundamental (WYERMAN, 1981; WARNOCK, 1978).

O anexo B da norma ISO 354 (2003) apresenta uma descrição de montagem de amostra específica para sistemas de forro suspenso (e similares), denominada montagem “tipo E”. Esta descrição foi originalmente publicada em 1993, como um adendo da norma ISO 354 (ISO, 1993), e incorporada com algumas mudanças pela versão mais recente da norma. As designações utilizadas nesta descrição foram as mesmas utilizadas em uma norma anterior (ASTM, 1999), que trata do mesmo assunto.

Conforme o texto que descreve a montagem tipo E, a amostra do forro a ser ensaiada deve ser disposta sobre o piso da câmara, com a superfície aparente virada para cima, a não ser que esta configuração possa mudar os resultados devido a “efeitos gravitacionais”. A amostra deve ser montada sobre um suporte construído em metal, madeira ou “outro material não poroso”, com densidade superficial de, pelo menos, 20 kg/m^2 . O suporte com a amostra deve ser montado de forma a enclausurar um espaço de ar entre a amostra e o piso da câmara. Não deve haver partições dividindo este espaço de ar, a não ser que estas sejam partes integrantes da amostra. O suporte deve cobrir o perímetro da amostra. O texto da norma define ainda que as juntas entre o suporte e a amostra e entre o suporte e o piso da câmara devem ser vedadas, de forma a prevenir contato do espaço enclausurado com o exterior.

O texto também especifica que a descrição da montagem deve conter um sufixo (como E-300), designando a distância, em milímetros, entre a superfície exposta da amostra e o piso da câmara. Este valor deve ser arredondado para múltiplos de 5 mm, e no ensaio deve ser utilizado pelo menos um dos seguintes valores: 200 mm, 300 mm e 400 mm. Outros valores podem ser utilizados, contanto que juntamente com um destes.

O item 6.2.1.3 da norma define que a medição da área equivalente de absorção sonora da câmara vazia deve ser feita sem a presença do suporte utilizado na montagem tipo E.

O texto que descreve a montagem tipo E deixa de esclarecer uma série de detalhes que podem influenciar nos resultados do ensaio. O texto da norma apenas informa que o suporte deve ser utilizado, fornecendo algumas sugestões de materiais, e indicando suas densidades superficiais mínimas.

Um estudo publicado em 1982 por Halliwell (HALLIWELL, 1982), utilizando uma amostra com montagem tipo E-400, demonstrou que pequenos detalhes construtivos do suporte podem influenciar nos resultados. Mais precisamente, Halliwell testou a vedação inferior entre o suporte (no caso, de madeira compensada) e o piso da câmara reverberante, concluindo que diferentes configurações de vedação praticamente não afetam o resultado final do ensaio. Por outro lado, Halliwell verificou a forte influência de pequenas cavidades formadas ao longo do suporte utilizado (devido ao fato de o suporte ser constituído de diferentes partes) para os coeficientes acima de 1000 Hz. Na conclusão do artigo, Halliwell aponta que a vedação entre o suporte e o piso da câmara não apresenta influência considerável sobre os coeficientes de absorção sonora da amostra, mas que cuidados devem ser tomados para evitar a existência de cavidades e frestas ao longo do suporte.

Um estudo sobre fontes de discrepâncias em ensaios de absorção sonora (WARNOCK, 1983) demonstrou que amostras ensaiadas conforme a montagem tipo E apresentam desvios de repetitividade substancialmente maiores do que amostras montadas diretamente no piso da câmara, principalmente para frequências abaixo de 500 Hz.

Em outro estudo, Halliwell (HALLIWELL, 1983) evidenciou com dados de um programa interlaboratorial que amostras montadas conforme o tipo E apresentam desvios de reprodutibilidade também muito superiores aos de amostras montadas diretamente no piso, não apenas nas baixas frequências como também acima de 1000 Hz. Ao comentar os resultados, Halliwell aponta as diferenças entre os suportes e os detalhes de montagem adotados pelos diversos laboratórios envolvidos como

sendo um dos principais fatores da variabilidade dos coeficientes de absorção sonora medidos.

O pequeno número de trabalhos publicados a respeito da sensibilidade de parâmetros da montagem tipo E não esclarece devidamente quais são os aspectos de montagem mais importantes, e que cuidados devem ser tomados. O fato de o texto da norma não detalhar suficientemente a montagem deixa em aberto aspectos que podem ser importantes no controle dos desvios e no aumento da precisão dos ensaios, como por exemplo, a influência da absorção sonora do suporte, a possível ressonância do espaço de ar enclausurado, a variação no volume da câmara, os detalhes do perfilado metálico que sustenta o forro, entre outros. O objetivo deste trabalho é estudar a influência destes parâmetros.

3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

3.1 Mecanismos de absorção sonora

O conceito de absorção sonora fundamenta-se na dissipação da energia mecânica, contida em uma onda acústica, na forma de energia térmica. Esta dissipação ocorre, em geral, devido ao fato de o ar apresentar um coeficiente de viscosidade finito. Também a condutividade térmica do ar, por ser finita, contribui para a dissipação da energia acústica (KUTTRUFF, 1991). A seguir, são apresentados sucintamente os principais mecanismos pelos quais ocorre a absorção sonora.

3.1.1 Atenuação sonora no ar

A simples propagação do som no ar já implica em uma dissipação de sua energia, mais notadamente em altas frequências.

Segundo Kuttruff (KUTTRUFF, 1991), o principal mecanismo de dissipação da energia acústica no ar é chamado de “relaxação térmica” (do inglês, “*thermal relaxation*”). Neste processo microscópico, durante a compressão do ar, uma quantidade de moléculas de ar é impelida ao movimento devido ao gradiente de pressão sonora da onda acústica. Depois de um certo período de tempo sob compressão, a energia cinética contida nas moléculas de ar, associada à energia térmica na forma de translação, é distribuída a outras formas de energia térmica, de rotação e de vibração. A rarefação do ar leva ao processo inverso. Porém, o tempo necessário para que ocorra o processo de relaxação térmica precisa ser compatível com o período de compressão e rarefação da onda, que por sua vez, é inversamente proporcional à frequência da mesma. De forma que, exceto para frequências muito baixas, o processo não encontra equilíbrio para ondas nas faixas de frequência audíveis, resultando em uma dissipação da energia cinética (ou térmica translacional) em energia térmica nas formas vibracional e rotacional. A absorção sonora resultante deste fenômeno é dependente da frequência e da umidade relativa do ar.

Outro fenômeno associado à absorção sonora pelo ar, ainda que menos representativo, é a característica não-adiabática do ar. Quando um volume de ar é comprimido devido a uma onda acústica, sua temperatura aumenta, de acordo com a primeira lei da termodinâmica. Pelo fato de o sistema ser real e não-adiabático, há

uma transferência de calor deste volume aquecido de ar, para o volume de ar contíguo que esteja em uma temperatura menor. Esta transferência de energia não é reversível, e representa uma dissipação que resulta na absorção sonora.

Um terceiro fator, segundo Kuttruff, é de natureza macroscópica: a dissipação da energia mecânica devido ao fato de o ar não ser um elemento elástico ideal, resultando em perdas a cada compressão e descompressão de seu volume.

3.1.2 Absorção sonora devido à reflexão

A reflexão sonora em uma superfície resulta em uma perda de energia acústica, independentemente das características da superfície refletora. Tal fenômeno é consequência, novamente, da viscosidade e da condutividade térmica do ar.

A presença de uma superfície rígida imersa em um fluido (no caso, o ar) faz com que a camada deste fluido em contato com a superfície esteja sempre na mesma velocidade desta (ÁSSY, 1996). A espessura desta camada depende, entre outros fatores, da rugosidade da superfície e da viscosidade do fluido.

Uma onda acústica que se propaga no ar tem regiões de alta velocidade das partículas intercaladas com regiões de alta pressão (KUTTRUFF, 1991). Porém, visto que na camada do ar junto à superfície rígida a velocidade é nula, tem-se uma região oscilante de alta pressão. Conforme descrito no item anterior, a compressão de um volume de ar acarreta em um aumento de sua temperatura. Uma vez que a camada de ar junto à superfície rígida tem sua temperatura variada, há uma transferência de calor entre ambos, cujo sentido varia de acordo com o gradiente de pressão e, conseqüentemente, de temperatura. Devido ao fato de a capacidade térmica da superfície ser muito maior do que a do ar, a troca de energia entre ambos representa uma dissipação da energia da onda, uma vez que a energia térmica transmitida à parede pode ser apenas parcialmente transferida de volta ao ar.

Apesar de a dissipação da energia ocorrer devido às características físicas do ar (viscosidade e condutividade térmica), e não da superfície, em geral os coeficientes de absorção sonora resultantes são atribuídos à superfície. De fato, conforme aponta Kuttruff, a absorção sonora que resulta deste fenômeno é muito baixa, e pode ser desprezada para a maioria das aplicações práticas.

3.1.3 Painéis vibrantes

Um painel delgado e homogêneo, quando exposto a um campo sonoro, tende a vibrar com um certo padrão, em função de suas características físicas, assim como do campo sonoro incidente sobre o mesmo. Dependendo da amplitude desta vibração, o painel pode irradiar parte da energia acústica incidente para o outro lado. Além disso, parte da energia incidente sobre o painel é dissipada em seu interior, devido a atritos e amortecimentos internos.

Sob o ponto de vista do ambiente em que o campo sonoro original é gerado, considerando-se que o painel em questão seja uma parede que delimita este ambiente, a dissipação interna e a transmissão da onda sonora para fora do ambiente pode ser encarada como absorção sonora, uma vez que parte da energia incidente sobre a parede não é refletida, e pode-se então atribuir um coeficiente de absorção sonora à mesma. Este fenômeno é representativo para superfícies como portas, divisórias, janelas, paredes, forros, etc., e a absorção sonora resultante concentra-se, geralmente, nas baixas frequências.

Em um modelo teórico simplificado (KUTTRUFF, 1991), em que o painel seja homogêneo, e sendo ρ_0 a densidade volumétrica do ar (kg/m^3), c a velocidade do som no ar (m/s), ω a frequência angular da onda incidente (rad/s), e M a densidade superficial do painel (kg/m^2), o coeficiente de absorção sonora α do painel pode ser aproximado por

$$\alpha \approx \left(\frac{2\rho_0 c}{\omega M} \right)^2 \quad (3.1)$$

3.1.4 Painéis perfurados

Um painel rígido e delgado, que contenha perfurações distribuídas em sua superfície, apresenta um efeito de absorção sonora que conserva certa analogia com o fenômeno de absorção sonora dos painéis vibrantes (KUTTRUFF, 1991). O movimento do ar imposto pela onda acústica incidente faz com que haja uma constrição do ar nas imediações das perfurações, causando um aumento na velocidade do ar no interior das perfurações. Conseqüentemente, as forças inerciais e de atrito são aumentadas, gerando a dissipação da energia acústica.

Para efeito de formulação, considera-se que o fenômeno de um painel perfurado seja análogo ao do painel vibrante, apresentado no item 3.1.3. No caso de um modelo matemático, considerando-se a eq.(3.1), a densidade superficial do painel M é substituída pela massa de ar contida na perfuração, dividida pela razão entre a área total perfurada S_1 e a área total do painel, S_2 . Sendo b' a espessura eficaz do painel (igual à espessura real b acrescida de um termo que depende da geometria da perfuração), o valor de M pode ser aproximado por

$$M = \frac{S_2 \rho_0 b'}{S_1} \quad (3.2)$$

Substituindo esta relação na eq.(3.1), tem-se que o coeficiente de absorção sonora α do painel perfurado pode ser aproximado por

$$\alpha \approx \left(\frac{2cS_1}{\omega b' S_2} \right)^2 \quad (3.3)$$

3.1.5 Absorvedores de painel

O absorvedor (também chamado de *ressonador*) de painel consiste em um painel vibrante ou perfurado, montado paralelamente a uma parede rígida, e separado desta por uma distância d . Comumente o espaço de ar entre o painel e a parede é enclausurado por um quadro, que também serve de fixação para o painel. A Figura 3.1 apresenta um corte do absorvedor.

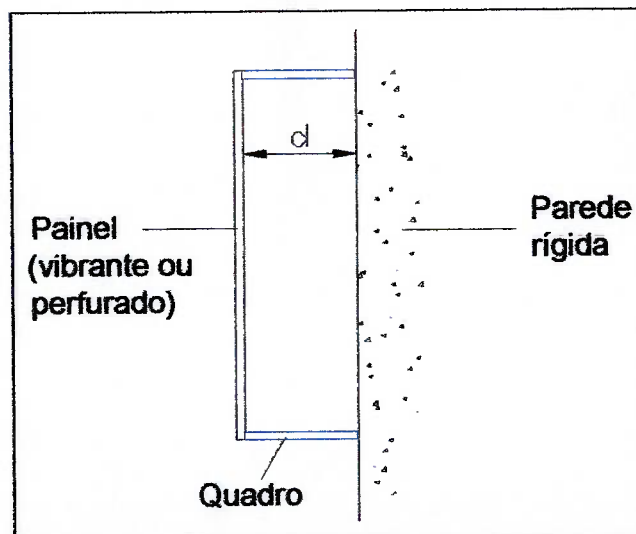


Fig.3.1: Corte de um absorvedor de painel.

A conjunção do comportamento do painel (apresentado anteriormente nos itens 3.1.3, para painéis vibrantes, e 3.1.5, para painéis perfurados) com o posicionamento deste frente à parede rígida resulta em um mecanismo de absorção sonora sintonizado, pelo qual a absorção sonora é distribuída em torno de uma frequência de ressonância f_0 . Sendo M a densidade superficial do painel vibrante (ou, no caso de um painel perfurado, a expressão análoga dada pela eq.(3.3)) e d a distância (em metros) entre o painel e a parede, a frequência de ressonância f_0 (em Hertz) é dada por

$$f_0 = \frac{600}{(Md)^{1/2}} \quad (3.4)$$

O cálculo dos coeficientes de absorção sonora de um absorvedor de painel é complexo. Um equacionamento simplificado (KUTTRUFF, 1991) para incidência normal da onda acústica sobre o painel serve como indicativo para o desempenho do absorvedor em uma aplicação real, em que a incidência sonora aproxima-se de um campo difuso. Neste modelo, o coeficiente de absorção sonora máximo é dado por

$$\alpha_{MAX} = \frac{4r_s \rho_0 c}{(r_s + \rho_0 c)^2} \quad (3.5)$$

na qual r_s representa as perdas dissipativas relacionadas à vibração do painel, no caso de painéis vibrantes, ou à viscosidade do ar, no caso de painéis perfurados.

A utilização de absorvedores de painel é muito comum em aplicações em que se desejam equalizar os tempos de reverberação do ambiente, como estúdios musicais, salas de concerto, auditórios, etc. Para se evitar o efeito dos coeficientes de absorção sonora demasiadamente concentrados em torno da frequência de ressonância, costuma-se preencher total ou parcialmente o espaço de ar entre o painel e a parede rígida com material poroso, como espuma de poliuretano, lã de rocha ou lã de vidro. Esta medida contribui para a distribuição dos coeficientes de forma mais equilibrada com a frequência.

3.1.6 Absorvedores discretos

Os absorvedores discretos caracterizam-se por serem elementos capazes de absorver o som e que não sejam distribuídos uniformemente sobre uma superfície, como nos casos anteriores. Deste modo, uma poltrona, um instrumento musical ou uma pessoa podem ser considerados absorvedores discretos.

Por não apresentarem distribuição uniforme, não se pode atribuir aos absorvedores discretos a unidade de coeficiente de absorção sonora, α , mas apenas os valores de absorção sonora, A , por faixa de frequência.

Um absorvedor discreto de especial interesse na acústica é o *ressonador de Helmholtz*, constituído de um volume de ar enclausurado, que se comunica com o espaço externo por uma abertura, esta muitas vezes na forma de um pequeno canal. O movimento imposto por uma onda acústica incidente sobre a abertura faz com que o volume de ar contido nesta tenda a vibrar. O volume de ar enclausurado, por sua vez, representa uma resistência ao movimento do ar na abertura. A Figura 3.2 ilustra um modelo do absorvedor.

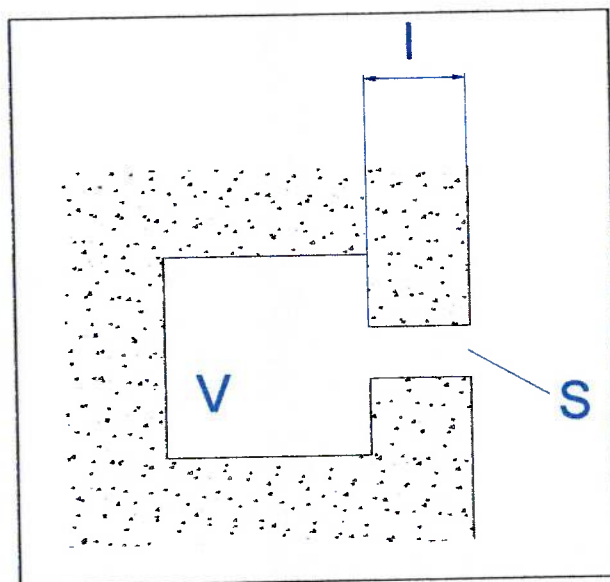


Fig.3.2: Ressonador de Helmholtz.

O efeito de absorção sonora dos ressonadores de Helmholtz é extremamente concentrado, caracterizando este absorvedor como *sintonizado*. Sendo V o volume de ar enclausurado (m^3), l o comprimento do canal (m), e S a área da seção transversal do canal (m^2), a frequência de ressonância f_0 do ressonador é dada por

$$f_0 = \left(\frac{340}{2\pi} \right) \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}} \quad (3.6)$$

Sob o ponto de vista de sistemas, o modelo de um ressonador de Helmholtz é análogo ao de um sistema massa-mola, sendo a massa representada pelo volume de ar na abertura, e o amortecimento e a elasticidade da mola representados pelas características mecânicas do ar enclausurado, que se comprime e rarefaz conforme o movimento do ar na abertura.

3.1.7 Materiais porosos ou fibrosos

A utilização de materiais porosos ou fibrosos representa a principal ferramenta para o controle da reverberação. Materiais como espuma de poliuretano, fibra mineral, lã de rocha, lã de vidro e tecido são largamente utilizados em aplicações como forros, divisórias e revestimentos, e constituem uma parcela importante do mercado dedicado a tratamento acústico.

O processo de dissipação da energia acústica no interior de um material poroso ou fibroso é mais intuitivo do que os processos descritos anteriormente. Pelo fato de tais materiais apresentarem “caminhos” pelos quais o ar pode penetrar em seu interior, aumenta-se sua área de contato do ar. Este fato faz com que a camada de ar ligada ao material, descrita no item 3.1.2, seja estendida a seu interior (KUTTRUFF, 1991). Conseqüentemente, os processos de atrito viscoso e de dissipação térmica, descritos no item citado, distribuem-se não apenas pela superfície do material, como em seu interior.

O desempenho acústico do material poroso ou fibroso depende das dimensões dos poros e fibras, da relação ar/material, e do acesso do ar ao interior do material. Além disso, a absorção sonora obtida é proporcional às dimensões externas do elemento construído com o material, assim como da forma como o mesmo é empregado.

No caso mais comum, em que o material é utilizado em forma de painel ou placa para revestimento ou forro (suspense ou não), o desempenho acústico depende fortemente da espessura e do posicionamento. Isto se deve à relação direta com o comprimento da onda incidente. Conforme discutido no item 3.1.2, uma onda acústica refletida por uma parede rígida apresenta, junto à superfície desta, uma

região de baixa velocidade de partículas do ar, e de alta pressão acústica. Afastando-se perpendicularmente da superfície da parede, a velocidade (eficaz) das partículas aumenta, e a pressão acústica decai. Esta mudança com a distância é tanto mais rápida quanto menor for o comprimento da onda incidente, ou em outras palavras, quanto maior for sua frequência.

Considerando-se agora um material fibroso ou poroso disposto junto à parede rígida, a absorção sonora do mesmo é mais pronunciada em uma dada frequência se a região de alta velocidade da onda incidente localiza-se no interior do material.

A Figura 3.3 ilustra a montagem de um material fibroso ou poroso de espessura e junto a uma parede rígida. A linha vermelha representa o gráfico do módulo da velocidade das partículas de ar de uma onda acústica com um certo comprimento de onda, sendo o valor mínimo localizado junto à parede. Neste caso, observa-se que a região de alta velocidade de partículas da onda, indicada pelo cume da linha senoidal, localiza-se longe do material absorvente.

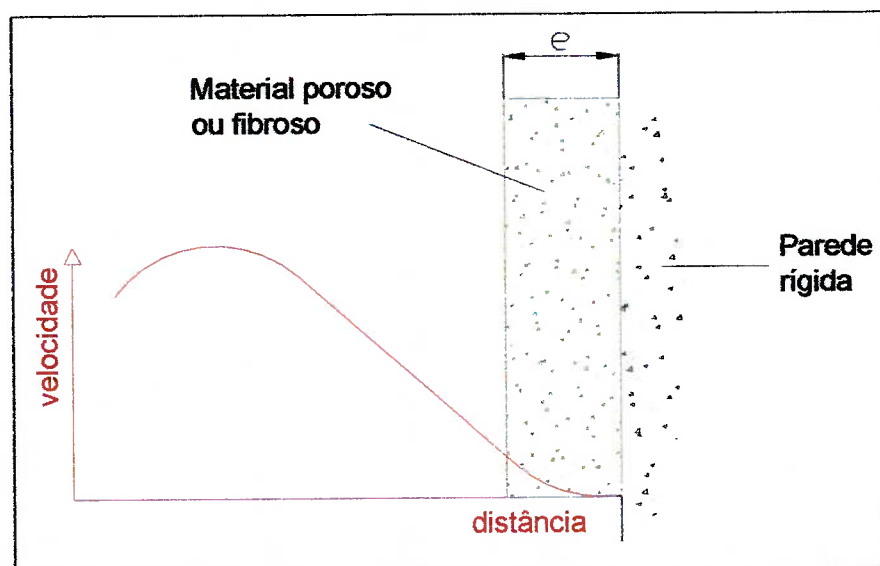


Fig.3.3: Material fibroso ou poroso disposto junto à parede rígida.

Em outra montagem, ilustrada na Figura 3.4, o mesmo material é disposto distanciado da parede rígida por uma distância d . Neste caso, observa-se que a região de alta velocidade da onda acústica localiza-se no interior do material.

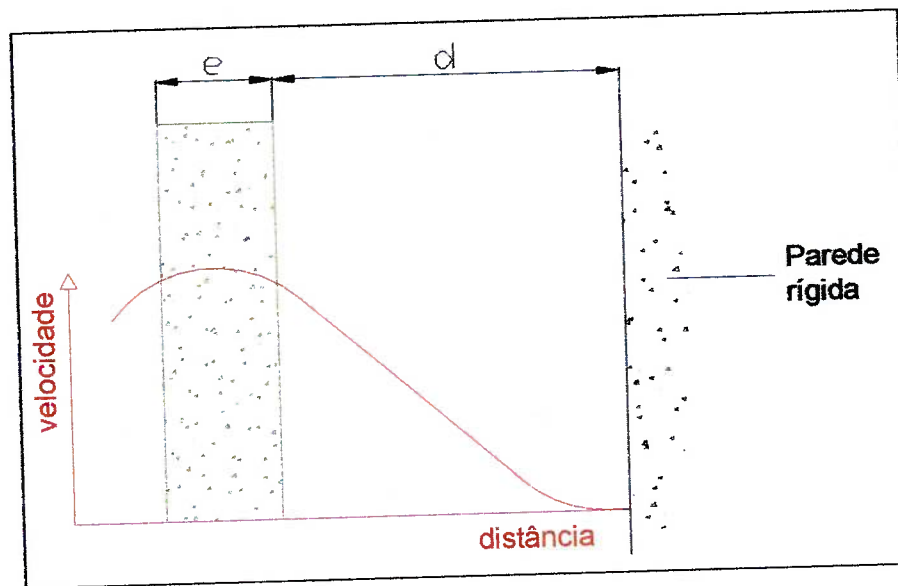


Fig.3.4: Material fibroso ou poroso disposto distanciado da parede rígida.

A eficiência do posicionamento do material é máxima quando a distância d é igual a $1/4$ do comprimento da onda incidente, coincidindo, para o caso de reflexão em parede rígida, com a região de máxima velocidade de partículas.

A Figura 3.5 apresenta um gráfico com os coeficientes de absorção sonora de painéis de lã de rocha de 30 mm de espessura, e $46,5 \text{ kg/m}^2$ de densidade. Na montagem (a), os painéis foram posicionados junto a uma parede de concreto, e na montagem (b), os painéis foram dispostos distanciadados de 50 mm da parede.

Observando-se o gráfico da Figura 3.5, nota-se que a curva (b), com os painéis distanciadados, apresenta melhor desempenho em frequências mais baixas do que a curva (a), pois o deslocamento em relação à superfície faz com que o material “cubra” maiores comprimentos de onda, ou de frequências menores.

Esta propriedade é observada no comportamento dos sistemas de forro suspenso e, conseqüentemente, das amostras que constituem o objeto de estudo desta pesquisa (ver Capítulo 4). Os painéis de forro das amostras montadas conforme o tipo E-300 são dispostos paralelamente ao piso da câmara reverberante, distanciadados deste de aproximadamente 300 mm. A diferença do desempenho desta montagem em relação à montagem dos painéis em contato direto com o piso da câmara reverberante é evidenciada no Capítulo 4.

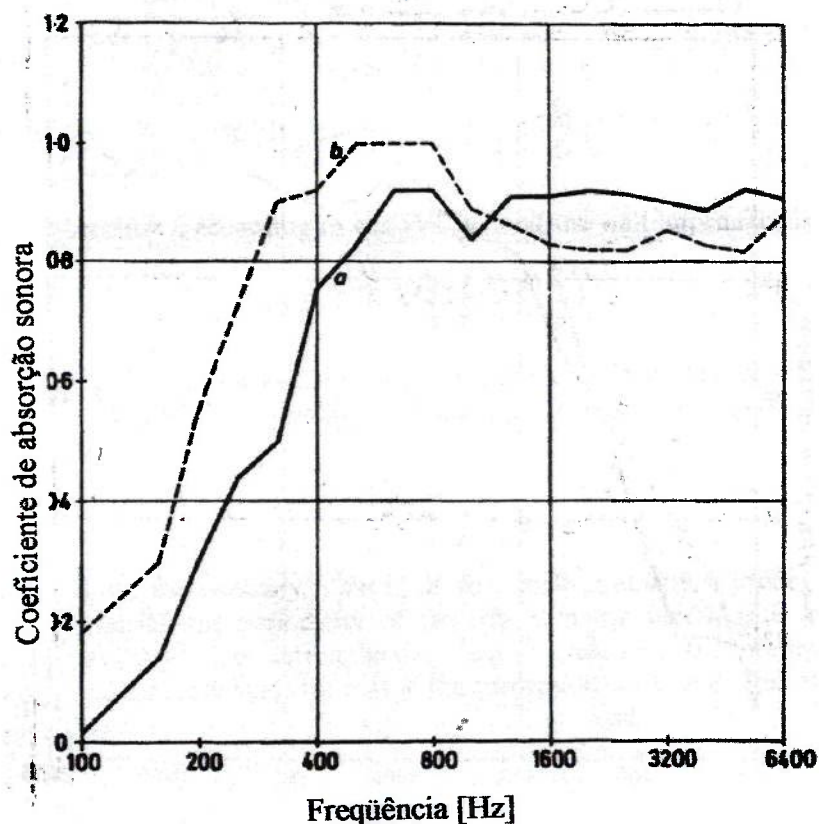


Fig.3.5: Comparação dos coeficientes de absorção sonora de painéis de lã de rocha de 30 mm de espessura (a) montados junto à parede de concreto; (b) montados distanciados de 50 mm da parede de concreto. (Fonte: KUTTRUFF, 1991)

Para frequências em que metade do comprimento de onda é menor do que a espessura do material, o coeficiente de absorção sonora tende a perder a dependência para com a frequência. Assim, o desempenho de materiais fibrosos ou porosos é diretamente proporcional à frequência. Disto resulta que a maior parte das aplicações de materiais porosos ou fibrosos destina-se ao controle de frequências médias e altas.

3.2 Quantificação da absorção sonora

Os processos de absorção sonora apresentados no item 3.1 são fortemente dependentes da frequência da onda sonora incidente. De maneira geral, as frequências mais altas são mais facilmente absorvidas do que as baixas. Porém, as baixas frequências podem ser eficientemente controladas por absorvedores especiais, como abordado no item 3.1. Nestes tipos de absorvedores, também conhecidos como

absorvedores de baixa frequência ou absorvedores *sintonizados*, a absorção sonora concentra-se em torno da frequência de ressonância, em geral inferior a 500 Hz.

A norma ISO 354 define *área equivalente de absorção sonora*, ou simplesmente *absorção sonora*, comumente denotada por A , como sendo “a área hipotética de uma superfície totalmente absorvente (ou seja, com coeficiente de absorção sonora $\alpha=1$), sem se considerar os efeitos de difração sonora, que, se fosse a única superfície absorvente na sala, geraria o mesmo tempo de reverberação da sala em questão”. Ou seja, trata-se da substituição hipotética de todas as superfícies e objetos que possam absorver o som em um ambiente fechado, por uma certa área de uma superfície totalmente absorvente, causando o mesmo efeito sobre os tempos de reverberação. Visto que a absorção sonora é função da frequência da onda acústica incidente, os valores de A devem ser determinados por faixa de frequência.

Embora esta definição possa ser, a princípio, confusa, os conceitos tornam-se mais claros quando se atribui à *absorção sonora* a característica de uma unidade de medida qualquer. Assim, certa poltrona de auditório pode possuir uma absorção sonora de $0,8 \text{ m}^2$ [sabine] na frequência de 500 Hz. Duas poltronas terão, conseqüentemente, $1,6 \text{ m}^2$ [sabine]. Deste modo, a *absorção sonora* total de uma sala pode ser obtida somando-se as absorções dos elementos e superfícies nela presentes. Esta medida é fundamental para o tratamento acústico interno de um ambiente, de modo a adequar seu campo sonoro à aplicação a que se destina.

No caso de superfícies homogêneas, como pisos, forros, cortinas, divisórias, etc., torna-se conveniente a utilização do *coeficiente de absorção sonora*, α_s , dado pela razão da absorção sonora pela área superficial da superfície em questão.

3.3 Medição da reverberação e cálculo da absorção sonora

Assim como a absorção sonora de materiais e objetos, o tempo de reverberação em um ambiente fechado geralmente sofre variação com a frequência, devido não apenas aos processos de absorção sonora descritos no item 3.1, como também devido à geometria do ambiente (KUTTRUFF, 1991).

Portanto, a caracterização detalhada do campo sonoro em um ambiente, assim como da absorção sonora de objetos e superfícies, deve ser feita em termos de *faixas de*

freqüência. De acordo com o tipo de ambiente, a variação entre os tempos de reverberação de diferentes faixas de freqüência pode ser bastante significativa. Em um caso extremo, como o da câmara reverberante n°1 do Laboratório de Acústica do IPT, os valores variam entre 3,0 s (faixa de freqüência de 5000 Hz) e 11,8 s (faixa de freqüência de 250 Hz).

Os experimentos de Sabine (SABINE, 1992), descritos no capítulo anterior, relacionam formalmente o comportamento do campo reverberante difuso de um ambiente fechado com a absorção sonora presente no mesmo. Sendo A a absorção sonora total do ambiente em uma dada faixa de freqüência (em m^2 [sabine]), T o tempo de reverberação por faixa de freqüência (em segundos) e V o volume do ambiente (em metros cúbicos), Sabine desenvolveu a seguinte equação:

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad (3.7)$$

Conforme já apresentado no Capítulo 2, a norma ISO 354 baseia-se na fórmula de Sabine para determinar a absorção sonora das amostras. Visto que o tempo de reverberação é o único parâmetro variável da fórmula possível de ser efetivamente medido, o método de medição apresentado na norma é baseado na comparação dos tempos de reverberação da câmara reverberante, com e sem a presença da amostra.

A obtenção dos tempos de reverberação é feita a partir da curva de decaimento do campo sonoro no interior da câmara. Conforme já discutido no Capítulo 2, em uma situação ideal de campo sonoro difuso, a curva de nível sonoro *versus* tempo deve ser linear. Para o cálculo do tempo de reverberação, uma reta é interpolada sobre a curva de decaimento, até atingir o decaimento de 20 dB ou 30 dB, geralmente. Esta reta é extrapolada até o decaimento de 60 dB, fornecendo o respectivo tempo de reverberação. A Figura 3.6 ilustra este processo.

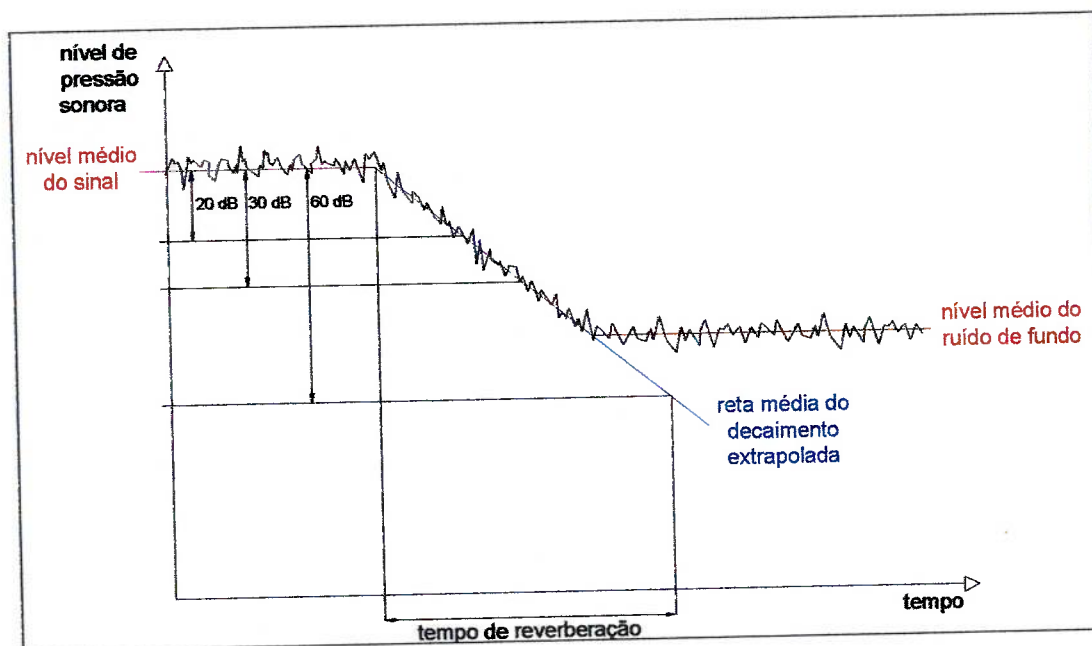


Fig.3.6: Cálculo do tempo de reverberação a partir do decaimento sonoro.

O método original para a obtenção das curvas de decaimento sonoro, apresentado na primeira versão da norma ISO 354 (1985), é chamado método do *signal interrompido*. Por este processo, um sinal de banda larga (geralmente ruído branco ou ruído rosa) é gerado no interior da câmara por uma caixa acústica, idealmente de padrão omnidirecional (ISO, 2003). O nível do sinal sonoro deve ser suficientemente alto e o sinal deve permanecer ligado durante um tempo mínimo, dependente dos tempos de reverberação da câmara. Então o sinal é interrompido, e o decaimento é captado pelo microfone e gravado por algum dispositivo registrador. Apesar de ser o mais utilizado, este método de medição, inicialmente adotado por Sabine em seus experimentos, apresenta alguns inconvenientes. Um deles é a baixa relação sinal/ruído, que pode dificultar as medições em certos ambientes. Outro é o seu caráter estatístico, que gera maiores incertezas, principalmente em baixas frequências (VORLÄNDER e KOB, 1997).

Na última década, tornou-se popular o método de medição por resposta impulsiva integrada, idealizado por SCHROEDER (1965). Este método é apresentado no Anexo deste trabalho.

A medição dos tempos de reverberação é feita em diversos pontos da câmara, buscando-se calcular uma média espacial dos mesmos, por faixas de frequência de

terço de oitava. A norma ISO 354 permite que dois processos sejam utilizados no cálculo desta média. Um destes processos consiste na geração de uma *curva média de decaimento*, obtida por meio da média das curvas de decaimento de vários pontos da câmara. Sobre esta curva média é efetuado o cálculo dos tempos de reverberação como descrito anteriormente. O outro processo consiste no cálculo da média aritmética dos valores dos tempos de reverberação obtidos em cada ponto de medição.

Uma vez obtidos os tempos de reverberação médios para a câmara com e sem a presença da amostra, a absorção sonora da amostra pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$A = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (3.8)$$

Na qual:

A é a absorção sonora da amostra, em uma dada faixa de frequência (m^2 [sabine]);

V é o volume da câmara reverberante (m^3);

c_1 é a velocidade do som no ar durante a medição da câmara sem a presença da amostra (m/s);

c_2 é a velocidade do som no ar durante a medição da câmara com a presença da amostra (m/s);

T_1 é o tempo de reverberação médio da câmara reverberante sem a presença da amostra, em uma dada faixa de frequência (s);

T_2 é o tempo de reverberação médio da câmara reverberante com a presença da amostra, em uma dada faixa de frequência (s);

m_1 é o coeficiente de atenuação do ar na câmara reverberante sem a presença da amostra (1/m);

m_2 é o coeficiente de atenuação do ar na câmara reverberante com a presença da amostra (1/m).

Os coeficientes de atenuação m_1 e m_2 são calculados a partir da medição de parâmetros ambientais (temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar) no interior da câmara reverberante, durante as medições dos tempos de reverberação com e sem a presença da amostra na câmara reverberante, apresentados na norma ISO 9613-1 (ISO, 1993).

Em se tratando de uma amostra que se distribua homogeneamente em uma superfície, pode-se atribuir coeficientes de absorção α_s sonora à mesma, por faixa de frequência, conforme a seguinte equação:

$$\alpha_s = \frac{A}{S} \quad (3.9)$$

Na qual

A é a absorção sonora, por faixa de frequência (m^2 [sabine]);

S é a área da amostra (m^2).

O índice “s” é empregado para diferenciar o coeficiente de absorção sonora obtido pelo método de câmara reverberante do coeficiente obtido por medição em tubo de impedância, o qual é apresentado sem índice. Apesar de buscarem caracterizar o mesmo parâmetro físico da amostra, é comum que ambos os métodos resultem em coeficientes de absorção sonora diferentes.

As incertezas relativas ao valor do coeficiente de absorção sonora podem ser obtidas conforme os cálculos apresentados por NABUCO (2002). A incerteza padrão combinada para a medição do coeficiente de absorção sonora conforme eq.(3.8) e eq.(3.9) pode ser estimada pela seguinte expressão.

$$\begin{aligned} u_c(\bar{\alpha}_s) = & \left\{ \left\{ \frac{55,5}{c} \left[\frac{1}{S} \left(\frac{1}{\bar{T}_2} - \frac{1}{\bar{T}_1} \right) + \frac{1}{S_c \bar{T}_1} \right] \right\}^2 \sigma_v^2 + \left\{ \frac{55,5V}{c} \left[\frac{1}{S_c \bar{T}_1} \right] \right\}^2 \sigma_{S_c}^2 \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{55,5V}{c} \left[\frac{1}{S^2} \left(\frac{1}{\bar{T}_2} - \frac{1}{\bar{T}_1} \right) \right] \right\}^2 \sigma_S^2 \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{55,5V}{c} \left[\frac{1}{S} \frac{1}{\bar{T}_1^2} - \frac{1}{S_c} \frac{1}{\bar{T}_1^2} \right] \right\}^2 \sigma_{\bar{T}_1}^2 + \left\{ \frac{55,5V}{c} \left[\frac{1}{S} \frac{1}{\bar{T}_2^2} \right] \right\}^2 \sigma_{\bar{T}_2}^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Na qual:

$u_c(\bar{\alpha}_s)$ é a incerteza padrão combinada;

c é a velocidade do som no ar (m/s);

S é a área da amostra (m²);

\bar{T}_1 é o tempo de reverberação médio da câmara reverberante sem a presença da amostra, em uma dada faixa de frequência (s);

\bar{T}_2 é o tempo de reverberação médio da câmara reverberante com a presença da amostra, em uma dada faixa de frequência (s);

S_c é a área total da câmara reverberante (m²);

σ_v é o desvio padrão da medição do volume da câmara reverberante (m³);

V é o volume da câmara reverberante (m³);

σ_S é o desvio padrão da medição da área da câmara reverberante (m²);

$\sigma_{\bar{T}_1}$ é o desvio padrão espacial da medição do tempo de reverberação da câmara reverberante sem a presença da amostra, em uma dada faixa de frequência (s);

$\sigma_{\bar{T}_2}$ é o desvio padrão espacial da medição do tempo de reverberação da câmara reverberante com a presença da amostra, em uma dada faixa de frequência (s).

Considerando-se que a fórmula adotada pela norma ISO 354, dada pela eq.(3.8), não leva em conta a correção devido à área do piso da câmara coberta pela amostra (NABUCO, 2002), tem-se uma independência do cálculo de α em relação à medida da área total da câmara reverberante. Desta forma, o cálculo da incerteza padrão combinada apresentado pela eq.(3.10) pode ser reduzido para

$$u_c(\bar{\alpha}_s) = \left\{ \left[\frac{55,5}{c} \left[\frac{1}{S} \left(\frac{1}{\bar{T}_2} - \frac{1}{\bar{T}_1} \right) \right] \right]^2 \sigma_v^2 + \left[\frac{55,5V}{c} \left[\frac{1}{S^2} \left(\frac{1}{\bar{T}_2} - \frac{1}{\bar{T}_1} \right) \right] \right]^2 \sigma_S^2 + \left[\frac{55,5V}{c} \left[\frac{1}{S} \frac{1}{\bar{T}_1^2} \right] \right]^2 \sigma_{\bar{T}_1}^2 + \left[\frac{55,5V}{c} \left[\frac{1}{S} \frac{1}{\bar{T}_2^2} \right] \right]^2 \sigma_{\bar{T}_2}^2 \right\}^{1/2} \quad (3.11)$$

Os valores de σ_v e σ_s , respectivamente os desvios padrão das medições do volume e da área da câmara reverberante, foram estimados como sendo produzidos pelas medições de dimensões ortogonais da câmara reverberante, com uma incerteza de 50 mm.

Os valores de σ_{T1} e de σ_{T2} , respectivamente os desvios padrão das medições dos tempos de reverberação da câmara reverberante com e sem a presença da amostra, foram calculados a partir dos dados de medições dos seis pontos de microfone da câmara.

A partir do valor da incerteza padrão combinada $u_c(\bar{\alpha}_s)$, pode-se calcular a incerteza padrão expandida $U(\alpha)$ ao multiplicar-se o valor de $u_c(\bar{\alpha}_s)$ por um fator de abrangência k .

$$U(\alpha) = k u_c(\bar{\alpha}_s) \quad (3.12)$$

Neste trabalho, o valor adotado para k é 2, considerado o valor que garante um nível de confiança de 95%.

A expressão apresentada na eq.(3.12) é utilizada no Capítulo 5 para o cálculo da incerteza dos coeficientes de absorção sonora, que será denominada apenas de *incerteza*, $U(\alpha)$. Os valores da incerteza $U(\alpha)$ acompanham os valores de α nas tabelas do Capítulo 5, e os gráficos do mesmo capítulo são apresentados na forma $\alpha = \bar{\alpha} \pm U(\alpha)$.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental descrita neste capítulo é baseada na comparação de resultados de ensaios de absorção sonora de um sistema de forro suspenso, com montagem de amostra tipo E-300 conforme a norma ISO 354. Esta montagem é ilustrada na fotografia e no esquema da Figura 4.1.

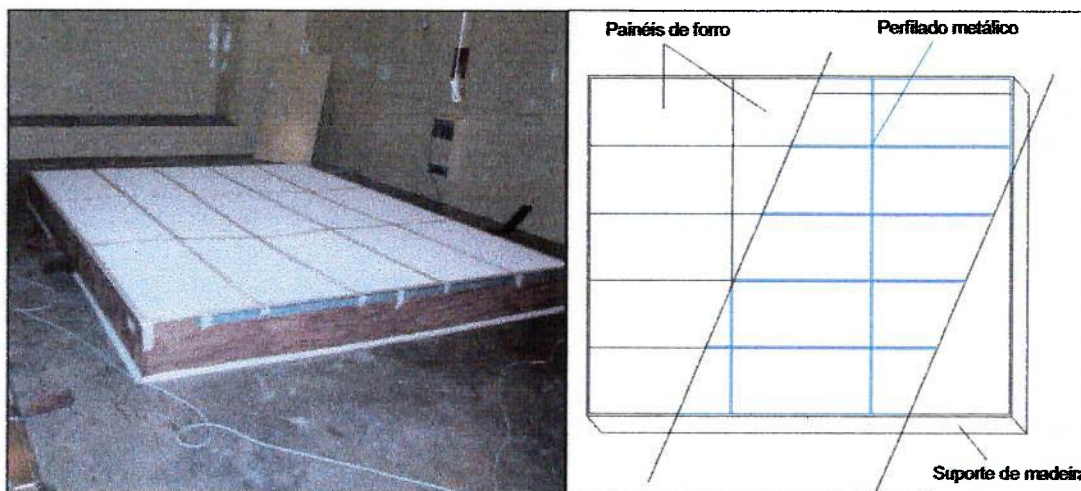


Fig.4.1: Amostra tipo E-300.

A amostra é constituída de painéis de forro de lã de vidro revestidos, que são montados sobre um perfilado metálico, que por sua vez é apoiado em um suporte de madeira. Este tipo de montagem visa reproduzir um sistema de forro em que os painéis são montados distanciados da laje superior.

Os coeficientes de absorção sonora obtidos são comparados sob diferentes condições de montagem. Os parâmetros testados neste trabalho, que dizem respeito apenas a variações da configuração de montagem da amostra e da forma de cálculo dos coeficientes de absorção sonora, foram os seguintes:

- Influência da absorção sonora do suporte de madeira.
- Influência da vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante.
- Influência de aberturas controladas nos painéis da amostra.
- Influência da variação do volume da câmara reverberante devido à presença da amostra.

- Verificação da presença de modos acústicos no interior do volume delimitado pelo suporte de madeira.
- Influência da exposição das laterais dos painéis de forro.

As condições de montagem citadas são minuciosamente descritas nos itens a seguir. Os painéis de forro, o suporte de madeira e o perfilado metálico utilizados foram mantidos os mesmos para todos os ensaios.

A comparação direta entre os resultados visa determinar a sensibilidade de cada um dos parâmetros de montagem testados; conseqüentemente, cada parâmetro foi testado independentemente.

O fato de a metodologia experimental fundamentar-se na comparação de ensaios relativamente similares (apenas um ou dois parâmetros variando de cada vez) minimiza os possíveis desvios sobre os resultados devidos a fatores que não são o foco da pesquisa, como por exemplo as questões referentes à uniformidade do campo difuso, já discutidas no Capítulo 2.

4.1 Procedimento de ensaio

O procedimento adotado para a realização dos ensaios desta pesquisa é o mesmo utilizado rotineiramente no Laboratório de Acústica do IPT. Este procedimento é baseado na medição dos tempos de reverberação em diversos pontos da câmara reverberante, com e sem a presença da amostra. As medições são feitas por um microfone capacitivo específico para medições acústicas, conectado a um analisador sonoro, que gera o sinal de excitação da sala e, simultaneamente, grava e processa o sinal proveniente do microfone. Uma vez obtidos os tempos de reverberação nos diversos pontos de medição, filtrados por faixas de frequência de terço de oitava, é calculada a média destes valores (também por faixas de frequência), e então são calculados os coeficientes de absorção sonora conforme o método apresentado no item 3.3. O método de medição, os equipamentos utilizados e as características da câmara reverberante estão descritos com mais detalhes no Capítulo 3, no Anexo e no Apêndice.

A única diferença entre o procedimento de medição adotado para a qualificação da câmara reverberante (ver Apêndice) e o procedimento de medição adotado para os

ensaios deste trabalho é o número de pontos de microfone. Enquanto que nos ensaios para a qualificação da câmara foram utilizados dez pontos, nos ensaios deste trabalho foram utilizados seis pontos de microfone na câmara reverberante, ilustrados na Figura 4.2 a seguir.

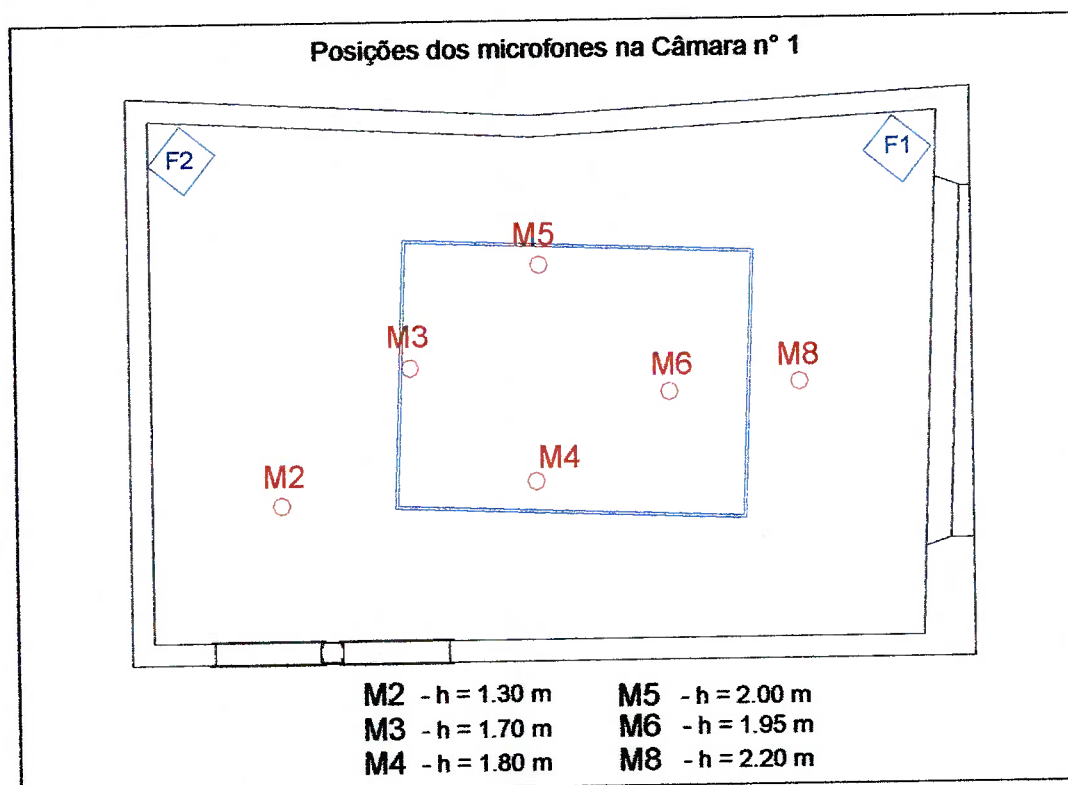


Fig.4.2: Pontos de microfone e de fonte utilizados nos ensaios.

A norma ISO 354 (2003) apresenta cálculos detalhados para a compensação da absorção sonora pelo ar, exigindo que sejam feitas leituras das condições ambientais (temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica) durante as medições com e sem a presença da amostra na câmara reverberante. Este fato propicia que várias amostras possam ser ensaiadas num mesmo dia, utilizando-se de uma mesma medição com a câmara vazia. Este procedimento foi adotado neste trabalho.

4.2 Painéis de forro

Os painéis de forro utilizados nos ensaios são da marca Isover, modelo Sirius 60 x 2,0, constituídos de lã de vidro, revestidos em uma das faces com uma película plástica texturizada, que fica exposta na montagem do sistema de forro. Os painéis possuem as dimensões médias de 1240 mm de comprimento, 615 mm de largura, e 20 mm de espessura. A densidade média dos painéis é de 60 kg/m³.

Os painéis representam um tipo de produto de utilização comum no Brasil. Os mesmos painéis de forro foram utilizados em todos os ensaios.

4.3 Suporte de madeira e perfilado metálico

O suporte de madeira utilizado nos ensaios é construído em tábuas de madeira de 300 mm de largura e aproximadamente 22 mm de espessura. A tábua que constitui o lado maior do suporte possui 3795 mm de comprimento, e a que constitui o lado menor possui 3125 mm de comprimento. O suporte é montado pregando-se as extremidades das tábuas, conforme ilustra a fotografia da Figura 4.3.

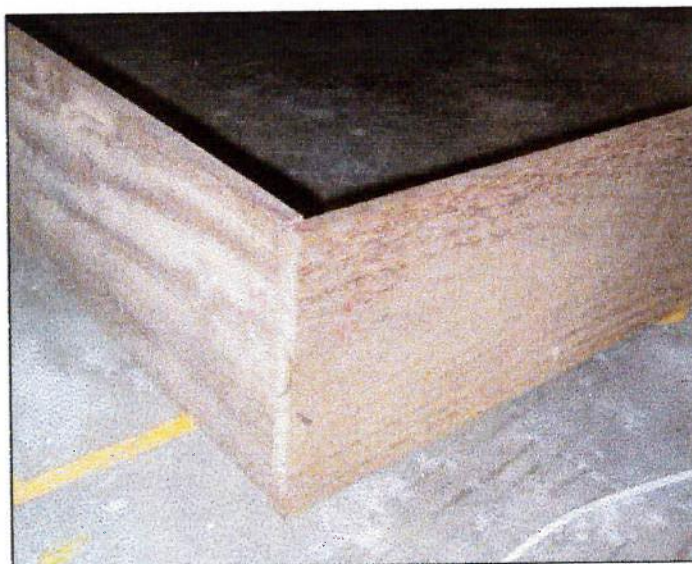


Fig.4.3: Detalhe do suporte de madeira.

Em um dos lados de cada tábua, foi fixado junto à borda um perfil metálico em L, com 15 mm de lado, que serve de apoio para o perfilado metálico, como ilustra a fotografia da Figura 4.4.



Fig.4.4: Perfilado metálico em T apoiado no perfil em L.

O perfilado metálico utilizado neste trabalho é o mesmo empregado nas aplicações reais do sistema de forro suspenso Isover. É constituído de perfis de alumínio em T, com as dimensões conforme o corte da Figura 4.5.

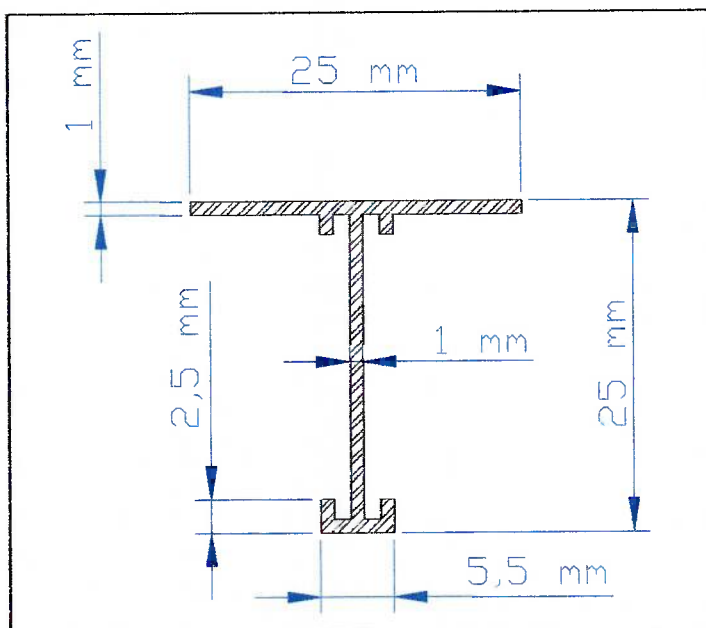


Fig 4.5: Corte com as dimensões do perfil de alumínio em T.

4.4 Parâmetros estudados

A seguir, serão detalhados os parâmetros de montagem estudados neste trabalho.

4.4.1 Influência da absorção sonora do suporte de madeira

Foi testada a influência da presença do suporte de madeira na medição com a câmara vazia sobre os resultados finais. O Anexo B da norma ISO 354 especifica que a medição dos tempos de reverberação com a câmara vazia deve ser feita sem a presença do suporte de madeira. Isto significa que os coeficientes de absorção sonora obtidos são referentes à absorção sonora da amostra de forro **e do suporte de madeira**. Apesar de esta norma especificar que o material do suporte deva ser “não poroso”, foi testada a influência de sua absorção sonora, por meio da comparação dos resultados dos ensaios efetuados com e sem a presença do suporte na câmara durante medição sem a amostra.

4.4.2 Influência da vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante

Nesta etapa do trabalho, foi testada a vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante. Apesar de o Anexo B da norma ISO 354 explicitar que as juntas entre o suporte e o piso devem ser vedadas, não há uma descrição de como deve ser feita a vedação.

Irregularidades no suporte de madeira e no piso da câmara reverberante podem gerar frestas entre ambos, ligando acusticamente o volume de ar enclausurado pelo suporte ao volume externo, o que pode afetar os resultados. Assim, foram testadas as seguintes configurações de vedação:

- sem vedação;
- vedação com uma camada de fita adesiva no lado externo, com uma interrupção de 500 mm;
- vedação com duas camadas de fita adesiva no lado externo, sem interrupções.

4.4.3 Influência de aberturas controladas nos painéis da amostra

Complementarmente ao item 4.4.2, foi testada a influência de aberturas feitas na superfície de um dos painéis de forro, conforme ilustra a Figura 4.6.

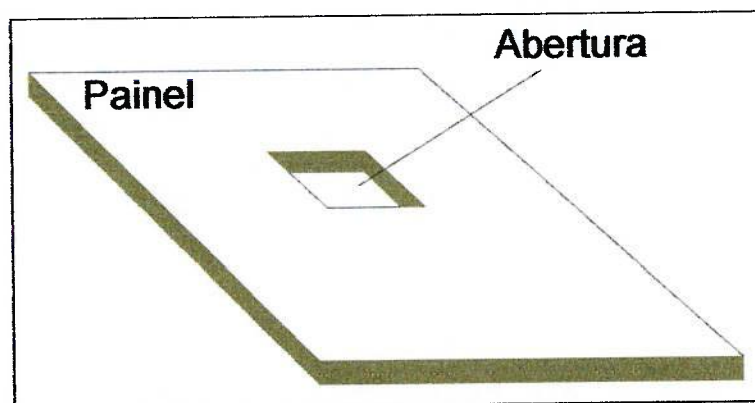


Fig 4.6: Esquema da abertura no painel de forro.

As aberturas possuíam área controlada, de modo a buscar-se uma possível correlação entre a área de abertura e a influência sobre os coeficientes de absorção sonora obtidos. As dimensões das aberturas foram determinadas hipoteticamente de modo a serem compatíveis com a área total de possíveis frestas em uma montagem real.

Foram testadas as seguintes configurações de aberturas:

- amostra totalmente vedada;
- amostra com uma abertura quadrada de 100 mm de lado em um dos painéis;
- amostra com uma abertura quadrada de 200 mm de lado em um dos painéis.

4.4.4 Influência da variação do volume da câmara reverberante devido à presença da amostra

O volume do conjunto suporte + amostra de forro, considerando-se a montagem E-300 e 11,8 m² de área de forro, é de aproximadamente 3,6 m³, equivalente a 1,6 % do volume total da câmara reverberante. Esta etapa investigou a influência desta variação de volume da câmara nos cálculos dos coeficientes de absorção sonora.

4.4.5 Verificação da presença de modos acústicos no interior do volume delimitado pelo suporte de madeira

Esta etapa do trabalho buscou identificar a possível influência de ondas estacionárias no interior do espaço enclausurado sobre os resultados do ensaio. Numa situação real, a ausência do suporte faz com que seja pouco provável que tais modos venham ocorrer no plenum, portanto a possível influência dos modos sobre os coeficientes de absorção sonora da amostra configura uma distorção do ensaio.

Para investigar este parâmetro, foi inserida uma tábua de madeira no interior do espaço de ar enclausurado, com dimensões de 3078 mm de comprimento, 225 mm de altura e 30 mm de espessura, posicionada diagonalmente em relação às superfícies do suporte, porém sem contato com as tábuas deste, nem com o perfilado metálico, conforme ilustra a Figura 4.7. A tábua de madeira visa bloquear as possíveis ondas estacionárias axiais de primeira, segunda e terceira ordem no interior do volume de ar enclausurado.

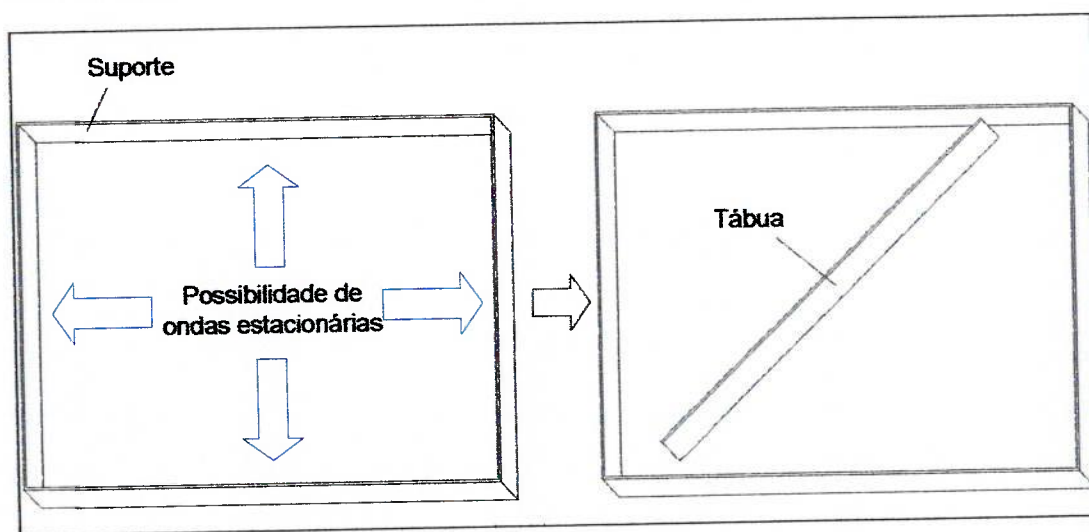


Fig. 4.7: Suporte sem e com a tábua de madeira disposta diagonalmente.

De acordo com as dimensões internas do suporte (3755 mm x 3125 mm x 300 mm), os modos acústicos relativos ao comprimento e à largura do espaço enclausurado (KUTTRUFF, 1991) estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Modos acústicos axiais de primeira, segunda e terceira ordens relativos ao comprimento e à largura do espaço de ar enclausurado.

Nº do modo	Descrição	Frequência
1,0,0	Modo axial primário relativo ao comprimento	45,5 Hz
0,1,0	Modo axial primário relativo à largura	54,7 Hz
2,0,0	Modo axial secundário relativo ao comprimento	91,0 Hz
0,2,0	Modo axial secundário relativo à largura	109,3 Hz
3,0,0	Modo axial terciário relativo ao comprimento	136,5 Hz
0,3,0	Modo axial terciário relativo à largura	164,0 Hz

Portanto, considerando-se a presença de tais modos e a influência da presença da tábua no interior do espaço enclausurado, o efeito esperado recai sobre frequências abaixo de 200 Hz.

4.4.6 Influência da exposição das laterais dos painéis de forro

Numa montagem real de um sistema de forro suspenso, o perfilado metálico é montado de forma que os perfis em T são instalados com a base para baixo, e os painéis são apoiados sobre os perfis com a face aparente voltada para baixo. Nesta situação, a junta entre os painéis fica invisível ao ambiente interno, coberta pelo perfilado metálico, conforme ilustra a Figura 4.8.

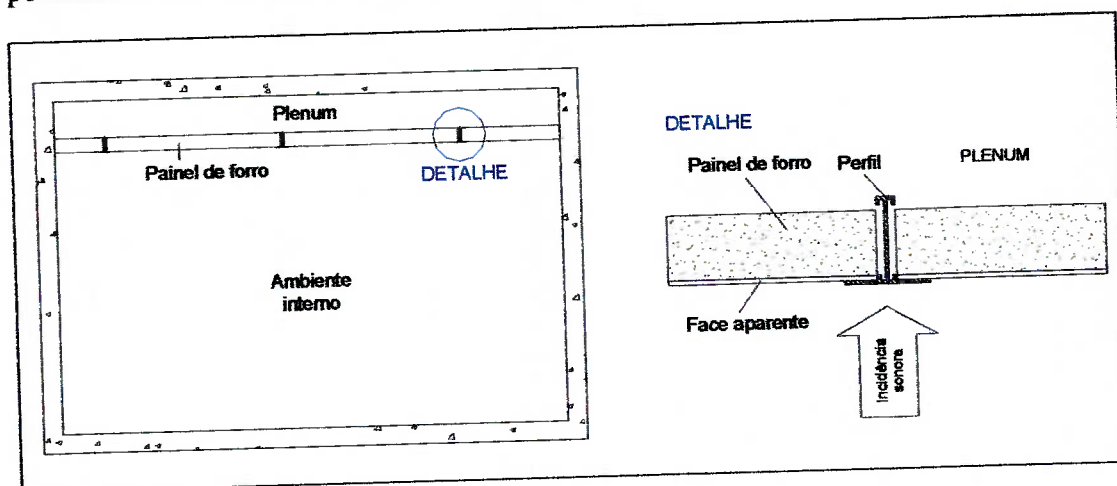


Fig. 4.8: Situação real de montagem do sistema de forro suspenso.

Na montagem tipo E-300 empregada na parte experimental deste trabalho, o sistema de forro é montado com os painéis invertidos, ou seja, com a face aparente voltada para cima. Porém, o perfilado metálico continua sendo montado de forma a sustentar

os painéis, isto é, com a base dos perfis em T voltadas para baixo, conforme ilustra a Figura 4.9.

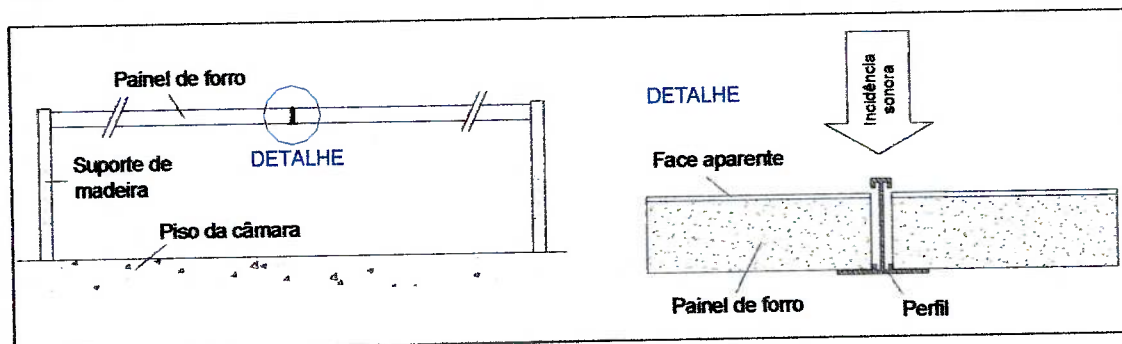


Fig. 4.9: Detalhe da montagem E-300.

Esta montagem faz com que a junta entre dois painéis de forro fique aparente e acessível à incidência sonora, enquanto na montagem real esta junta é coberta pela base do perfilado. Além de representar um acréscimo na área da amostra (cerca de 5 % da área total, assumindo-se a hipótese de que *metade* da área das laterais possa ser considerada aparente), no caso dos painéis de forro utilizados a influência é fortemente acentuada pelo fato de as laterais não serem cobertas com a película plástica, sendo assim muito mais absorventes do que a superfície revestida (ver comparação no item 5.1).

Visando averiguar se a exposição das juntas afeta o resultado final do ensaio, os resultados da montagem ilustrada na Figura 4.9 foram comparados com os de uma montagem em que as juntas são cobertas com fita adesiva, conforme ilustra a Figura 4.10.

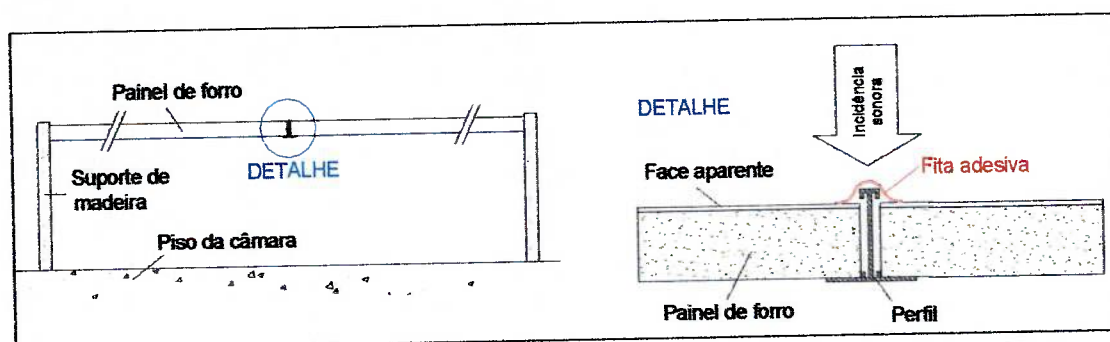


Fig. 4.10: Montagem E-300 com as juntas entre painéis de forro cobertas.

Nesta etapa do estudo, foram testadas três configurações:

- juntas descobertas;
- juntas cobertas com uma camada de fita adesiva;
- juntas cobertas com duas camadas de fita adesiva.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e analisa dados e resultados obtidos nos ensaios descritos no Capítulo 4. A ordem dos experimentos não foi a mesma da elaborada no capítulo anterior, portanto os dados e as análises a seguir serão apresentados seguindo a cronologia dos ensaios, exceto quando são necessárias comparações entre resultados de diferentes etapas.

Em todas as análises serão apresentados em forma tabular e gráfica os dados que forem considerados pertinentes, com destaque para os coeficientes de absorção sonora (ou a absorção sonora) por faixas de frequência de terço de oitava.

As incertezas dos coeficientes de absorção sonora, calculadas conforme a formulação desenvolvida por NABUCO (2002) e apresentada no item 3.3 do Capítulo 3, também são apresentadas para os casos pertinentes.

Conforme discutido no item 4.1 do Capítulo 4, os cálculos envolvidos na determinação da absorção sonora visam compensar as variações ambientais no interior da câmara reverberante, permitindo que as medições com a presença da amostra não sejam feitas necessariamente em seqüência às da câmara vazia. Assim, para os cálculos dos coeficientes de absorção sonora (ou da absorção sonora) dos ensaios apresentados a seguir, foram utilizados os mesmos valores de tempos de reverberação da câmara reverberante sem amostra.

5.1 Coeficientes de absorção sonora da amostra - montagem tipo A

No intuito de se ter uma referência das características da amostra, os painéis de forro foram ensaiados conforme a montagem tipo A da norma ISO 354, ou seja, dispostos diretamente sobre o piso da câmara, formando um retângulo com dimensões de 3720 mm por 3125 mm. As bordas do retângulo foram cobertas com perfis metálicos, como ilustra a Figura 5.1.

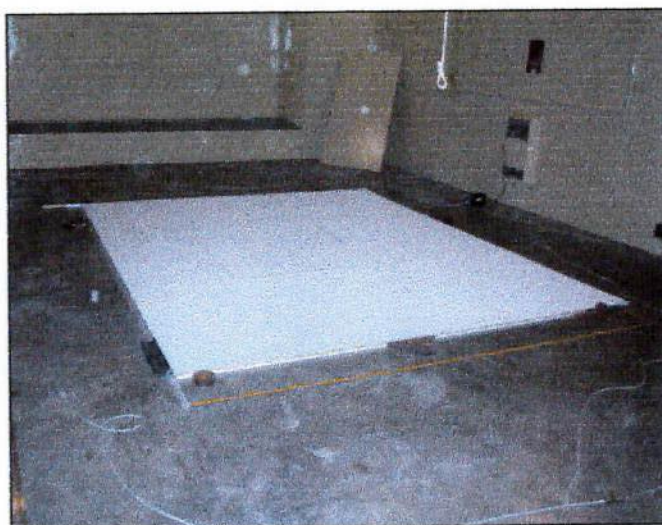


Fig. 5.1: Amostra disposta no piso da câmara reverberante.

A Tabela 5.1 apresenta os coeficientes de absorção sonora da amostra e as incertezas.

Tabela 5.1: Dados do ensaio com a amostra disposta no piso da câmara.

Frequência (Hz)	α	$U(\alpha)$
100	0,06	0,05
125	0,07	0,10
160	0,13	0,05
200	0,29	0,07
250	0,49	0,07
315	0,56	0,10
400	0,53	0,05
500	0,59	0,04
630	0,89	0,10
800	0,98	0,11
1000	0,86	0,11
1250	0,85	0,08
1600	0,76	0,05
2000	0,64	0,07
2500	0,51	0,06
3150	0,40	0,04
4000	0,31	0,04
5000	0,23	0,05

A Figura 5.2 apresenta o gráfico com os coeficientes de absorção sonora da amostra montada conforme o tipo A. As linhas tracejadas representam os coeficientes de absorção sonora, acrescidos e decrescidos de suas respectivas incertezas.

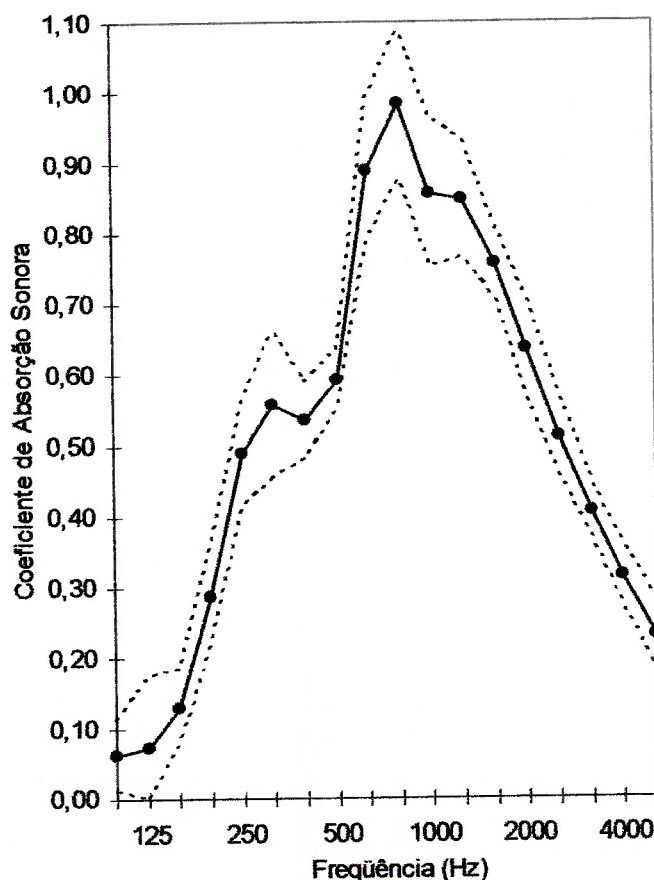


Fig.5.2: Coeficientes de absorção sonora da amostra disposta no piso da câmara.

Analisando-se o gráfico, observa-se que há um pico na curva dos coeficientes de absorção sonora, centrado na faixa de frequências de 800 Hz, e que os coeficientes decrescem para altas frequências. Este comportamento resulta da presença da película plástica que reveste a face aparente dos painéis; de modo contrário, o comportamento da curva de absorção sonora dos painéis de lã de vidro seria totalmente distinta, com característica ascendente. Para demonstrar este fato, os mesmos painéis foram ensaiados apoiados no piso da câmara, com as superfícies revestidas voltadas para baixo, deixando aparente a lã de vidro sem revestimento. Os coeficientes de absorção sonora de ambos os ensaios podem ser comparados na Tabela 5.2 e no gráfico da Figura 5.3. As linhas tracejadas representam os coeficientes de absorção sonora, acrescidos e decrescidos de suas respectivas incertezas.

Tabela 5.2: Comparação dos dados do ensaio com a amostra disposta no piso da câmara, com a película plástica para cima e para baixo.

Frequência (Hz)	Película para cima		Película para baixo	
	α	$U(\alpha)$	α	$U(\alpha)$
100	0,06	0,05	0,05	0,06
125	0,07	0,10	0,04	0,08
160	0,13	0,05	0,10	0,05
200	0,29	0,07	0,14	0,04
250	0,49	0,07	0,21	0,04
315	0,56	0,10	0,29	0,07
400	0,53	0,05	0,45	0,05
500	0,59	0,04	0,57	0,07
630	0,89	0,10	0,69	0,10
800	0,98	0,11	0,70	0,07
1000	0,86	0,11	0,77	0,10
1250	0,85	0,08	0,83	0,09
1600	0,76	0,05	0,86	0,07
2000	0,64	0,07	0,92	0,15
2500	0,51	0,06	0,97	0,14
3150	0,40	0,04	1,02 ²	0,11
4000	0,31	0,04	1,10 ²	0,12
5000	0,23	0,05	1,20 ²	0,19

² O fato de haver coeficientes de absorção sonora maiores do que a unidade deve-se a distorções intrínsecas ao ensaio de absorção sonora em câmara reverberante, como os efeitos de difração sonora junto à borda da amostra.

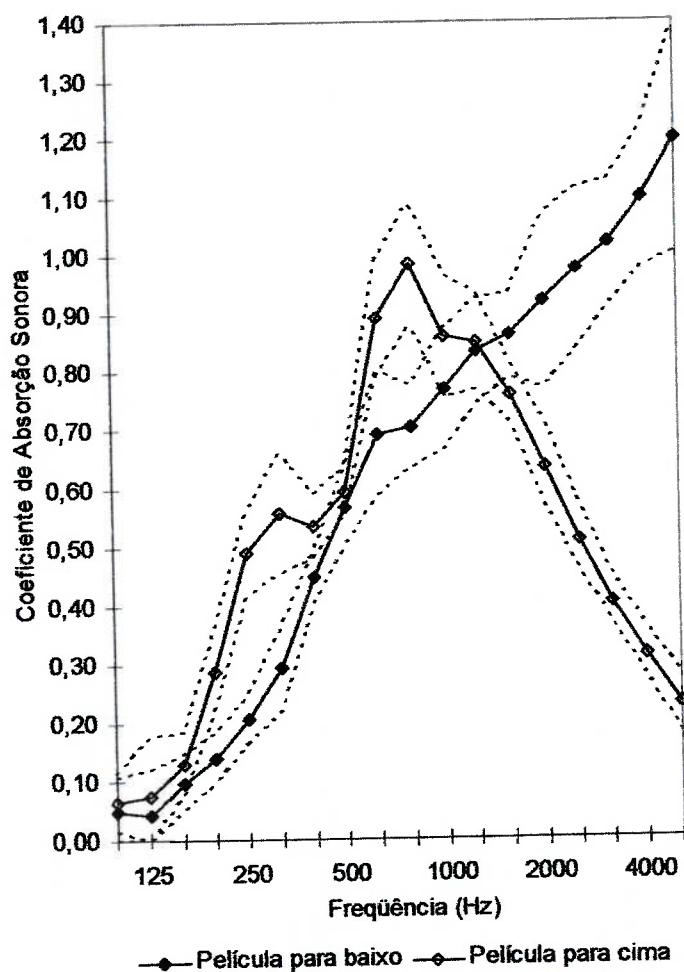


Fig.5.3: Comparação entre amostras dispostas no piso da câmara.

5.2 Absorção sonora do suporte de madeira

Nesta etapa foi feito o ensaio com o suporte de madeira montado na câmara reverberante, sem os painéis de forro (ver item 4.4.1 do Capítulo 4). O perfilado metálico não foi instalado, mas foi mantido no interior da câmara durante as medições.

Por não se tratar de um elemento plano, não é adequado calcular os coeficientes de absorção sonora do suporte. Assim, os valores da absorção sonora do mesmo foram calculados, e são apresentados na Tabela 5.3.

Para efeito de comparação, também são apresentados na Tabela 5.3 os valores da absorção sonora dos painéis de forro dispostos diretamente no piso e da montagem

E-300 completa (com o perfilado e os painéis de forro, sem vedações), cuja descrição e demais dados são apresentados no item 5.3.

Tabela 5.3: Comparação dos valores de absorção sonora do suporte de madeira, dos painéis de forro e da montagem completa.

Frequência (Hz)	$A_{suporte}$ (m^2 [sabine])	$A_{painéis}$ (m^2 [sabine])	$A_{completa}$ (m^2 [sabine])
100	0,03	0,73	4,72
125	0,05	0,86	4,62
160	0,39	1,52	7,69
200	0,27	3,34	6,58
250	0,49	5,69	6,43
315	0,45	6,48	6,74
400	0,27	6,22	8,20
500	0,30	6,88	8,92
630	0,28	10,34	8,23
800	0,41	11,43	9,04
1000	0,37	9,97	8,78
1250	0,37	9,86	8,70
1600	0,34	8,80	8,37
2000	0,50	7,39	7,63
2500	0,59	5,94	7,02
3150	1,00	4,70	6,14
4000	0,86	3,65	5,09
5000	1,00	2,66	4,14

A Figura 5.4 apresenta o gráfico com os dados da Tabela 5.3, por faixa de frequência.

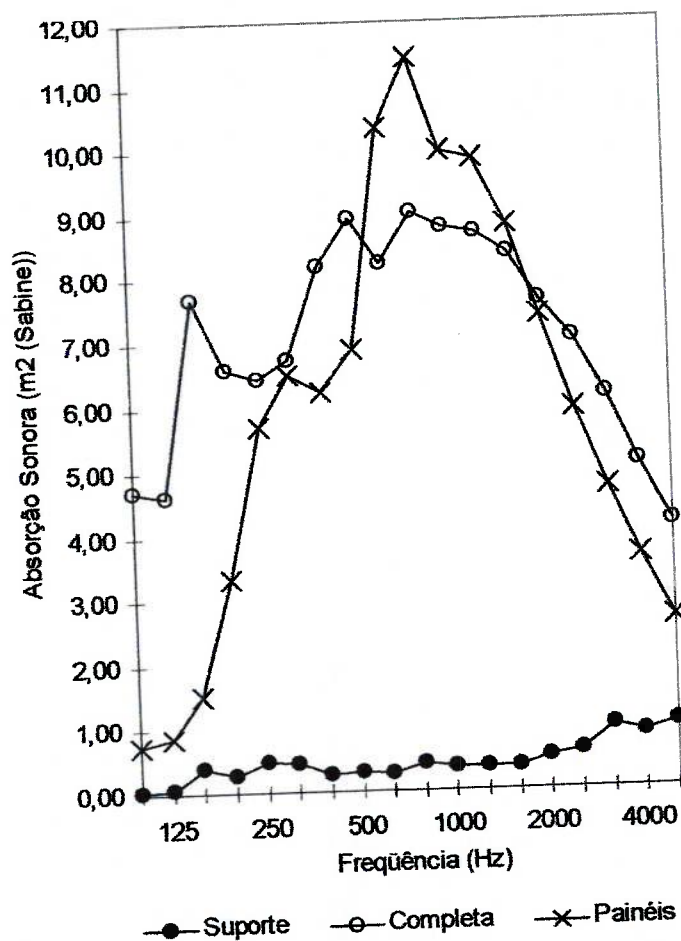


Fig.5.4: Comparação dos valores de absorção sonora do suporte de madeira, dos painéis de forro e da montagem completa.

Analisando-se os dados da Tabela 5.3 e o gráfico da Figura 5.4 observa-se que, nas altas frequências (acima de 2500 Hz), a absorção sonora do suporte de madeira passa a influir consideravelmente na absorção sonora da montagem completa. Este fato é decorrente do próprio método de ensaio, visto que, conforme apresentado no Capítulo 4, no cálculo dos coeficientes de absorção sonora da amostra tipo E-300, não é descontada a influência da absorção sonora do suporte.

Buscando-se analisar a influência da absorção sonora do suporte de madeira nos coeficientes de absorção sonora da amostra completa, foram comparados dois procedimentos de cálculo dos coeficientes:

- Cálculo conforme a norma ISO 354, que considera os tempos de reverberação da câmara reverberante vazia e os tempos de reverberação da câmara com a presença da amostra completa.

- Cálculo alternativo, utilizando os tempos de reverberação da câmara reverberante com a presença do suporte de madeira ao invés dos da câmara vazia, e os tempos de reverberação da câmara com a presença da amostra completa.

Os resultados de ambas os métodos estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Comparação dos coeficientes de absorção sonora da amostra completa por dois métodos de cálculo.

Frequência (Hz)	Método da ISO 354		Método Alternativo	
	α	$U(\alpha)^3$	α	$U(\alpha)^3$
100	0,40	0,25	0,40	0,25
125	0,39	0,24	0,39	0,24
160	0,65	0,23	0,62	0,23
200	0,56	0,12	0,53	0,12
250	0,54	0,09	0,50	0,09
315	0,57	0,07	0,53	0,07
400	0,70	0,13	0,67	0,13
500	0,76	0,11	0,73	0,11
630	0,70	0,06	0,68	0,06
800	0,77	0,06	0,73	0,06
1000	0,75	0,09	0,72	0,09
1250	0,74	0,05	0,71	0,05
1600	0,71	0,09	0,67	0,09
2000	0,64	0,06	0,59	0,06
2500	0,57	0,06	0,52	0,06
3150	0,47	0,04	0,38	0,04
4000	0,34	0,07	0,26	0,07
5000	0,19	0,04	0,11	0,04

O gráfico da Figura 5.5 apresenta a comparação entre os coeficientes de absorção sonora apresentados na Tabela 5.4. As linhas tracejadas representam os coeficientes de absorção sonora da amostra calculada conforme a ISO 354, acrescidos e decrescidos de suas respectivas incertezas.

³ O fato de a incerteza dos coeficientes de absorção $U(\alpha)$ sonora ser fortemente dominada pela parcela referente ao tempo de reverberação da câmara com amostra T_2 faz com que os valores apresentados na tabela sejam os mesmos, visto que a medição de T_2 é única a ambos os casos.

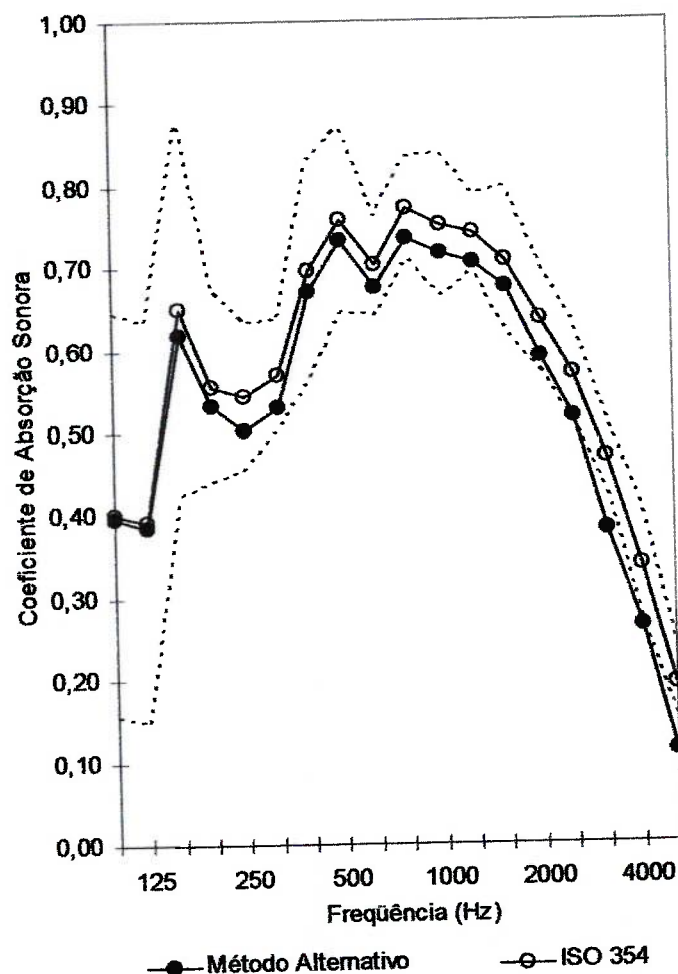


Fig.5.5: Comparação dos coeficientes de absorção sonora da amostra completa por duas formas de cálculo.

Analisando-se o gráfico, observa-se que o efeito da absorção sonora do suporte de madeira é notável para todas as frequências a partir de 160 Hz, apesar de a diferença estar, na maior parte, dentro dos limites da incerteza da medição.

5.3 Vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante

Esta etapa do trabalho visa determinar a influência da vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante nos resultados dos ensaios da amostra completa. Conforme apresentado no item 2.5 do Capítulo 2, a norma ISO 354 exige que seja feita esta vedação, apesar de não especificar o modo correto.

Para estudar este parâmetro, a amostra foi ensaiada em três diferentes condições.

Primeiramente foi montada a forma mais básica da amostra tipo E-300. Foi instalado do perfilado metálico, apoiado nos perfis em L do suporte de madeira, e também no piso da câmara em quatro pontos intermediários, por meio de segmentos de perfis com 300 mm de comprimento. Os painéis de forro foram dispostos sobre o perfilado, sem vedação entre si. As fotografias das Figuras 5.6 a 5.8 ilustram a montagem.

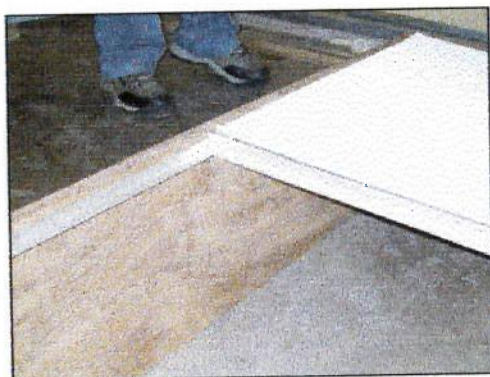


Fig.5.6: Apoio do perfilado.



Fig.5.7: Disposição dos painéis.



Fig.5.8: Amostra sem vedação montada na câmara reverberante.

Na primeira condição ensaiada, não foi feito qualquer tipo de vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara, contrariamente à recomendação da norma ISO 354. Devido a irregularidades no piso da câmara e no suporte, observou-se que, da extensão total de 14280 mm da interface do suporte com o piso da câmara, aproximadamente 9550 mm apresentaram frestas com dimensões entre 2 mm e 5 mm, como ilustra a fotografia da Figura 5.9.

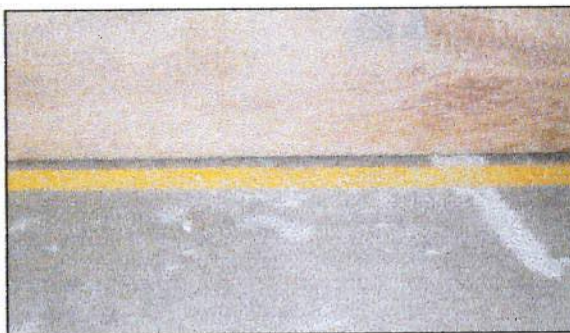


Fig.5.9: Fresta entre o suporte e o piso da câmara.

Depois de feito o ensaio com esta configuração de amostra, foi efetuada a vedação entre o suporte e o piso da câmara utilizando-se uma camada de fita adesiva (ver item 4.4.2 do Capítulo 4). A fita utilizada é feita à base de papel, marca 3M, com 50 mm de largura. Todo o perímetro externo do suporte foi vedado, exceto um trecho de 500 mm, conforme ilustram as fotografias das Figuras 5.10 e 5.11. Neste trecho, a largura média da fresta é de aproximadamente 3 mm.



Fig.5.10: Detalhe da vedação com a fita adesiva. Fig.5.11: Trecho descoberto.

Depois de feito o ensaio da amostra nesta configuração, o trecho incompleto da vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante foi completado, e uma nova camada de fita adesiva foi aplicada sobre a anterior, de modo a dobrar a densidade da vedação (ver item 4.4.2 do Capítulo 4). A fotografia da Figura 5.12 ilustra a montagem final.

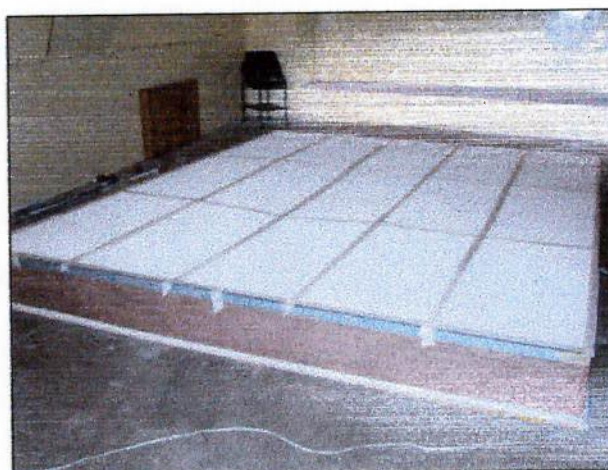


Fig.5.12: Amostra com dupla vedação suporte-piso montada na câmara reverberante.

A Tabela 5.5 apresenta os coeficientes de absorção sonora e as respectivas incertezas das três configurações de montagem descritas.

Tabela 5.5: Dados dos ensaios das três configurações de vedação suporte-piso.

Frequência (Hz)	Sem vedação		Com vedação incompleta		Com vedação dupla	
	α	$U(\alpha)$	α	$U(\alpha)$	α	$U(\alpha)$
100	0,40	0,25	0,45	0,23	0,46	0,27
125	0,39	0,24	0,39	0,24	0,36	0,25
160	0,65	0,23	0,67	0,27	0,66	0,23
200	0,56	0,12	0,53	0,13	0,54	0,10
250	0,54	0,09	0,53	0,11	0,53	0,10
315	0,57	0,07	0,56	0,08	0,54	0,05
400	0,70	0,13	0,68	0,13	0,67	0,10
500	0,76	0,11	0,75	0,11	0,74	0,08
630	0,70	0,06	0,70	0,08	0,70	0,11
800	0,77	0,06	0,77	0,08	0,76	0,07
1000	0,75	0,09	0,74	0,08	0,73	0,08
1250	0,74	0,05	0,73	0,07	0,73	0,05
1600	0,71	0,09	0,70	0,09	0,69	0,09
2000	0,64	0,06	0,62	0,08	0,62	0,08
2500	0,57	0,06	0,55	0,06	0,53	0,12
3150	0,47	0,04	0,46	0,15	0,41	0,15
4000	0,34	0,07	0,34	0,06	0,31	0,11
5000	0,19	0,04	0,17	0,12	0,15	0,15

A Figura 5.13 apresenta os coeficientes de absorção sonora das três condições em forma gráfica. As linhas tracejadas representam os coeficientes de absorção sonora da primeira configuração, acrescidos e decrescidos de suas respectivas incertezas.

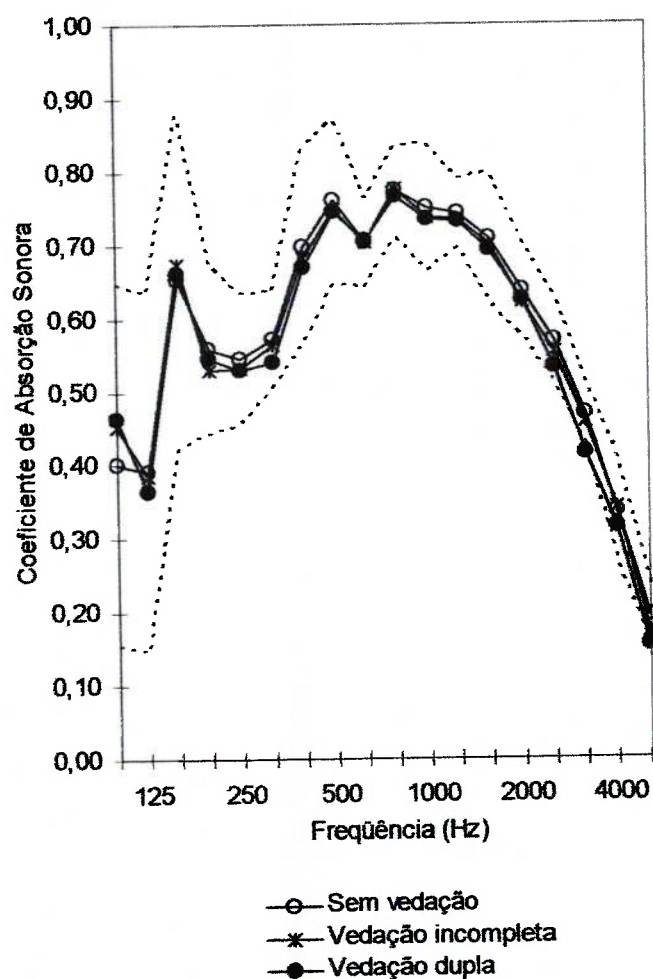


Fig.5.13: Comparação entre as configurações de vedação suporte-piso.

Analisando-se o gráfico, observa-se que a diferença entre as curvas é quase imperceptível, a não ser por uma queda sutil dos coeficientes de absorção sonora da amostra com dupla vedação, nas frequências de 250 Hz a 500 Hz e de 2500 Hz a 5000 Hz. A pequena diferença entre as curvas é evidenciada quando comparada com as incertezas apresentadas.

5.4 Exposição das laterais dos painéis de forro

Nesta etapa da pesquisa, buscou-se averiguar a influência da exposição das laterais dos painéis de forro na montagem tipo E-300. Conforme descrito no item 4.4.6 do Capítulo 4, existe uma diferença entre a montagem real e a montagem para o ensaio, em relação ao posicionamento do perfilado metálico. Em um sistema de forro suspenso em que os painéis são apoiados em perfis "T", existe a tendência de que,

quando é feita a montagem tipo E para o ensaio, a junta entre os painéis fique descoberta, de modo a expor suas laterais.

Para o estudo deste parâmetro foi aproveitada a montagem do item anterior, com a dupla vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara. Os resultados do ensaio desta montagem são comparados com os de duas outras configurações, relativas à cobertura das juntas entre os painéis.

Na primeira configuração, uma camada de fita adesiva (do mesmo tipo da utilizada nos itens anteriores) foi aplicada cobrindo as juntas entre os painéis de forro e entre os painéis e o suporte (ver item 4.4.6 do Capítulo 4). As fotografias das Figuras 5.14 a 5.16 ilustram a montagem.



Fig. 5.14: Vedação com a fita adesiva.



Fig. 5.15: Detalhe da vedação.

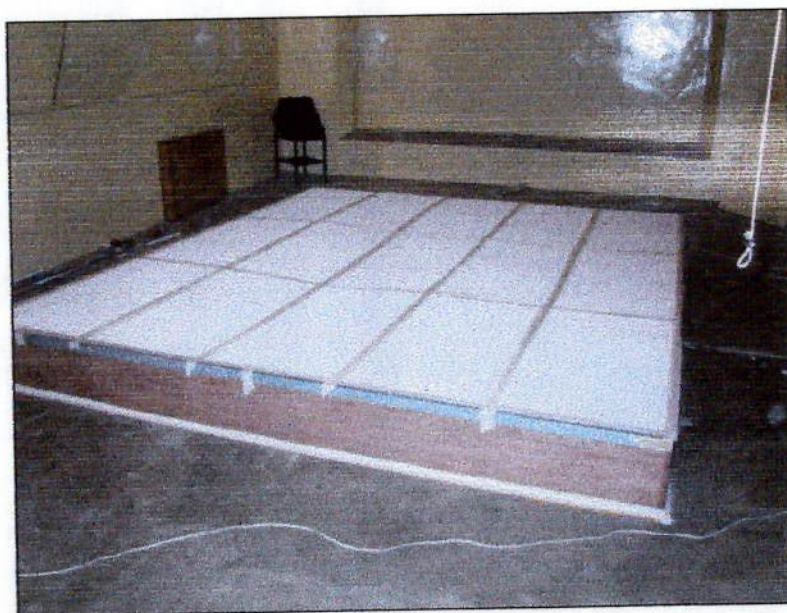


Fig. 5.16: Amostra com vedação entre painéis montada na câmara reverberante.

Para o ensaio da configuração seguinte, a vedação sobre as juntas entre os painéis de forro e entre os painéis e o suporte foi reforçada com uma nova camada de fita adesiva (ver item 4.4.6 do Capítulo 4). A fotografia da Figura 5.17 ilustra a montagem.

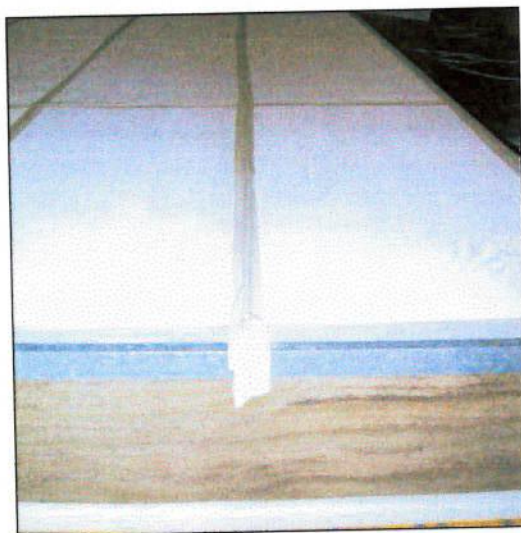


Fig.5.17: Amostra com dupla vedação entre painéis montada na câmara reverberante.

A Tabela 5.6 apresenta os coeficientes de absorção sonora e as respectivas incertezas das três configurações de montagem descritas.

Tabela 5.6: Dados dos ensaios das três configurações de vedação entre painéis.

Frequência (Hz)	Sem vedação entre painéis		Vedação de uma camada		Vedação dupla	
	α	$U(\alpha)$	α	$U(\alpha)$	α	$U(\alpha)$
100	0,46	0,27	0,51	0,43	0,48	0,28
125	0,36	0,25	0,38	0,19	0,39	0,18
160	0,66	0,23	0,56	0,21	0,54	0,18
200	0,54	0,10	0,42	0,08	0,42	0,10
250	0,53	0,10	0,44	0,12	0,44	0,11
315	0,54	0,05	0,49	0,09	0,48	0,06
400	0,67	0,10	0,63	0,12	0,64	0,11
500	0,74	0,08	0,74	0,09	0,72	0,07
630	0,70	0,11	0,69	0,07	0,69	0,08
800	0,76	0,07	0,72	0,08	0,72	0,07
1000	0,73	0,08	0,68	0,09	0,70	0,06
1250	0,73	0,05	0,69	0,07	0,68	0,06
1600	0,69	0,09	0,65	0,08	0,62	0,07
2000	0,62	0,08	0,56	0,08	0,55	0,06
2500	0,53	0,12	0,47	0,07	0,46	0,08
3150	0,41	0,15	0,36	0,15	0,36	0,11
4000	0,31	0,11	0,21	0,17	0,21	0,14
5000	0,15	0,15	0,06	0,11	0,03	0,26

A Figura 5.18 apresenta os coeficientes de absorção sonora das três condições em forma gráfica. As linhas tracejadas representam os coeficientes de absorção sonora da primeira configuração, acrescidos e decrescidos de suas respectivas incertezas.

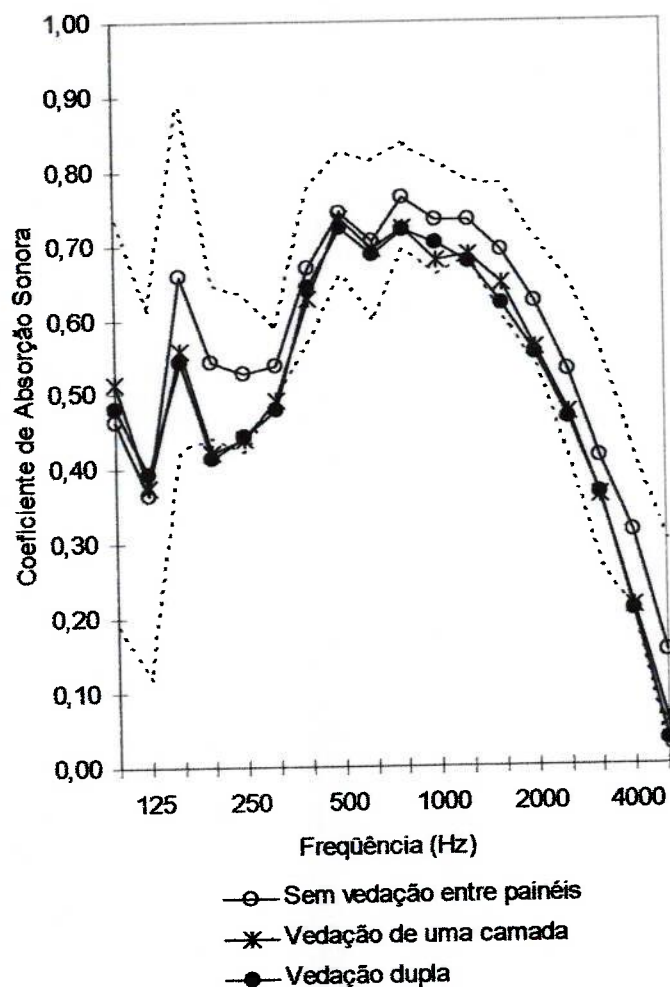


Fig. 5.18: Comparação entre as configurações de vedação entre painéis.

Uma análise do gráfico evidencia a forte influência da primeira vedação com fitas adesivas, observada em quase todo o espectro medido, apesar de as diferenças estarem, na maior parte, dentro do limite da incerteza. A terceira configuração testada, ou seja, com vedação dupla, praticamente não apresentou diferenças em relação à configuração com vedação simples.

Uma comparação com os resultados do item anterior demonstra a relevância da vedação entre painéis para os resultados do ensaio de uma amostra montada conforme o tipo E-300. Visto que a exposição das laterais dos painéis neste tipo de montagem depende do tipo de perfilado metálico utilizado, novas pesquisas poderiam ajudar a delinear este parâmetro.

5.5 Aberturas controladas nos painéis de forro

Complementarmente aos parâmetros estudados nos itens 5.3 e 5.4, esta análise busca determinar a dependência dos coeficientes de absorção sonora da amostra tipo E-300 com aberturas que liguem o espaço de ar enclausurado pela amostra ao ambiente externo (câmara reverberante). Para tanto, foram feitos ensaios com aberturas de diferentes dimensões na superfície de um dos painéis, conforme apresentado no item 4.4.3 do Capítulo 4. As dimensões das aberturas foram determinadas de modo a serem compatíveis com a área total de possíveis frestas em uma montagem real.

As configurações de montagem testadas nesta etapa têm como referência os resultados obtidos com a última montagem do item 5.4, em que a amostra apresenta dupla vedação de fitas adesivas tanto na interface externa entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante quanto entre os painéis de forro e entre os painéis e o suporte.

Para a primeira configuração testada, foi feita uma abertura quadrada de 100 mm de lado no centro de um dos painéis, transpassando completamente o mesmo (ver item 4.4.3 do Capítulo 4), conforme ilustram as fotografias das Figuras 5.19 a 5.22.



Fig.5.19: Corte do painel.



Fig.5.20: Destacamento da parte cortada.

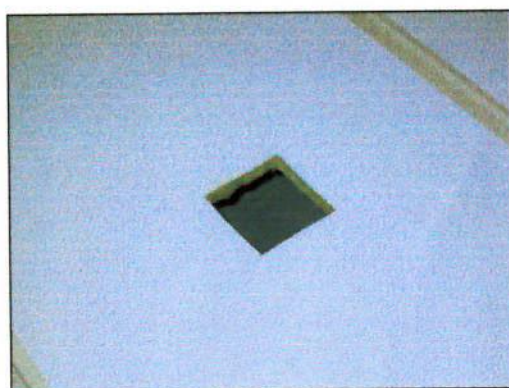


Fig.5.21: Detalhe da abertura.

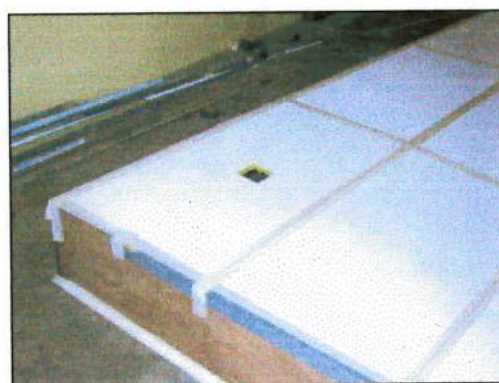


Fig.5.22: Posicionamento da abertura.

Após o ensaio, a abertura no painel foi aumentada em quatro vezes, passando às dimensões de 200 mm x 200 mm, e então foi feito um novo ensaio. As fotografias das Figuras 5.23 e 5.24 ilustram a montagem.

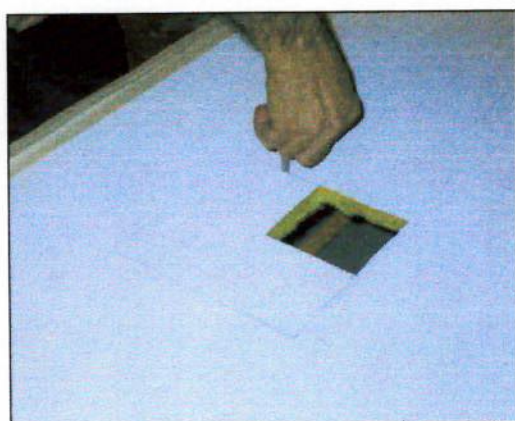


Fig.5.23: Ampliação da abertura.

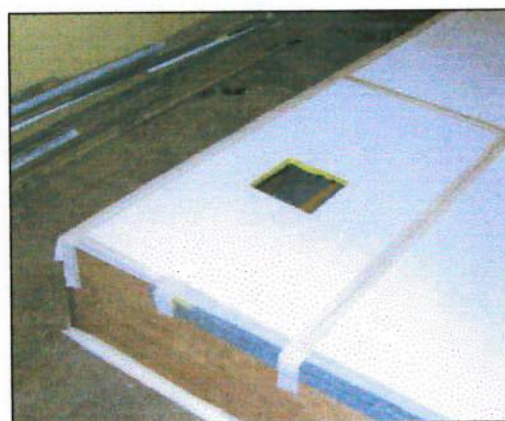


Fig.5.24: Posicionamento da nova abertura.

A Tabela 5.7 apresenta os coeficientes de absorção sonora e as respectivas incertezas das três configurações de montagem descritas.

Tabela 5.7: Dados dos ensaios de três configurações de abertura no painel.

Frequência (Hz)	Sem abertura		Abertura de 100 mm de lado		Abertura de 200 mm de lado	
	α	$U(\alpha)$	α	$U(\alpha)$	α	$U(\alpha)$
100	0,48	0,28	0,50	0,43	0,44	0,25
125	0,39	0,18	0,38	0,18	0,35	0,15
160	0,54	0,18	0,53	0,14	0,56	0,16
200	0,42	0,10	0,41	0,10	0,43	0,09
250	0,44	0,11	0,43	0,09	0,44	0,10
315	0,48	0,06	0,48	0,04	0,49	0,04
400	0,64	0,11	0,62	0,11	0,65	0,09
500	0,72	0,07	0,71	0,12	0,73	0,08
630	0,69	0,08	0,69	0,06	0,70	0,11
800	0,72	0,07	0,72	0,07	0,73	0,08
1000	0,70	0,06	0,68	0,09	0,68	0,06
1250	0,68	0,06	0,67	0,05	0,67	0,08
1600	0,62	0,07	0,63	0,07	0,61	0,09
2000	0,55	0,06	0,54	0,06	0,54	0,05
2500	0,46	0,08	0,45	0,08	0,42	0,10
3150	0,36	0,11	0,36	0,11	0,32	0,17
4000	0,21	0,14	0,20	0,22	0,18	0,11
5000	0,03	0,26	0,04	0,16	0,00	0,14

A Figura 5.25 apresenta os coeficientes de absorção sonora das três condições em forma gráfica. As linhas tracejadas representam os coeficientes de absorção sonora da primeira configuração, acrescidos e decrescidos de suas respectivas incertezas.

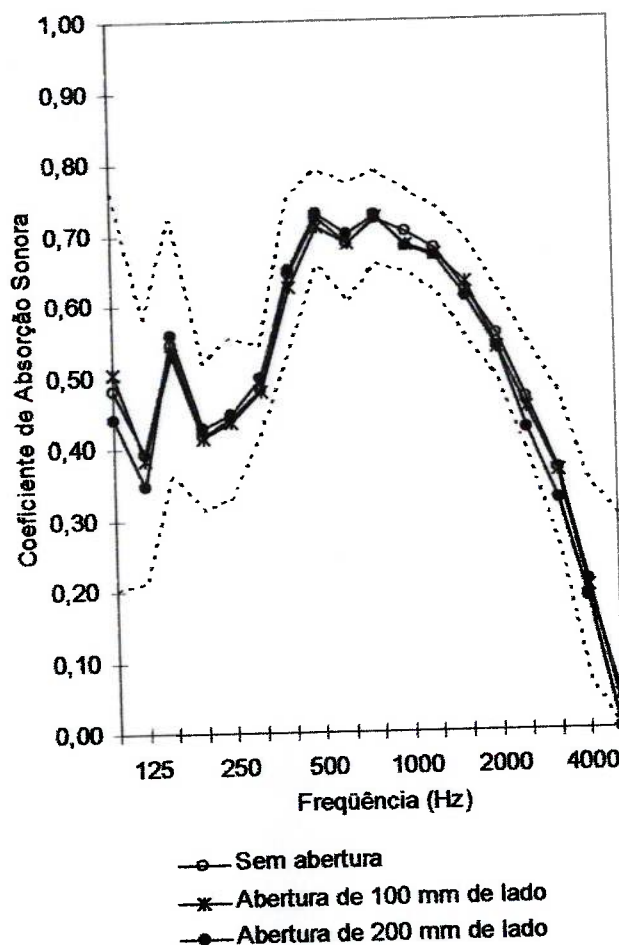


Fig. 5.25: Comparação entre as configurações de abertura no painel.

Similarmente aos resultados apresentados no item 5.3, relativos às diferentes configurações de vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara, uma análise do gráfico da Figura 5.25 demonstra que praticamente não houve diferenças entre os resultados da amostra sem e com as duas diferentes aberturas em sua superfície. Trata-se de mais uma evidência de que o controle de frestas e vedação do espaço enclausurado é de menor importância para os resultados finais.

Visando analisar a possibilidade de as amostras ensaiadas com as aberturas nos painéis atuarem como absorvedores de Helmholtz, cuja descrição consta do item 3.1.6 do Capítulo 3, foram calculadas as freqüências de ressonância das amostras para as duas dimensões de abertura, conforme a eq.(3.6). Ambos os resultados, 20,6 Hz para a abertura de 100 mm de lado e 41,2 Hz para a abertura de 200 mm de lado, localizam-se fora do espectro de freqüências analisado neste estudo.

5.6 Presença de modos acústicos no interior do volume delimitado pelo suporte de madeira.

Conforme o item 4.4.5 do Capítulo 4, esta etapa da pesquisa visa investigar a possível existência de modos acústicos axiais no interior do espaço de ar enclausurado pelo suporte de madeira e pelos painéis de forro. Numa aplicação real, tais modos não deveriam ocorrer no plenum, e poderiam exercer influência sobre os coeficientes de absorção sonora da amostra. Mais especificamente, será averiguada a ocorrência de ondas estacionárias paralelas às superfícies internas do suporte de madeira. A Tabela 4.1 do item 4.4.5 do Capítulo 4 apresenta os modos axiais primários, secundários e terciários, em relação ao comprimento e à largura do espaço de ar enclausurado pela amostra.

Como referência, foram considerados os valores do terceiro ensaio do item 5.3, com a montagem do suporte com dupla vedação suporte-piso, e sem vedação entre os painéis de forro.

Dois painéis de forro foram removidos da amostra, e uma tábua de madeira foi posicionada no interior do espaço enclausurado pela amostra, apoiada diretamente no piso da câmara, sem contato com qualquer elemento da amostra. As Figuras 5.26 e 5.27 ilustram o posicionamento da tábua. Após a disposição da tábua, os painéis de forro removidos foram reposicionados.



Fig.5.26: Posicionamento da tábua.

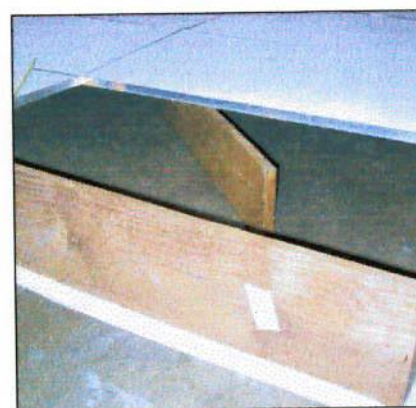


Fig.5.27: Disposição da tábua.

A Tabela 5.8 apresenta os coeficientes de absorção sonora e as respectivas incertezas das duas configurações de montagem descritas.

Tabela 5.8: Comparação dos resultados da amostra com e sem a presença da tábua.

Frequência (Hz)	Sem a tábua		Com a tábua	
	α	$U(\alpha)$	α	$U(\alpha)$
100	0,46	0,27	0,48	0,26
125	0,36	0,25	0,44	0,26
160	0,66	0,23	0,68	0,33
200	0,54	0,10	0,54	0,12
250	0,53	0,10	0,51	0,06
315	0,54	0,05	0,56	0,05
400	0,67	0,10	0,69	0,13
500	0,74	0,08	0,76	0,08
630	0,70	0,11	0,69	0,08
800	0,76	0,07	0,77	0,11
1000	0,73	0,08	0,74	0,06
1250	0,73	0,05	0,74	0,12
1600	0,69	0,09	0,67	0,11
2000	0,62	0,08	0,59	0,08
2500	0,53	0,12	0,49	0,29
3150	0,41	0,15	0,39	0,10
4000	0,31	0,11	0,22	0,10
5000	0,15	0,15	0,00	0,13

A Figura 5.28 apresenta os coeficientes de absorção sonora das duas condições em forma gráfica. As linhas tracejadas representam os coeficientes de absorção sonora da primeira configuração, acrescidos e decrescidos de suas respectivas incertezas.

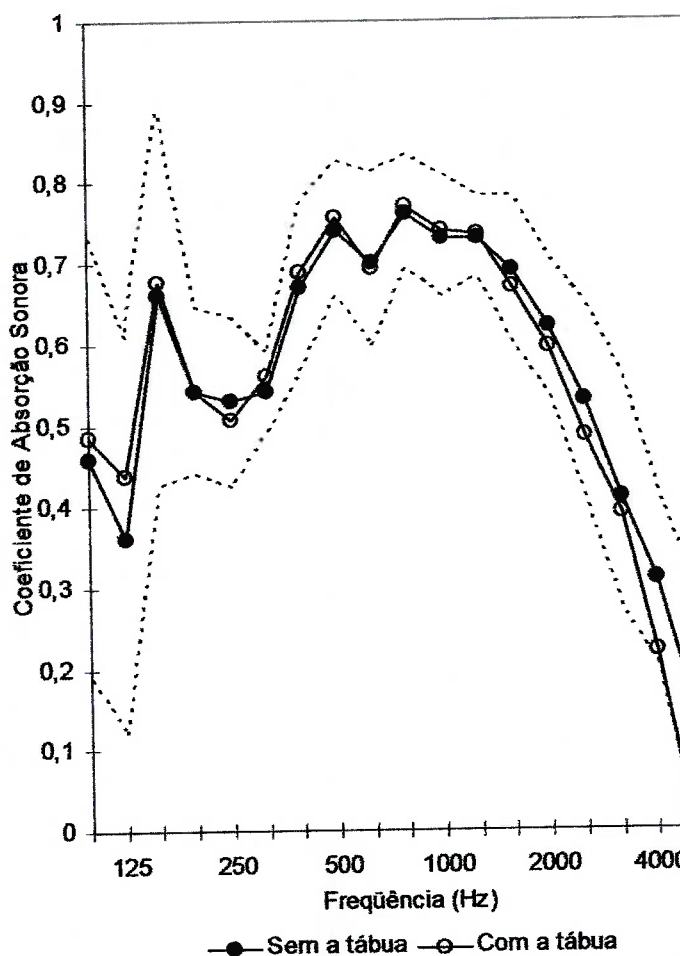


Fig.5.28: Comparação dos resultados da amostra com e sem a presença da tábua.

Os dados apresentados demonstram que a influência esperada, para frequências abaixo de 200 Hz, não pôde ser confirmada. Apesar de uma diferença mais acentuada ($\Delta\alpha = 0,08$) na faixa de frequência de 125 Hz, o autor considera o resultado pouco representativo, visto os maiores desvios do coeficiente nas frequências mais baixas.

Existe uma diferença perceptível distribuída nas frequências acima de 1250 Hz, o que pode ter como causa a absorção sonora da tábua.

5.7 Variação do volume da câmara reverberante sobre os cálculos devida à presença da amostra

Neste item, será tratada a questão da influência da variação do volume da câmara reverberante sobre os cálculos dos coeficientes de absorção sonora da amostra tipo E-300. De fato, conforme apresentado no item 4.4.4 do Capítulo 4, o volume total da amostra ensaiada é de aproximadamente $3,6 \text{ m}^3$, correspondendo a aproximadamente 1,6 % do volume total da câmara reverberante.

Para este estudo, serão considerados como referência os resultados da primeira montagem descrita no item 5.3, ou seja, amostra montada conforme o tipo E-300, sem qualquer tipo de vedação.

De acordo com a eq.(3.8) apresentada no Capítulo 3, o modelo da fórmula de Sabine utilizado pela norma ISO 354 adota o mesmo valor do volume do ambiente para ambas as medições de tempo de reverberação (sem e com a presença da amostra), portanto não considerando a possível variação do volume pela presença da amostra na câmara.

A eq.(5.1) apresenta um outro formato de fórmula de Sabine para o cálculo da absorção sonora A , considerando a variação de volume da câmara nas medições de T_1 e de T_2 .

$$A = \frac{55,3V_1}{c_2T_2} - \frac{55,3V_2}{c_1T_1} - 4V_2m_2 + 4V_1m_1 \quad (5.1)$$

A Tabela 5.9 apresenta os valores dos coeficientes de absorção sonora calculados a partir das medições de tempo de reverberação apresentados no item 5.3. A primeira coluna de coeficientes apresenta os valores calculados conforme a fórmula original, a eq.(3.8). A segunda coluna apresenta as respectivas incertezas. A terceira coluna apresenta os valores dos coeficientes calculados conforme a eq.(5.1), a partir dos mesmos valores de tempo de reverberação, e a quarta coluna apresenta as respectivas incertezas.

Tabela 5.9 Comparação dos coeficientes de absorção sonora conforme dois tipos de cálculo.

Frequência (Hz)	$\alpha_{ISO 354}$	$U(\alpha_{ISO 354})$	$\alpha_{\text{variação de volume}}$	$U(\alpha_{\text{variação de volume}})$
100	0,40	0,25	0,41	0,25
125	0,39	0,24	0,40	0,24
160	0,65	0,23	0,66	0,23
200	0,56	0,12	0,57	0,12
250	0,54	0,09	0,55	0,09
315	0,57	0,07	0,58	0,07
400	0,70	0,13	0,71	0,13
500	0,76	0,11	0,77	0,11
630	0,70	0,06	0,71	0,06
800	0,77	0,06	0,78	0,06
1000	0,75	0,09	0,76	0,09
1250	0,74	0,05	0,75	0,05
1600	0,71	0,09	0,72	0,09
2000	0,64	0,06	0,66	0,06
2500	0,57	0,06	0,61	0,06
3150	0,47	0,04	0,54	0,04
4000	0,34	0,07	0,46	0,07
5000	0,19	0,04	0,38	0,04

O gráfico da Figura 5.29 apresenta os mesmos valores. As linhas tracejadas representam os coeficientes de absorção sonora da primeira forma de cálculo, acrescidos e decrescidos de suas respectivas incertezas.

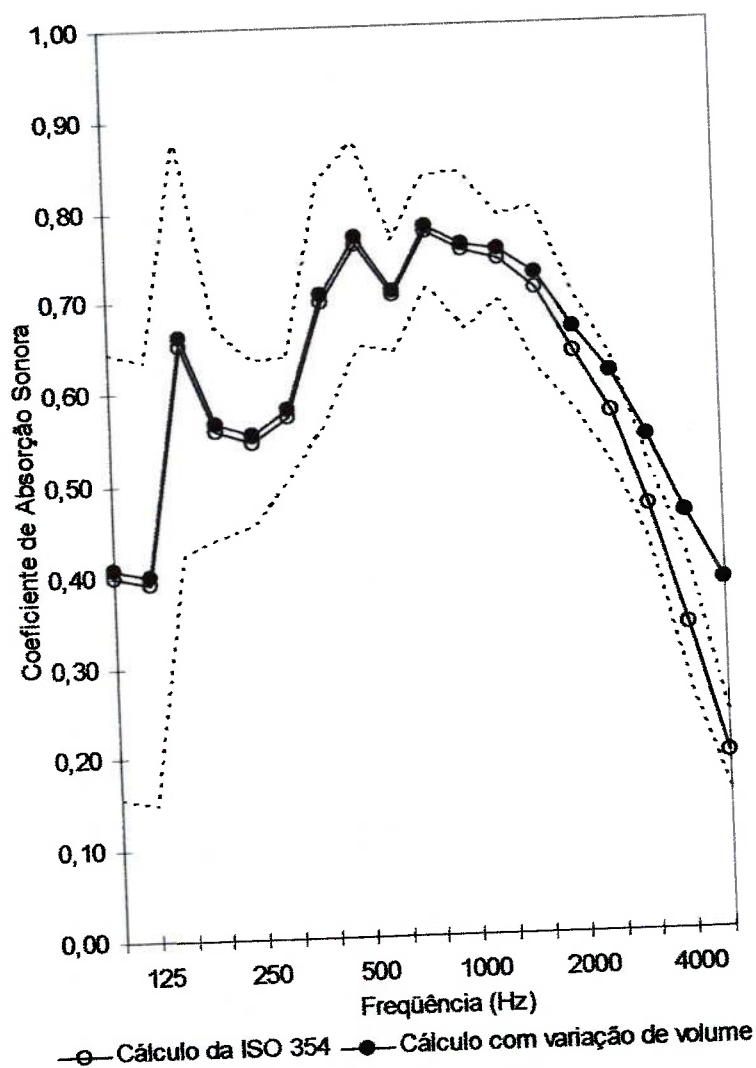


Fig.5.29: Comparação dos coeficientes de absorção sonora conforme dois tipos de cálculo.

Os dados apresentados evidenciam um ganho significativo para as frequências acima de 2000 Hz, quando é considerada a variação do volume da câmara reverberante nos cálculos. Novas pesquisas deverão ser realizadas para aprofundar o tema, explorando melhor as variáveis envolvidas, o volume da amostra e o volume da câmara reverberante.

6 CONCLUSÕES

6.1 Considerações gerais

Este trabalho teve o objetivo de avaliar a influência de uma série de parâmetros de montagem de uma amostra de forro suspenso sobre os resultados do ensaio de absorção sonora em câmara reverberante. Também foram analisados alguns parâmetros do método de cálculo dos coeficientes de absorção sonora.

Devido à freqüente impossibilidade de se montar um sistema de forro suspenso em uma câmara reverberante, a norma ISO 354 (2003) determina que a amostra seja montada em um sistema invertido, formado por um suporte estanque de material reflexivo, sobre o qual é apoiado um perfilado metálico com os painéis de forro. Este tipo de montagem de amostra eleva os coeficientes de absorção sonora da amostra (notadamente nas baixas freqüências), assim como produz elevados desvios de resultados quando um mesmo tipo de amostra é ensaiado em laboratórios diferentes. Estes desvios geram inconvenientes não apenas no âmbito científico, que ainda busca explicar seus motivos, como também nas relações de mercado, quando são comparados os resultados do desempenho de um mesmo produto, apresentados em catálogos comerciais provenientes de ensaios em laboratórios distintos.

Uma das prováveis fontes de tais desvios é o pouco detalhamento das especificações de montagem que consta na norma ISO 354 (2003). As especificações da montagem, denominada "tipo E", são apresentadas no Anexo B da norma em um texto incompleto e confuso, incluindo um trecho do texto equivocadamente repetido. Um dos únicos detalhes práticos de montagem descritos no texto diz respeito à vedação entre o suporte e o piso da câmara e entre o suporte e os painéis de forro, o que, conforme verificado experimentalmente no presente trabalho (item 6.3), aparenta tratar-se de um parâmetro de pouca influência sobre os resultados finais.

A seguir, são apresentadas as principais conclusões sobre os parâmetros estudados.

6.2 Influência da absorção sonora do suporte de madeira

O Anexo B da norma ISO 354 (2003) determina que o material do suporte utilizado na montagem “tipo E” seja “não poroso”. Neste trabalho, foi utilizado um suporte de madeira maciça, considerado o material mais comum para este tipo de montagem.

O gráfico da Figura 5.4, que apresenta uma comparação da absorção sonora do suporte de madeira, dos painéis de forro dispostos diretamente no piso e da montagem tipo E-300 completa (suporte de madeira com o perfilado metálico e os painéis de forro), demonstra que nas faixas de frequência acima de 2500 Hz a absorção sonora do suporte de madeira representa uma parcela significativa da absorção sonora da montagem completa. Este resultado é indesejado, visto que o suporte não é parte do sistema de forro suspenso, e sim apenas um artifício utilizado para se simular o sistema no ensaio de absorção sonora.

Os painéis de forro utilizados nos ensaios, constituídos de lã de vidro com uma película plástica revestindo a face aparente, representam um tipo de produto muito utilizado no país. Portanto, a interferência da absorção sonora do suporte, construído com um material comum para a aplicação, sobre os resultados da montagem final da amostra, na qual são utilizados painéis de forro representativos do mercado, constitui um exemplo real da influência do suporte no ensaio de absorção sonora de um sistema de forro suspenso.

O procedimento alternativo de ensaio, apresentado no item 5.2 do Capítulo 5 deste trabalho, propõe que a medição dos tempos de reverberação da sala vazia (ver item 3.3 do Capítulo 3) seja feita **com** a presença do suporte. Deste modo, a absorção sonora do mesmo seria descontada da absorção sonora da amostra final. A Tabela 5.4 e o gráfico da Figura 5.5 apresentam a comparação dos resultados deste procedimento com os do procedimento da norma. Os dados demonstram que a absorção sonora do suporte de madeira eleva os coeficientes de absorção sonora da montagem final em todas as frequências a partir de 160 Hz, quando o procedimento original da norma é utilizado.

Deste modo, o procedimento alternativo de cálculo apresentado evidencia ser o mais correto, desvinculando do resultado final do ensaio as características de absorção sonora do suporte, assim diminuindo os citados desvios interlaboratoriais.

6.3 Influência da vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante

Conforme comentado no item 6.1, uma das únicas considerações da norma ISO 354 (2003) a respeito da montagem de uma amostra do “tipo E” é feita em referência à vedação entre o suporte e o piso da câmara reverberante e entre o suporte e os painéis de forro. O item 5.3 do Capítulo 5 apresenta os resultados de ensaios com três configurações de vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara: sem vedação (com a existência de frestas), com vedação parcial com fitas adesivas, e com dupla vedação com fitas adesivas. Durante os ensaios realizados nesta etapa, não havia frestas entre o suporte de madeira e os painéis de forro.

Os resultados apresentados na Tabela 5.5 e no gráfico da Figura 5.13 demonstram que, exceto para uma pequena queda dos coeficientes entre 250 Hz 500 Hz e entre 2500 Hz e 5000 Hz quando efetuada a dupla vedação com fitas adesivas, a diferença entre as três configurações é sutil, e pode ser considerada de importância secundária.

Estes resultados não corroboram com as exigências da norma em relação à vedação em detrimento de outros detalhes mais relevantes, como os parâmetros discutidos nos itens 6.2, 6.5 e 6.7. Pesquisas adicionais, utilizando, por exemplo, diversos tipos de materiais para a construção do suporte, diversos tipos de painéis de forro e diferentes condições de frestas entre o suporte e o piso, poderiam contribuir para melhor definir a influência deste parâmetro.

6.4 Influência da exposição das laterais dos painéis de forro

Conforme discutido no item 4.4.6 do Capítulo 4, na montagem real de um sistema de forro suspenso no qual se utilizam perfis “T” para a sustentação de seus painéis, as bordas destes não ficam expostas à face aparente do sistema, sendo cobertas pelos perfis. Quando é montado o sistema invertido conforme o “tipo E” para o ensaio de absorção sonora em câmara reverberante, as bordas dos painéis não são mais

cobertas pela base dos perfis “T”, ficando parcialmente expostas devido a folgas naturais da montagem.

O item 5.4 do Capítulo 5 apresenta os coeficientes de absorção sonora medidos em três configurações de amostra, envolvendo a vedação das laterais dos painéis: sem vedação, vedação com uma camada de fitas adesivas e vedação com duas camadas de fitas adesivas.

Os resultados apresentados na Tabela 5.6 e no gráfico da Figura 5.18 evidenciam a forte influência da vedação das laterais dos painéis. Uma vez efetuada a vedação, praticamente todo o espectro a partir de 125 Hz foi alterado, observando-se uma redução substancial dos coeficientes de absorção sonora em praticamente todas as faixas de frequência, notadamente nas faixas de frequência entre 160 Hz e 250 Hz e acima de 2000 Hz.

Os dados confirmam que a vedação simples com fitas adesivas é suficiente para corrigir a exposição das laterais dos painéis. A vedação com dupla camada de fitas adesivas praticamente não alterou os resultados.

A influência do parâmetro testado obviamente depende da natureza dos painéis de forro, das dimensões envolvidas (que definirão as folgas entre os painéis e o perfilado e a área total de exposição das laterais) e do tipo de perfilado adotado. De qualquer modo, a utilização de perfis “H” ao invés de perfis “T” seria provavelmente suficiente para resolver o problema.

A exposição das laterais dos painéis de forro na montagem “tipo E” evidencia ser uma importante fonte de desvios de coeficientes de absorção sonora, prejudicando a reprodutividade do ensaio. Sua influência para casos gerais poderia ser estudada mais a fundo, mediante uma pesquisa envolvendo diferentes tipos de materiais e configurações de montagem.

6.5 Influência de aberturas controladas nos painéis da amostra

Esta etapa do trabalho buscou determinar uma relação entre a área total de aberturas ligando o volume de ar enclausurado pela amostra e o ambiente da câmara

reverberante. Numa montagem usual, esta ligação seria feita por frestas entre os painéis de forro, entre os painéis de forro e o suporte e entre o suporte e o piso da câmara. Na montagem testada, as frestas citadas foram vedadas com fitas adesivas, e a ligação entre o volume de ar enclausurado e o ambiente da câmara reverberante foi feita exclusivamente por uma abertura quadrada no centro de um dos painéis de forro (ver item 5.5 do Capítulo 5).

Para este estudo, foram ensaiadas três configurações: a amostra totalmente vedada, a amostra com uma abertura quadrada de 100 mm de lado em um dos painéis, e a amostra com uma abertura quadrada de 200 mm de lado em um dos painéis. As áreas das aberturas são valores representativos da área total de eventuais frestas da montagem. A Tabela 5.7 e o gráfico da Figura 5.25 apresentam os resultados dos testes.

Os dados demonstram que a diferença entre os coeficientes de absorção sonora das três configurações é mínima. Este resultado é coerente com os dados obtidos no item 6.3, referente à influência da vedação entre o suporte de madeira e o piso da câmara reverberante.

O estudo realizado com aberturas controladas na área da amostra reforça a idéia de que a vedação de frestas da montagem é um fator de influência secundária sobre os resultados do ensaio.

6.6 Verificação da presença de modos acústicos no interior do volume delimitado pelo suporte de madeira

O item 5.6 do Capítulo 5 apresenta os resultados dos ensaios feitos visando averiguar a presença de modos acústicos axiais no interior do espaço de ar enclausurado pelo suporte de madeira e pelos painéis de forro. Tais modos, causados pelo paralelismo das tábuas que formam o suporte de madeira, não seriam inerentes ao sistema de forro ensaiado, e poderiam influir no resultado final do teste.

A Tabela 4.1 do Capítulo 4 apresenta os modos axiais de primeira, segunda e terceira ordens, referentes ao comprimento e à largura do volume de ar enclausurado. As frequências dos modos são todas inferiores a 200 Hz. Portanto, ao testar a influência

dos eventuais modos, espera-se que os resultados seriam alterados nestas faixas de frequência.

A disposição de uma tábua disposta diagonalmente no interior do espaço enclausurado visa interferir nos citados modos acústicos, bloqueando-os parcialmente. A comparação da situação com e sem a presença da tábua é apresentada nos dados da Tabela 5.8 e do gráfico da Figura 5.28.

Uma análise dos dados resulta em duas considerações a respeito das alterações devido à presença da tábua:

- Aumento do coeficiente de absorção sonora na faixa de frequência de 125 Hz: é possível que seja causado pela interferência em um modo acústico no interior do volume de ar enclausurado, no caso, o modo axial terciário relativo ao comprimento do suporte, centrado em 136,5 Hz (ver Tabela 4.1). Porém, apesar de a diferença observada ($\Delta\alpha = 0,08$) não ser pequena, é inferior à incerteza do coeficiente de absorção sonora nesta faixa de frequência ($U(\alpha) = 0,25$ e $0,26$, respectivamente com e sem a tábua). Neste caso, o autor considera o dado pouco indicativo, e não é possível concluir sobre a influência do parâmetro testado.
- Decréscimo dos coeficientes a partir de 1600 Hz: este resultado provavelmente não ocorre pela influência da tábua junto a modos acústicos, tendo em vista as faixas de frequências envolvidas. As possíveis causas de tais alterações seriam a absorção sonora da tábua de madeira, e o aumento da difusão sonora no interior do espaço enclausurado.

6.7 Influência da variação do volume da câmara reverberante sobre os cálculos devida à presença da amostra

A norma ISO 354 (2003) não apresenta qualquer correção da variação do volume da câmara reverberante devido à presença da amostra. Conforme discutido no item 5.7 do Capítulo 5. No presente estudo, o volume da amostra corresponde a aproximadamente 1,6 % do volume da câmara, volume este que é “subtraído” do volume original da câmara devido à presença da amostra.

O estudo deste parâmetro consistiu na adoção de duas formas de cálculo dos coeficientes de absorção sonora a partir da medição dos tempos de reverberação da câmara vazia e com a presença da amostra. A primeira forma de cálculo é tal qual apresentada na norma ISO 354 (2003), e a forma alternativa considera a variação do volume da câmara na determinação dos coeficientes de absorção sonora, como consta na eq.(5.1).

A Tabela 5.9 e o gráfico da Figura 5.29 apresentam a comparação direta dos resultados das duas formas de cálculo. Conforme observado, os coeficientes de absorção sonora das frequências a partir de 2000 Hz são progressivamente maiores quando o cálculo alternativo é adotado, chegando a ser o dobro na faixa de frequência de 5000 Hz.

Este resultado evidencia que a variação de volume é um importante parâmetro a ser considerado nos cálculos. Pesquisas posteriores, abrangendo diversos volumes de amostra, poderão confirmar este resultado.

6.8 Comentários sobre a incerteza das medições

Os valores de incerteza calculados e apresentados ao longo do Capítulo 5 são consideravelmente elevados, muitas vezes excedendo as diferenças observadas devido à variação dos parâmetros testados. O fato de a norma ISO 354 (2003) não apresentar um modelo para o cálculo da incerteza do ensaio demonstra a dificuldade e a falta de conclusões sobre o assunto.

O cálculo de incertezas apresentado no final do Capítulo 3 é baseado nos desvios-padrão das medições das variáveis empregadas pela fórmula de Sabine, utilizada na norma ISO 354 (2003). De tais variáveis, a medida dos tempos de reverberação da câmara com a presença da amostra é a que mais influencia os valores finais das incertezas, nem tanto pelos desvios-padrão obtidos das medições, mas pelo método de cálculo das incertezas combinadas.

Pesquisas posteriores poderão chegar a um novo cálculo de incertezas, buscando um modelo que contemple maior coerência com os valores de repetitividade e de reprodutibilidade do ensaio em laboratório.

6.9 Considerações finais

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram a influência de certos parâmetros relativos à montagem de uma amostra “tipo E” sobre os coeficientes de absorção sonora medidos em câmara reverberante. Também alguns parâmetros relativos ao método de ensaio da amostra foram testados.

Os resultados experimentais demonstram a importância de uma harmonização de alguns detalhes de montagem deste tipo de amostra, detalhes estes que podem significar uma considerável diminuição dos desvios entre resultados de ensaios executados em diferentes laboratórios.

6.10 Propostas para novas pesquisas

Os resultados desta pesquisa devem servir de fonte para outros estudos, aumentando o conhecimento sobre o objeto da pesquisa, os sistemas de forro suspenso e o ensaio de absorção sonora em câmara reverberante. O autor considera como possíveis focos de novos trabalhos:

- Análise da influência dos materiais da construção do suporte sobre os coeficientes de absorção sonora obtidos.
- Estudo da influência de diferentes tipos de painéis de forro.
- Estudo aprofundado da influência de frestas que liguem o espaço de ar enclausurado ao volume de ar da câmara reverberante.

- Estudo da influência da utilização de diferentes tipos de perfilado.
- Análise da influência do volume da amostra no cálculo dos tempos de reverberação.
- Análise da influência da mobilidade do perfilado metálico (perfilado sem e com apoios intermediários).
- Análise do comportamento da amostra como absorvedor de painel.
- Análise da influência das dimensões da amostra.
- Estudo do campo sonoro no interior do espaço enclausurado.
- Comparação dos coeficientes de absorção sonora de uma amostra “tipo E” com os medidos em uma aplicação real.

ANEXO - MÉTODO DE MEDIÇÃO POR RESPOSTA IMPULSIVA INTEGRADA E MLS

Este capítulo é dedicado à apresentação do método de medição utilizado nos ensaios de laboratório deste trabalho experimental. Não se trata de uma análise aprofundada do tema, e sim de uma introdução aos principais conceitos envolvidos com o método, alguns dos quais não são triviais ou intuitivos, e necessitam para sua compreensão de um embasamento matemático relativamente complexo.

Inicialmente são vistas as características gerais do sistema de medições do Laboratório de Acústica do IPT, sob a ótica da teoria geral de sistemas e sinais. Em seguida, é apresentado o método de medição acústica por resposta impulsiva proposto por Schroeder, assim como suas conseqüências e sua evolução. Finalmente, são apresentados os conceitos e a implementação do sinal MLS utilizado como sinal de excitação acústica da câmara reverberante.

A.1 Sistema de medições do Laboratório de Acústica do IPT

O método de medições empregado nesta pesquisa, conhecido como método de resposta impulsiva integrada, exige que o *sistema* eletroacústico de medição seja linear e invariante no tempo. Caso contrário, o processamento dos dados de medição apresenta resultados errôneos (SCHROEDER, 1965; CHU, 1978).

O sistema considerado neste trabalho representa a câmara reverberante e os circuitos de geração e recepção do sinal sonoro, conforme ilustrado na Figura A.1. Como meio de propagação do som na câmara reverberante, o ar pode ser considerado um sistema linear, uma vez que os valores de pressão sonora nele transmitidos não ultrapassem valores extremos, da ordem de 1 atmosfera, situação em que não serão mais válidas as principais leis de propagação acústica (KUTTRUFF, 1991). Porém, não existe a possibilidade de tais valores de pressão sonora serem atingidos pelo sistema de áudio utilizado neste trabalho; sendo assim, ondas acústicas propagadas no interior da câmara reverberante obedecem às leis de homogeneidade e de aditividade que conferem a um sistema a característica de linearidade.

O quesito de invariância no tempo pode ser aferido ao ar no interior da câmara quando se considera que possíveis alterações nas condições ambientais, como

mudanças de temperatura e umidade, dão-se em uma velocidade muito inferior à dos demais eventos inerentes ao processo de medição (BJOR, 1995); considera-se também que, por ser a câmara reverberante um ambiente fechado, não há grandes movimentações de ar causadas por vento.

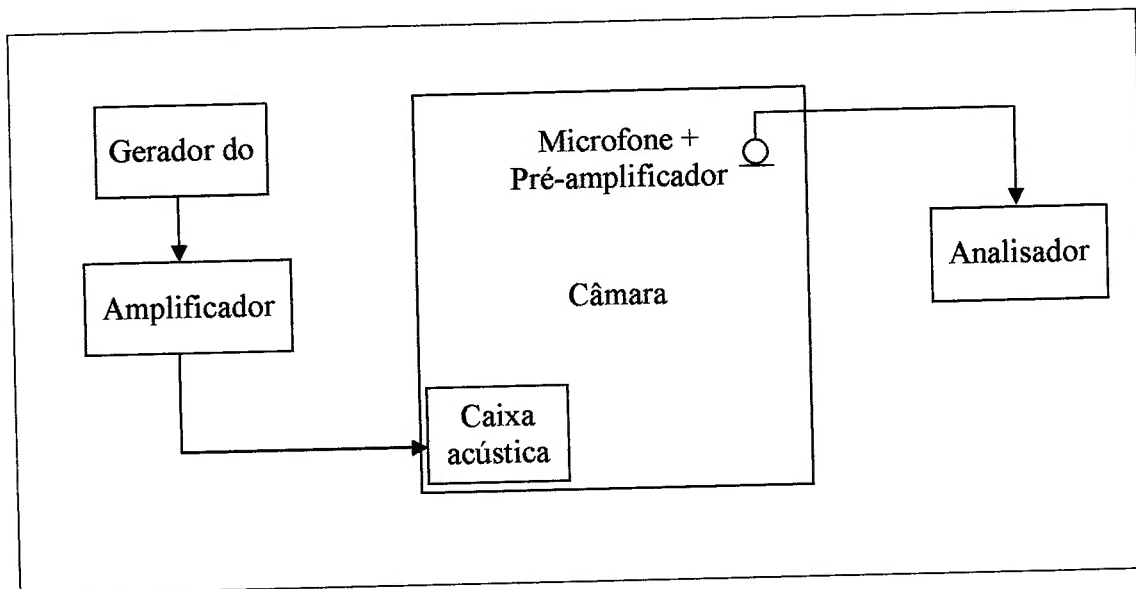


Fig. A.1: Sistema de medição de tempo de reverberação.

A câmara reverberante em si, ou seja, os elementos construtivos e os difusores, podem ser intuitivamente considerados sistemas lineares e invariantes no tempo, contanto que não sejam empregados dispositivos móveis, como difusores rotativos ou pedestais de microfone rotativos (VORLÄNDER e KOB, 1997).

Os elementos eletroacústicos de geração e captação do sinal acústico (detalhados no Apêndice) também podem ser fontes de não-linearidades do sistema, principalmente o alto-falante da caixa acústica. Este, quando trabalhando em um regime de sobrecarga, sua bobina atinge altas temperaturas, levando a um comportamento extremamente não-linear (SILVA, 1996 e 2000). Trata-se, porém, de um caso extremo, e que não caracteriza o caso do sistema do laboratório em questão. O equipamento de áudio utilizado para a amplificação e para a irradiação do sinal acústico utilizado trabalha em um regime de até 5% de sua potência nominal (450W por canal), faixa em que o sistema eletroacústico (e, notoriamente, o alto-falante) pode ser considerado praticamente linear. Vale considerar que o método de medição por resposta impulsiva integrada utilizando sinais MLS requer uma relação sinal/ruído muito menor do que o método convencional de medição por sinal

interrompido (VORLÄNDER e KOB, 1997), o que na prática significa a possibilidade de efetuar-se as medições gerando níveis mais baixos de pressão sonora na câmara reverberante, e conseqüentemente exigindo menos do sistema de áudio de geração do sinal.

O microfone utilizado nas medições, marca Brüel & Kjaer, modelo 4166, apresenta saturação (e, portanto, resposta não-linear) para níveis de pressão sonora a partir de 150 dB, níveis muito superiores aos gerados na câmara reverberante. Em relação aos outros elementos eletroacústicos do sistema, eventuais não-linearidades são ainda mais remotas.

A.2 A resposta impulsiva de sistemas LIT e a integral de convolução

A resposta impulsiva e a resposta em frequência são os principais parâmetros descritivos de um sistema LIT. A resposta impulsiva $h(t)$ de um sistema descreve seu comportamento a um impulso de Dirac $\delta(t)$ como entrada, estando o sistema em repouso inicial (SMITH, 1999).

A grande vantagem em se conhecer a resposta impulsiva $h(t)$ de um sistema LIT, é a capacidade de se obter a resposta do sistema a *qualquer* tipo de entrada. Para demonstrá-lo, seja um sinal de entrada $u(t)$ qualquer, que pode ser descrito por:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) \cdot \delta(t - \tau) d\tau \quad (\text{A.1})$$

Sendo o sistema linear e invariante no tempo, a saída $y(t)$ pode ser descrita por um operador linear desconhecido $H[u(t)]$, conforme a eq.(A.2).

$$y(t) = H[u(t)] = H\left[\int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) \cdot \delta(t - \tau) d\tau\right] \quad (\text{A.2})$$

Conforme as propriedades dos sistemas LIT descritas no item A.1, pode-se considerar a seguinte igualdade:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) \cdot H[\delta(t - \tau)] d\tau \quad (\text{A.3})$$

Sendo $h(t)$ a resposta impulsiva do sistema, tem-se que a expressão $H[\delta(t - \tau)]$ é justamente a resposta impulsiva deslocada de τ , ou seja, $h(t - \tau)$. Deste modo, a eq.(A.3) pode ser reduzida a:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (\text{A.4})$$

Define-se integral de convolução qualquer integral no formato

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f1(\tau) \cdot f2(t - \tau) d\tau = f1(t) * f2(t) \quad (\text{A.5})$$

Na qual

$f1(t)$ e $f2(t)$ são funções na variável t .

τ é uma variável auxiliar.

Portanto, conforme a eq.(A.4), a saída $y(t)$ de um sistema LIT como resposta a uma entrada $u(t)$, é dada pela convolução de $u(t)$ com a resposta impulsiva $h(t)$:

$$y(t) = u(t) * h(t) \quad (\text{A.6})$$

A integral de convolução possui várias propriedades que não serão discutidas neste texto; uma delas, porém, é fundamental para a compreensão do método de medição por MLS: a função de Dirac $\delta(t)$ é o *elemento identidade* da função de convolução, ou seja, a função que, quando convoluída com um sinal de entrada $u(t)$, gera como saída o próprio sinal $u(t)$:

$$u(t) * \delta(t) = u(t) \quad (\text{A.7})$$

Outro conceito importante para o desenvolvimento da técnica de medição por MLS é o de *correlação*, função definida por:

$$\Phi_{yx} = y(t) * x(-t) \quad (\text{A.8})$$

Na qual:

Φ_{yx} = correlação entre $y(t)$ e $x(t)$.

$y(t)$ = sinal gravado (saída do sistema).

$x(t)$ = seqüência MLS (entrada do sistema).

A correlação pode ser feita sobre um só sinal, função denominada *auto-correlação*, definida pela seguinte equação:

$$\Phi_{xx} = x(t) * x(-t) \quad (\text{A.9})$$

Na qual:

$$\Phi_{xx} = \text{auto-correlação de } x(t).$$

A.3 Método de resposta impulsiva integrada em acústica

A utilização da teoria de sistemas em medições acústicas foi proposta por Schoeder em um artigo publicado em 1965 (SCHROEDER, 1965). Como uma alternativa ao método de medição do tempo de reverberação por sinal interrompido (descrito no Capítulo 3), que é um processo de natureza estatística, Schroeder apresentou uma metodologia que visa determinar a resposta impulsiva do sistema acústico que representa o campo sonoro de uma câmara reverberante.

A primeira consideração feita pelo pesquisador alemão foi a de que o sistema em questão é um sistema tipo LIT, conforme tratado no item A.1. A segunda consideração foi a de que o sinal de excitação da sala, utilizado em uma medição de tempo de reverberação por sinal interrompido, é um *ruído branco estacionário*, sinal de banda larga comumente empregado nas medições de tempo de reverberação por sinal interrompido. Por ser um sinal estacionário e aleatório, o sinal tem a propriedade de ter a média de sua função de autocorrelação nula para qualquer tempo t , exceto para $t_1 = t_2$, conforme a eq.(A.10).

$$\langle n(t_1) \cdot n(t_2) \rangle = N \cdot \delta(t_2 - t_1) \quad (\text{A.10})$$

Na qual:

$n(t)$ = sinal estacionário e aleatório (ruído branco).

N = constante proporcional à potência sonora emitida.

δ = função de Dirac.

Conforme o método de cálculo de tempo de reverberação por sinal interrompido, descrito no Capítulo 3, a resposta do decaimento sonoro em um determinado ponto da câmara reverberante, após a interrupção da emissão do ruído, pode ser descrita por:

$$s(t) = \int_{-\infty}^0 n(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (\text{A.11})$$

Na qual:

$s(t)$ = sinal recebido em um ponto da câmara.

$h(t)$ = resposta impulsiva do sistema (câmara + sistema eletroacústico).

O limite superior da integral, assinalado 0, é o instante da interrupção da geração do ruído. O limite inferior da integral, assinalado $-\infty$, na prática pode ser considerado um tempo suficientemente anterior à interrupção da geração do ruído, para que seja garantida a condição de regime permanente; no artigo original, Schroeder recomenda um tempo de -2 segundos, porém este tempo pode ser maior para casos de ambientes com tempos de reverberação extremos, como em uma câmara reverberante.

Calculando-se o quadrado da eq.(A.11), e efetuando-se uma média de um número grande de decaimentos, obtém-se a seguinte equação:

$$\langle s^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^0 d\tau \int_{-\infty}^0 d\theta \cdot n(\tau) \cdot n(\theta) \cdot h(t-\tau) \cdot h(t-\theta) \quad (\text{A.12})$$

Na qual:

$\langle s^2(t) \rangle$ = média do quadrado do sinal recebido.

Utilizando-se da eq.(A.10), chega-se a:

$$\langle s^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^0 d\tau \int_{-\infty}^0 d\theta \cdot N \cdot \delta(\theta - \tau) \cdot h(t-\tau) \cdot h(t-\theta) \quad (\text{A.13})$$

Visto que a equação é nula, exceto para valores de $\tau = \theta$, tem-se:

$$\langle s^2(t) \rangle = N \cdot \int_{-\infty}^0 h^2(t-\tau) d\tau \quad (\text{A.14})$$

Efetuando-se ainda uma simples mudança de variáveis:

$$\langle s^2(t) \rangle = N \cdot \int_t^{\infty} h^2(x) dx \quad (\text{A.15})$$

Assim, Schroeder chegou ao principal resultado do método de medição de tempos de reverberação por resposta impulsiva integrada. A eq.(A.15) demonstra a identidade entre a média de um conjunto de medições de decaimento sonoro, e a resposta impulsiva obtida em um ponto do ambiente medido. Como já discutido no item A.3, o decaimento sonoro é um processo estatístico, portanto sujeito a desvios

consideráveis; assim, a média dos quadrados dos decaimentos necessita de um certo número de medições para ser obtida. Segundo o desenvolvimento teórico de Schroeder, o valor $\langle s^2(t) \rangle$ da eq.(A.15) é equivalente à média de um número infinito de decaimentos. Na prática, este número deve variar de acordo com o ambiente medido. Um estudo anterior (CHU, 1977) efetua a comparação do método de resposta impulsiva integrada com o método de média de decaimentos utilizando 30 médias. A norma ISO 354 exige que, se for utilizado o cálculo de reverberação por interrupção de ruído, devem ser efetuadas pelo menos três médias (para cada configuração de posições de microfone e de fonte sonora), e, para que a precisão da medida seja comparável à do método de resposta impulsiva integrada, devem ser efetuadas dez médias.

A obtenção da resposta impulsiva integrada, contudo, ainda apresentava inconvenientes na época da publicação do artigo de Schroeder. O sinal gerado para ser obtida a resposta impulsiva deveria ser um pulso de duração muito curta, e de espectro equivalente ao do ruído branco. A geração deste pulso, seja por técnicas de disparo de pistola ou por meios eletroacústicos, dificilmente atingia os requisitos exigidos pelo método (relação sinal/ruído e espectro plano), mesmo que as medições fossem feitas em bandas de terço de oitava. O próprio Schroeder encarregou-se de resolver o problema, quatorze anos mais tarde, ao publicar um artigo (SCHROEDER, 1979) que introduz a utilização de sinais pseudo-aleatórios para a obtenção da resposta impulsiva integrada, conforme descrito a seguir.

A.4 Medições utilizando sinais MLS

Em seu artigo, Schroeder demonstra a utilização de Sequências de Comprimento Máximo (MLS, do inglês, Maximum Length Sequence) como sinais de excitação para medições da resposta impulsiva do ambiente, ao invés de se gerar um impulso para tal. Uma MLS é um sinal periódico pseudo-aleatório; no caso de ser uma sequência *binária*, como é utilizada na maioria dos casos (e, principalmente, em acústica), a sequência é formada por pulsos e possui comprimento na forma de $N=2^n-1$, sendo N e n inteiros.

Existem vários algoritmos conhecidos para a construção de uma MLS (SCHROEDER, 1978; BORISH e ANGELL, 1982; SAMPAIO, 1998), e não é objetivo deste trabalho entrar no mérito da geração da seqüência; o assunto já foi tratado em outros estudos brasileiros (SAMPAIO, 1998).

A principal característica de uma seqüência pseudo-aleatória e, conseqüentemente, de uma MLS, é o fato de sua transformada de Fourier (SMITH, 1999) ser semelhante à do ruído branco; em outras palavras, os espectros de ambos os sinais são parecidos, e a equivalência aumenta quanto maior o valor de N (BORISH e ANGELL, 1982). Equivalentemente, a função de auto-correlação da MLS é análoga à do ruído branco, constituindo-se de um impulso de amplitude N.

Para a geração do sinal elétrico que deverá alimentar o amplificador de áudio, a seqüência deverá ser amostrada em uma freqüência de modo a atender ao critério de Nyquist (GERKEN e BURT, 2000) de acordo com a faixa de freqüências a ser medida.

No caso do equipamento utilizado nas medições deste trabalho, o analisador sonoro Norsonic RTA 840, a seqüência utilizada possui comprimento fixo de $2^{17}-1 = 131.071$ elementos. O período de duração da seqüência é automaticamente ajustado de acordo com a faixa de freqüências a ser medida (BJOR, 1995), de modo a respeitar o critério de Nyquist.

Ao contrário da medição de tempo de reverberação por sinal interrompido, a medição com MLS é feita durante a geração do sinal de áudio. O sinal é captado pelo microfone e gravado digitalmente. O próximo passo é efetuar a correlação entre o sinal gravado e a seqüência de entrada, conforme eq.(A.16).

$$\Phi_{yx} = y(t) * x(-t) \quad (\text{A.16})$$

Na qual

$y(t)$ = sinal gravado (saída do sistema).

$x(t)$ = seqüência MLS (entrada do sistema).

Considerando-se a eq.(A.6), a eq.(A.16) pode ser escrita como:

$$\Phi_{yx} = x(t) * h(t) * x(-t) \quad (\text{A.17})$$

Na qual

$h(t)$ = resposta impulsiva do sistema.

Conforme a eq.(A.9), o termo $x(t)*x(-t)$ é a auto-correlação do sinal de entrada, que, por ser um sinal pseudo-aleatório, possui a mesma função de auto-correlação de um ruído branco, ou seja, um impulso de Dirac $\delta(t)$; portanto:

$$\Phi_{yx} = x(t) * h(t) * x(-t) = \Phi_{xx} * h(t) = \delta(t) * h(t) \quad (\text{A.18})$$

Conforme a eq.(A.7), a função de Dirac $\delta(t)$ é a função identidade de qualquer convolução; assim, tem-se que:

$$\Phi_{yx} = \delta(t) * h(t) = h(t) \quad (\text{A.19})$$

Portanto, o resultado da correlação entre o sinal captado pelo microfone e o sinal de excitação do sistema, é a própria resposta impulsiva do sistema. Este processo pode ser feito por vários algoritmos computacionais, dos quais o mais difundido é conhecido como *transformada de Hadamard*. Este algoritmo é empregado pelo analisador sonoro Norsonic RTA 840, utilizado nas medições deste trabalho.

Depois de efetuada a transformada de Hadamard e obtida a resposta impulsiva do sistema, esta é filtrada em faixas de frequência de terços de oitava para que possam ser feitos os cálculos dos tempos de reverberação e de outros parâmetros, como EDT.

Apesar de a resposta impulsiva obtida ser referente a todo um sistema eletroacústico, ou seja, ao sistema descrito no item A.1, pode-se considerar (BJOR, 1995) que esta resposta é dominada pela resposta impulsiva da câmara reverberante, tornando desprezível a resposta dos demais componentes do sistema.

O método de tempo de reverberação por MLS apresenta grandes vantagens em relação ao tradicional método de sinal interrompido, como a velocidade na obtenção dos resultados, a alta repetitividade e confiabilidade, a alta relação sinal/ruído (permitindo fazer medições com altos ruídos de fundo), entre outros. Vários trabalhos (CHU, 1978; VORLÄNDER e KOB, 1997; SAMPAIO, 1998; VANDERKOY, 1994; BRADLEY, 1996) já foram publicados apontando vantagens e desvantagens, assim como comparando este método com outros mais modernos (MULLER e MASSARANI, 2001), e não é escopo deste trabalho reproduzir os

aspectos práticos do método. Apenas como um exemplo ilustrativo, a Tabela A.1 e as Figuras A.5 e A.6 apresentam as médias dos tempos de reverberação (T_{20}) e os respectivos desvios-padrão, tomados em um mesmo ponto da câmara reverberante n°1 do Laboratório de Acústica do IPT, utilizando-se uma mesma posição de câmara reverberante. Foram feitas cinco medições empregando o método de medição por MLS, e cinco medições utilizando o método de sinal interrompido. O gráfico da Figura A.2 compara as médias dos tempos de reverberação T_{20} por ambos os métodos. Observa-se grande correlação entre os valores, exceto para as frequências de 125 Hz e 200 Hz, o que talvez seja causado pela diferença no comportamento dos modos acústicos no interior da câmara nas condições de decaimento (método de sinal interrompido) e de sinal estático (método por MLS). A diferença entre os desvios-padrão das medições de ambos os métodos (Figura A.3) demonstra a vantagem na reprodutibilidade e na confiabilidade do método por MLS.

Tabela A.1: Comparação entre medições por MLS e por sinal interrompido.

Tempos de reverberação (T_{20}) em segundos												
f (Hz)	Método por MLS						Método por sinal interrompido					
	1	2	3	4	5	s	1	2	3	4	5	s
100	6,60	6,59	6,60	6,61	6,60	0,01	6,64	6,68	6,78	6,55	6,67	0,08
125	8,30	8,39	8,39	8,39	8,39	0,04	8,19	8,24	8,26	8,23	8,24	0,03
160	8,26	8,24	8,27	8,26	8,26	0,01	7,57	7,54	7,59	7,54	7,56	0,02
200	9,08	9,09	9,09	9,08	9,10	0,01	7,72	7,74	7,82	7,75	7,71	0,04
250	8,44	8,42	8,40	8,41	8,39	0,02	8,47	8,45	8,18	8,42	8,49	0,13
315	9,06	9,03	9,03	9,04	9,04	0,01	8,95	8,90	8,96	8,89	8,94	0,03
400	9,45	9,45	9,45	9,47	9,46	0,01	9,34	9,20	9,30	9,29	9,32	0,05
500	9,37	9,37	9,39	9,39	9,41	0,02	9,36	9,34	9,33	9,36	9,38	0,02
630	9,40	9,39	9,41	9,40	9,40	0,01	9,29	9,19	9,14	9,10	9,02	0,10
800	8,96	8,95	8,94	8,97	8,97	0,01	9,00	8,99	9,11	9,12	9,03	0,06
1000	7,86	7,86	7,86	7,83	7,85	0,01	7,92	7,93	7,74	7,89	7,98	0,09
1250	7,02	7,06	7,05	7,05	7,04	0,02	7,36	7,39	7,25	7,33	7,43	0,07
1600	6,25	6,23	6,26	6,25	6,22	0,02	6,07	6,07	6,10	6,06	6,17	0,05
2000	5,17	5,17	5,18	5,18	5,18	0,01	4,98	5,00	5,07	4,99	4,98	0,04
2500	4,35	4,35	4,34	4,33	4,35	0,01	4,36	4,31	4,22	4,31	4,35	0,06
3150	3,81	3,80	3,81	3,81	3,80	0,01	3,85	3,77	3,82	3,80	3,74	0,04
4000	3,32	3,33	3,32	3,31	3,31	0,01	3,18	3,19	3,13	3,19	3,18	0,03
5000	2,68	2,68	2,69	2,68	2,68	0,00	2,53	2,51	2,52	2,52	2,54	0,01

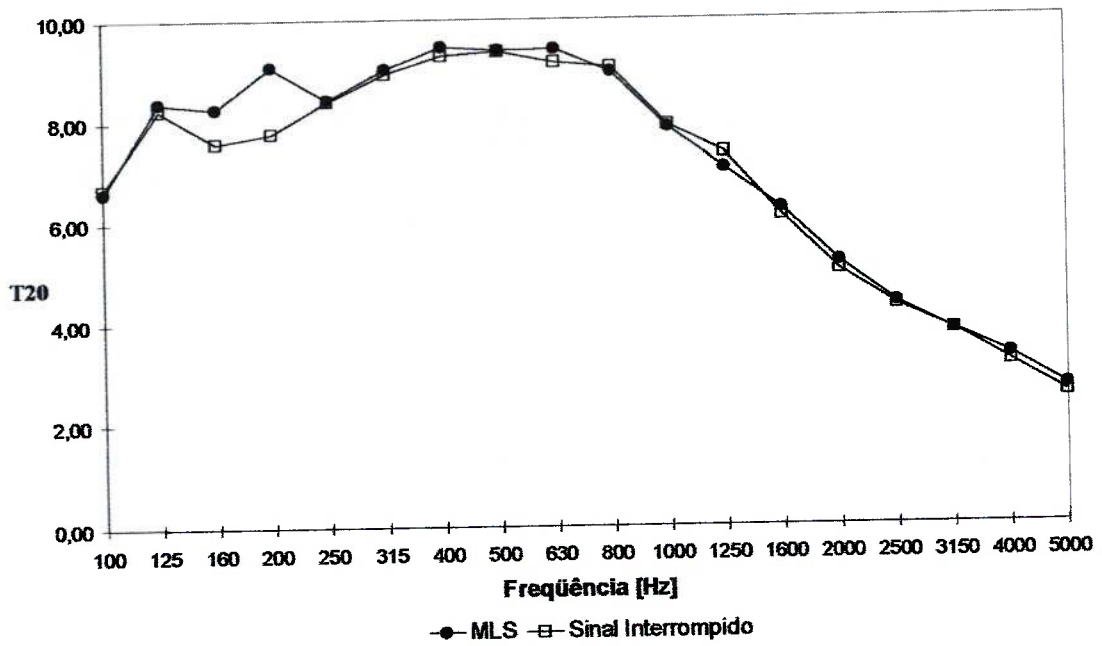


Fig. A.2: Comparação entre as médias dos tempos de reverberação por ambos os métodos de medição.

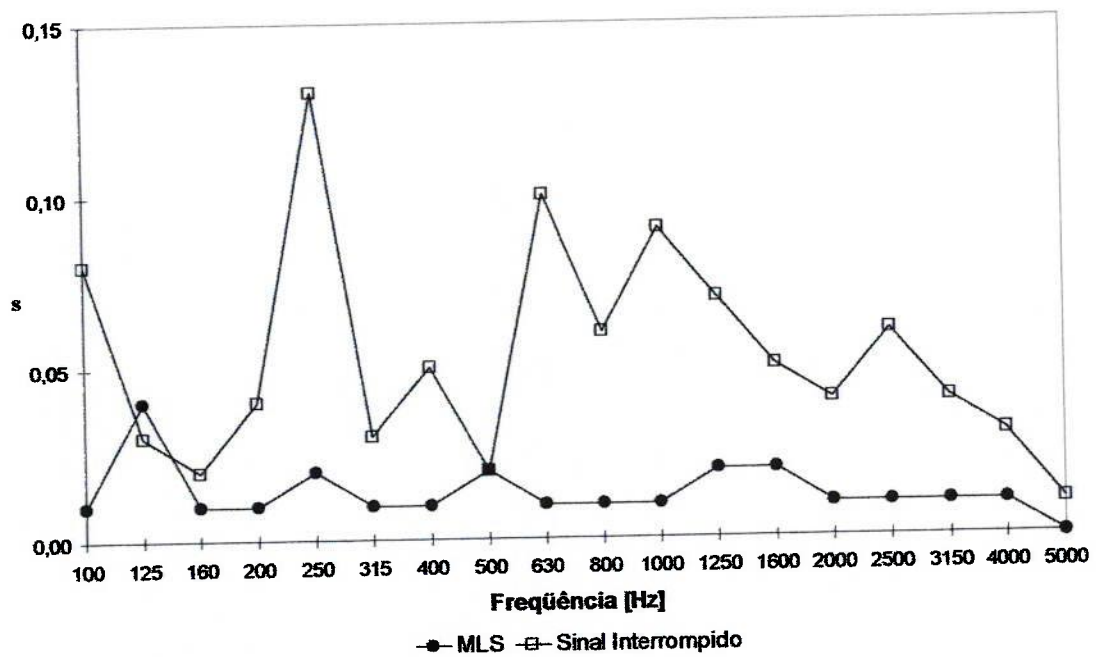


Fig. A.3: Comparação entre os desvios-padrão de ambos os métodos.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- ASID. Increasing office productivity through integrated acoustic planning and noise reduction strategies.** AMERICAN SOCIETY OF INTERIOR DESIGNERS. Washington, 1996.
- ÁSSY, T.M. **Mecânica dos Fluidos.** São Paulo: Plêiade, 1996. 794 p.
- ASTM C423. Standard Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method.** American Society for Testing and Materials, EUA, 1977.
- ASTM C423. Standard Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Method.** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. EUA, 1999.
- ASTM C795. Standard Practices for Mounting Test Specimens During Sound Absorption Tests.** AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. EUA.
- BARTEL, T.W. Effect of absorber geometry on apparent absorption coefficients as measured in a reverberation chamber. *Journal of Acoustical Society of America*, v.69, n.4, pp. 1065-1074. 1981.
- BJOR, O.H. Maximum Length Sequence. Norsonic AS, Noruega, 1995.
- BORISH, J; ANGELL, J. B. An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise. *Journal of Audio Engineering Society*, v.31, n.7, p.478-488, 1982
- BRADLEY, J. Optimizing the Decay Range in Room Acoustics Measurements using Maximum Length Sequence Techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*, v.44, n.4, p.266-273, 1996.
- BS 3638. Measurement of Sound Absorption Coefficients (ISO) in a Reverberation Room.** BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Inglaterra, 1963.

- CHRISLER, V. L., Dependence of Sound Absorption Upon the Area and Distribution of the Absorbent Material. Washington: National Bureau of Standards, 1934. (Research Paper RP 700, p.169-187).
- CHU, W. T. Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.36, n.5, p.1444-1450, 1978.
- COPS, A., VANHAECHT, J., LEPPENS, K. Sound absorption in a reverberation room: causes of discrepancies on measurement results. *Applied Acoustics*, v.46, p.215-232, 1995.
- DANCE, S.M.; SHIELD, B.M. Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces. *Applied Acoustics*, v.58, p.1-18, 1999.
- EMBLETON, T.F.W. Absorption Coefficients of surfaces calculated from decaying sound fields. *Journal of Acoustical Society of America*, v.50, n.3, p.801-811, 1971.
- EYRING, C.F. Reverberation Time in "Dead" Rooms. *Journal of Acoustical Society of America*, v.1, p. 217-241. maio 1930
- EYRING, C.F. Methods of Calculating the Average Coefficient of Sound Absorption. *Journal of Acoustical Society of America*, p. 178-192, jan. 1933.
- FITZROY, D., Reverberation Formula Which Seems to Be More Accurate with Nonuniform Distribution of Absorption, *Journal of Acoustical Society of America*, v.31, n.7, pp. 893-897, jul. 1959.
- GERKEN, MAX; BURT, PHILLIP M. S. Processamento Digital de Sinais. Apostila do Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- GOMPERTS, M.C. Do the classical reverberation formulae still have a right for existence? *Acustica*, v.16, n.5, p.255-268, 1966.

- HALLIWELL, R. E. Sound absorption variation caused by modifications to a standard mounting. *Journal of Acoustical Society of America*, v.72, n.5, p.1634-1636, nov. 1982.
- HALLIWELL, R.E. Inter-laboratory variability of sound absorption measurement. *Journal of Acoustical Society of America*, v.73, n.3, p. 880-886. 1983.
- HENRY, Joseph. **The Papers of Joseph Henry**. Smithsonian Institution Press, 1981.
- HODGSON, M.R. Experimental evaluation of the accuracy of the Sabine and Eyring theories in the case of non-low surface absorption. *Journal of Acoustical Society of America*, v.94, n.2, p.835-840, 1993.
- HODGSON, M.R. When is diffuse-field theory applicable? *Applied Acoustics*, v.49, n.3, p.197-207, 1996.
- ISO 354. Acoustics-Measurement of Sound Absorption Coefficient in Reverberation Rooms.** INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. Suíça, 1985.
- ISO 354. Amd. 1:1997, Acoustics-Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room - Amendment 1: Test specimen mounting for sound absorption tests.** INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION, Suíça, 1997.
- ISO 354. Acoustics- Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room.** INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. Suíça, 2003.
- ISO 9613-1. Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors, part 1 - Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.** INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. Suíça, 1993.

ISO R 354. **Measurement of the Sound Absorption Coefficient in a Reverberation Rooms.** INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. Suíça, 1963.

JACOBSEN, F. **The diffuse sound field.** Dinamarca: The Acoustic Laboratory, Technical University of Denmark, 1979. (Report No.27).

JACOBSEN, F; ROISIN, T. The coherence of reverberant sound fields. *Journal of Acoustical Society of America*, v. 108, n.1, p. 204-210, jul. 2000.

KOSTEN, C.W., International Comparison Measurements in the Reverberation Room. *Acustica*, v. 10, p. 400-411, 1960.

KUTTRUFF, H. **Room Acoustics.** 3.ed., Barking: Elsevier Science Publishers, 1991. 329p.

MILLINGTON, G, A Modified Formula for Reverberation, *Journal of Acoustical Society of America*, v.4, pp. 69-82., jul. 1932.

MULLER, S., MASSARANI, P. Transfer Function Measurement with Sweeps. *Journal of Audio Engineering Society of America*, p. 361-370, 2001.

NABUCO, M. **Investigações sobre os parâmetros envolvidos na medição de absorção sonora em câmaras reverberantes.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

NÉLISSE, H.; NICOLAS, J. Characterization of a diffuse field in a reverberant room. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.101, n.6, p.3517-3524, 1997.

RAYLEIGH, J. W. S. **The Theory of Sound.** , New York: Dover, 1945. v.2.

SABINE, W. C. Reverberation. *American Architect and Engineering Record*. 1900.

SAMPAIO, R. G. **Aplicações da Teoria dos Números em Acústica: Técnica de MLS e Difusores.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998.

SCHROEDER, M. R. Die statischen parameter der frequenzkurve von großen räumen. *Acustica*, v.4, p.594-600, 1954.

SCHROEDER, M.R. Frequency-correlation functions of frequency response in rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.34, n.2, p.1819-1823, 1962.

SCHROEDER, M.R. New method of measuring reverberation time. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.38, n.1, p.409-412, 1965.

SCHROEDER, M. R. Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.66, n.2, p.497-500, 1978.

SCHROEDER, M.R. The "Schroeder frequency" revisited. *Journal of Acoustical Society of America*, v.99, n.5, p. 3240-3241. 1996.

SCHULTZ, T. J., Diffusion in Reverberation Rooms, *Journal of Sound and Vibration*, v.16, n.1, p. 17-28, dez. 1971.

SETTE, W.J., 1933, "A New Reverberation Time Formula", *Journal of Acoustical Society of America*, v.4 , pp. 193-210 , jan. 1933.

SILVA, H.S. Variação da resistência da bobina móvel em função da temperatura. In: 4º CONGRESSO DA AUDIO ENGINEERING SOCIETY BRASIL. *Anais*. São Paulo, 2000.

SILVA, H.S. O alto falante em regime de grandes sinais. In: 1º CONGRESSO DA AUDIO ENGINEERING SOCIETY BRASIL. *Anais*. São Paulo, 1996.

SMITH, STEVEN W. **The scientist and engineer's guide to digital signal processing**. San Diego: California Technical Publishing, 2 ed., 1999.

VANDERKOY, J. Aspects of MLS Measuring Systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, v.42, n.4, p.219-231, 1994.

VORLÄNDER, M.; KOB, M. Practical Aspects of MLS Measurements in Building Acoustics. *Applied Acoustics*, v.52, n.3/4, p. 239-258, Inglaterra, 1997.

WARNOCK, A.C.C. Some practical aspects of absorption measurements in reverberation rooms. *Journal of Acoustical Society of America* v.74, n.5, p.1422-1432. 1983.

WARNOCK, A.C.C. Studies of acoustical parameters in open-plan offices. *Journal of Acoustical Society of America* v.63, n.3, p.832-840. 1978.

WYERMAN, B.R. A study of speech privacy in closed offices. *Journal of Acoustical Society of America* v.72, n.2, p.436-442. 1982.

APÊNDICE - QUALIFICAÇÃO DA CÂMARA REVERBERANTE DO LAC

O objetivo deste capítulo é caracterizar a câmara reverberante nº1 do Laboratório de Acústica do IPT, assim como descrever o processo de qualificação da mesma, conforme a norma ISO 354 (ISO, 2003). Como já foi mencionado no Capítulo 1, não é objetivo deste capítulo a discussão aprofundada do tema da difusão sonora na câmara, ou da validação do procedimento de qualificação apresentado na norma citada. São temas complexos, que demandam uma análise detalhada que foge do escopo desta pesquisa. Além disso, o estudo da difusão sonora foi tema de um trabalho recentemente publicado (NABUCO, 2002).

A câmara reverberante em questão já havia sido qualificada duas vezes, nos anos de 1979 e de 1982. Na época, ainda não havia sido publicado em norma internacional qualquer procedimento de qualificação de câmara reverberante, o que veio ocorrer somente em 1985, com a norma ISO 354 (ISO, 1985). O rascunho da norma ISO 354 de 1963 (ISO, 1963) ainda não havia chegado ao Brasil em 1979. A norma ASTM C423 (ASTM, 1977), que já havia sido publicada, porém não apresentava nenhuma metodologia para a qualificação, limitando-se somente a propor medições para se avaliar o campo difuso.

Assim, a primeira qualificação foi feita segundo a metodologia apresentada verbalmente aos membros do laboratório, durante um congresso, por H. Mincke, então pesquisador do *Laboratorium voor Akoestiek en Warmtegeleiding*, na Bélgica. Para a segunda qualificação, o próprio Mincke já havia fornecido uma cópia do rascunho de 1963 da ISO 354. Como Mincke era um dos membros da comissão da norma na época, as duas qualificações foram feitas com praticamente a mesma metodologia, que essencialmente é mantida até hoje (ISO, 2003).

AP.1 Características da câmara reverberante

A construção da câmara reverberante nº1 do LAC foi concluída em 1977. As paredes foram construídas em blocos cerâmicos preenchidos com argamassa, e espessas lajes de concreto foram utilizadas no piso e no teto da câmara. Seu formato é essencialmente retangular, com volume de 225 m³ e área de 252 m². Porém, o paralelismo entre as superfícies internas foi evitado com inclinações de até 3°.

Grandes portas duplas metálicas foram instaladas, visando o acesso de amostras de grande porte para ensaios de absorção sonora e de potência sonora.

Posteriormente, em 1980, foi iniciada a construção de uma outra câmara reverberante, contígua à primeira, e com dimensões semelhantes (volume de 217 m³, área de 229 m²). Visto que a construção da segunda câmara do laboratório foi feita visando a opção de realizar-se também ensaios de isolamento sonora, há um vão retangular de 4 m de comprimento por 3 m de altura, ligando as câmaras reverberantes nos 1 e 2. Entre as câmaras há um espaçamento de aproximadamente 35 cm, que permite a inserção de um dos pórticos de concreto para montagem de amostras para ensaios de isolamento sonora. Os pórticos são movimentados sobre trilhos, por meio de um sistema externo com um motor elétrico e cabos de aço.

No caso da realização de ensaios de absorção sonora, somente a câmara n°1 é utilizada, e o vão entre as câmaras é fechado com um pórtico no qual foi construída uma parede de concreto armado de 100 mm de espessura. A fresta entre o pórtico e a parede da câmara é vedada com perfis metálicos e fita adesiva (ver item AP.4).

Antes do processo de qualificação descrito neste capítulo, os difusores, as paredes e o teto da câmara foram pintados com tinta acrílica.

AP.2 Exigências da norma e o processo de qualificação

O item 6.1 da norma ISO 354 apresenta algumas exigências em relação à forma e ao comportamento do campo sonoro dentro da câmara reverberante. São relacionados os seguintes itens:

- **Volume da câmara:** o volume interno da câmara reverberante deve estar entre 150 m³ e 500 m³. Para câmaras novas, a norma recomenda o volume mínimo de 200 m³.

O limite inferior do volume da câmara visa garantir que a difusão seja atingida nas frequências baixas, por meio de uma alta densidade modal. Schroeder desenvolveu uma série de estudos (SCHROEDER, 1954, 1962, 1996) visando determinar a frequência mínima a partir da qual se pode obter o campo difuso em uma câmara de volume V (em m³), chegando à expressão dada por

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{AP.1})$$

na qual T é o tempo de reverberação da sala, em segundos, na frequência desejada.

Outro estudo, desenvolvido pelos pesquisadores Nélisse e Nicolas (NÉLISSE e NICOLAS, 1997), estabeleceu uma equação para a determinação da frequência inferior para a qual há campo difuso em uma câmara reverberante, baseada em métodos diversos ao de Schroeder. A relação final do estudo leva a

$$f_c \approx \frac{1190}{V^{1/3}} \quad (\text{AP.2})$$

na qual f_c é a frequência crítica, em hertz, e V é o volume da câmara em m^3 .

A condição do volume máximo da câmara reverberante, especificada na norma, visa limitar o efeito da absorção sonora pelo volume de ar contido na câmara, o que pode prejudicar a difusão sonora nas frequências mais altas. Este item é de especial relevância em cidades como São Paulo, onde a umidade relativa do ar pode chegar a valores de 80%, evidenciando a absorção sonora pelo ar (KUTTRUFF, 1991).

- **Forma da câmara:** a condição para a forma da câmara é de que a medida (em metros) da maior linha reta que possa estar contida no interior da câmara, l_{\max} , atenda à relação

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

Na qual V é o volume da câmara, em metros cúbicos. Além disso, a razão entre duas medidas da câmara não pode ser um “número inteiro pequeno” (o limite não é definido no texto).

A condição que especifica a maior linha reta possível contida dentro da câmara visa evitar formatos que dificultem a criação de um campo sonoro difuso, como por exemplo, formas muito alongadas ou achatadas (KUTTRUFF, 1991).

A relação de números inteiros pequenos entre medidas da câmara, especialmente no caso de câmaras retangulares, pode culminar na excitação excessiva de alguns modos normais da sala, devido ao paralelismo das paredes (mesmo em um caso como o da

câmara reverberante do LAC, no qual as paredes têm uma pequena inclinação, os modos normais não são completamente evitados).

- **Curva de absorção sonora:** a norma estabelece que a curva de absorção sonora (ou *área equivalente de absorção sonora*) da câmara vazia, A_1 , versus a frequência deve ser suave, não apresentando picos ou vales que difiram mais de 15% da média dos valores de faixas de frequências adjacentes.

A condição busca evitar que sejam utilizadas câmaras com absorções sonoras localizadas em certas faixas de frequências, ou que haja certos modos normais que elevem o tempo de reverberação em certas faixas. Além disso, a norma apresenta uma tabela com valores máximos de absorção sonora, A_1 , para a câmara vazia. A Tabela AP.1 a seguir apresenta estes valores, já corrigidos pelo fator $(V/200)^{2/3}$ apresentado na norma, no qual V é o volume da câmara, em m^3 .

Tabela AP.1: Valores máximos corrigidos de absorção sonora da câmara vazia.

Frequência (Hz)	A_1 (m^2)
100	7,0
125	7,0
160	7,0
200	7,0
250	7,0
315	7,0
400	7,0
500	7,0
630	7,0
800	7,0
1000	7,6
1250	8,1
1600	8,7
2000	10,3
2500	11,4
3150	13,0
4000	14,0
5000	15,1

Conforme será visto no item AP.4 a seguir, todos os critérios quanto à absorção sonora da câmara vazia são atendidos.

AP.3 Processo de qualificação

O processo de qualificação apresentado na norma ISO 354 é relativamente simples, considerando-se a complexidade do assunto, o que na verdade reflete a falta de conclusões técnicas em relação ao comportamento do campo difuso, conforme já discutido no Capítulo 2. O item 6.1.3 da norma cita apenas que o campo sonoro no interior da câmara reverberante deve ser *suficientemente difuso*, sugerindo a utilização de difusores estáticos ou rotativos para tal. A norma não cita a utilização de absorvedores de baixa frequência para o tratamento da câmara, apesar de ser uma técnica comum (COPS ET AL., 1995).

Segundo a norma, os difusores estáticos devem ser, *idealmente*, painéis com baixa absorção sonora e densidade superficial de aproximadamente 5 kg/m^2 . A norma *recomenda* também que os difusores tenham áreas diferentes, entre $0,8 \text{ m}^2$ e 3 m^2 (em cada lado do painel), e que os painéis sejam ligeiramente curvos.

O procedimento para a qualificação da câmara é descrito no Anexo A da norma, baseado na comparação entre os resultados de ensaios de absorção sonora de uma mesma amostra, executado conforme todos os requisitos da norma, e com diferentes configurações de difusores na câmara reverberante. A amostra de material absorvente a ser utilizada deve apresentar coeficientes de absorção sonora maiores do que 0,9 nas faixas de frequência de 500 Hz a 4000 Hz. Na norma, são exemplificados materiais que atendem estes critérios: lã de rocha, lã de vidro e espuma de poliuretano, com espessuras entre 5 cm e 10 cm.

Inicialmente, um ensaio deve ser executado na câmara sem difusores. Em seguida, grupos de difusores, totalizando aproximadamente 5 m^2 de área (para as duas faces dos difusores), devem ser posicionados aleatoriamente na câmara; a cada grupo de difusores instalado, um novo ensaio deve ser feito.

Com o aumento do número de difusores, o campo sonoro no interior da câmara torna-se mais difuso; visto que a norma ISO 354 utiliza a fórmula de Sabine (ver Capítulo 3) para o cálculo dos coeficientes de absorção sonora, e que a fórmula foi idealizada considerando-se um campo perfeitamente difuso, observa-se que os coeficientes de absorção sonora medidos tendem a aumentar de acordo com o acréscimo de difusores na câmara, até se estabilizarem.

Seguindo o procedimento de qualificação, para cada ensaio, efetuado com um novo grupo de difusores instalado, deve ser calculada a média dos coeficientes de absorção sonora entre as faixas de frequência de 500 Hz a 5000 Hz. Um gráfico com as médias dos coeficientes *versus* o número (ou área) de difusores instalados indicará o aumento e a estabilização dos coeficientes de absorção sonora. O número adequado de difusores corresponde ao primeiro em que seja atingida esta estabilidade.

Como referência para uma quantidade usual de painéis, a norma aponta a área total de difusores (ambos os lados) como sendo de 15 % a 25 % da área total da superfície interna da câmara.

AP.4 Resultados

O primeiro passo, antes da pintura da câmara, foi o de medir seu volume novamente. Seu formato irregular faz com que esta tarefa não seja trivial. Na época da primeira qualificação, a medida foi feita dividindo-se o volume da câmara em volumes geométricos regulares, como prismas e paralelepípedos, resultando no volume de 225 m³. Desta vez, foram tiradas as medidas lineares representativas de toda a câmara, e um desenho do volume interno da câmara foi feito no programa Autocad. O cálculo automático resultou no volume de 225,15 m³, sendo adotado para os ensaios o valor arredondado de 225 m³. A área interna da câmara é de 237 m².

O volume da câmara atende às especificações da norma ISO 354. A frequência crítica, calculada conforme a eq.(AP.2), é de 196 Hz. A condição de formato da câmara, dada pela eq.(AP.1), limita o comprimento da maior reta possível no interior da câmara como sendo $l_{\max} = 11,56$ m, enquanto a maior diagonal, calculada no Autocad, é de $l = 11,68$ m. A pequena diferença, de 0,12 m (1,04%), pode ser considerada desprezível.

O requisito apresentado no item AP.2, referente às relações entre as dimensões da câmara, é difícil de ser aplicado no caso de uma câmara irregular, como são as do LAC. As principais medidas ortogonais da câmara (comprimento, largura e altura) são variáveis. A Tabela AP.2 apresenta os valores extremos de razões entre elas.

Tabela AP.2: Relações entre as principais medidas da câmara.

Relação de dimensões (m)	Razão	Valor
Comprimento máximo / largura mínima	9,60 / 5,71	1,68
Comprimento mínimo / largura máxima	8,89 / 5,97	1,49
Comprimento máximo / altura mínima	9,60 / 4,07	2,36
Comprimento mínimo / altura máxima	8,89 / 4,24	2,10
Largura máxima / altura mínima	5,97 / 4,07	1,47
Largura mínima / altura máxima	5,71 / 4,24	1,35

Os extremos da relação entre as dimensões de comprimento e largura indicam que, para uma determinada configuração destas dimensões, há uma relação de 1,5, ou 3/2, que pode ser considerada uma “relação de números inteiros pequenos”. Acredita-se, porém, que o fato de as dimensões serem variáveis tenda a minimizar o problema proveniente desta relação.

A Figura AP.1 a seguir apresenta a planta da câmara reverberante nº1 do LAC, com a marcação de referência de posicionamento de amostra (linha azul), as posições dos pontos de microfone, M1 a M12, e as posições de fonte sonora, F1 e F2. Embora nos ensaios de absorção sonora de rotina utilizem-se apenas seis pontos de microfone, para a qualificação foram utilizados doze pontos, para melhor caracterizar o campo sonoro no interior da câmara.

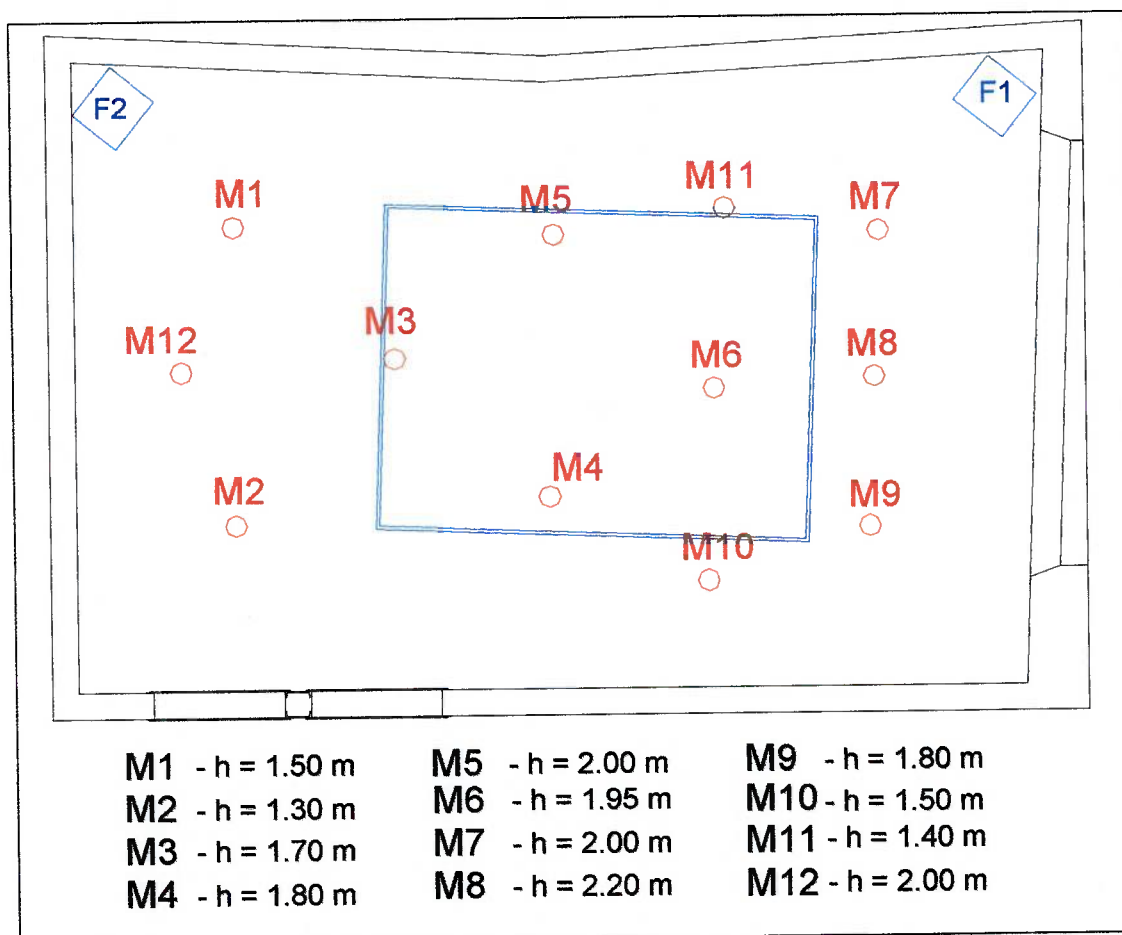


Fig.AP.1: Planta da câmara reverberante com indicações da posição da amostra e dos pontos de microfones.

Os ensaios para a qualificação foram realizados entre os dias 9 e 24 de outubro de 2003, logo após a secagem da pintura da câmara. O material adotado para servir de amostra nos testes, o mesmo utilizado na primeira qualificação, é formado por painéis de espuma de poliuretano de dimensões 1000 mm x 1000 mm x 65 mm, com uma face texturizada, em formato de “caixa de ovo”. Duas camadas foram utilizadas, justamente encaixadas entre si, de modo a completar uma espessura total de 100 mm, como ilustram as fotografias da Figura AP.2.

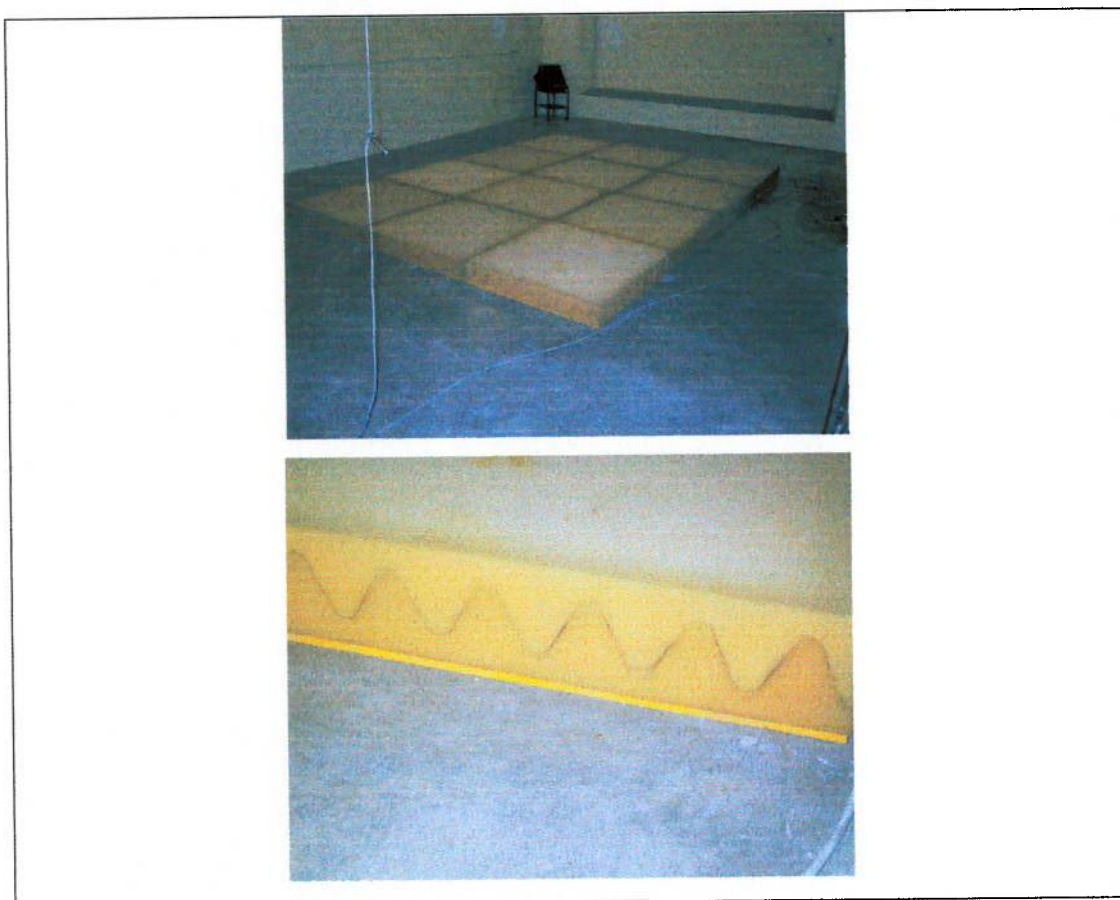


Fig. AP.2: Amostra utilizada nos testes, composta de painéis de espuma de poliuretano.

Apesar das exigências de montagem de amostra da norma, os painéis foram montados na câmara reverberante sem o recobrimento de suas bordas laterais. Este fato, apesar de resultar em valores de coeficientes de absorção sonora maiores do que os reais (NABUCO, 2002), não afeta os cálculos finais, devido ao caráter comparativo dos ensaios para a qualificação. Além disso, gera uma considerável economia de tempo, fazendo com que um ensaio completo com MLS (com 12 pontos de medição e 2 posições de fonte sonora), incluindo os cálculos, fosse realizado em torno de duas horas (durante a primeira qualificação, um ensaio completo, utilizando o método de sinal interrompido com seis pontos de medição, durava cerca de um dia e meio).

As medições foram feitas utilizando-se um único microfone, marca Brüel & Kjaer, modelo 4166, que é deslocado entre os pontos de medição apresentados na Figura AP.1. O sinal é recebido por um analisador sonoro marca Norsonic, modelo

RTA 840, que faz as medições dos tempos de reverberação pelo método de resposta impulsiva integrada utilizando sinal MLS utilizando-se duas médias (ver Anexo). As fontes sonoras utilizadas são duas caixas de retorno de palco, com alto-falantes de 8 polegadas de 100 W de potência.

Os difusores estáticos utilizados na câmara constituem-se de placas planas de madeira compensada, cortadas em formato irregular, pintadas com tinta acrílica. A área total média de ambas as faces de um difusor é de $3,5 \text{ m}^2$. Após a realização do primeiro ensaio, com a câmara sem nenhum difusor, foram executados ensaios a cada dois difusores instalados, gerando um acréscimo de área de aproximadamente 7 m^2 (para as duas faces dos difusores) em cada ensaio. Diferentemente do processo de qualificação anterior, no qual todos os painéis difusores foram pendurados no teto da câmara, desta vez os painéis também foram posicionados no piso e junto às paredes da câmara, como ilustra a Figura AP.3.

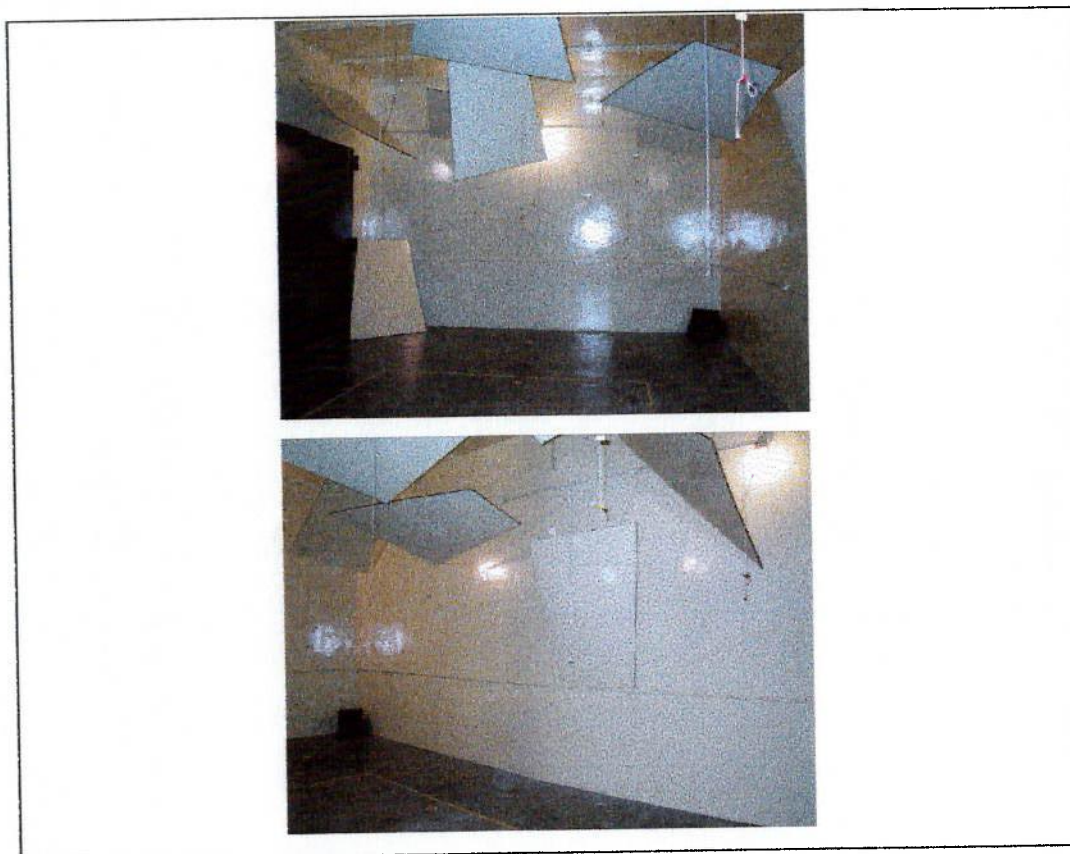


Fig. AP.3: Posicionamento dos difusores.

A Tabela AP.3 e a Figura AP.4 apresentam os dados dos coeficientes de absorção sonora da amostra de teste, medidos por faixas de frequência de terço de oitava, conforme a área instalada de difusores na câmara, até que a média dos coeficientes de 500 Hz a 4000 Hz se estabilizasse (ver item AP.3). A Tabela AP.4 e a Figura AP.5 apresentam a evolução desta média.

Tabela AP.3: Coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.

Frequência (Hz)	α							
	0 m ²	7 m ²	14 m ²	21 m ²	28 m ²	35 m ²	42 m ²	49 m ²
100	0,31	0,29	0,30	0,30	0,29	0,33	0,43	0,42
125	0,54	0,50	0,44	0,46	0,52	0,52	0,71	0,59
160	0,64	0,80	0,78	0,77	0,72	0,81	0,77	0,82
200	0,56	0,69	0,82	0,75	0,86	0,91	0,95	0,87
250	0,57	0,57	0,75	0,75	0,92	1,06	1,07	1,07
315	0,51	0,55	0,68	0,64	0,83	1,02	1,15	1,19
400	0,56	0,59	0,74	0,73	0,94	1,07	1,18	1,16
500	0,72	0,78	0,89	0,94	1,11	1,11	1,16	1,19
630	0,65	0,74	0,90	0,92	1,09	1,11	1,17	1,20
800	0,69	0,77	0,93	0,99	1,10	1,14	1,16	1,17
1000	0,75	0,85	0,93	1,00	1,09	1,13	1,16	1,20
1250	0,79	0,90	0,95	1,01	1,08	1,11	1,17	1,16
1600	0,81	0,92	0,92	1,03	1,08	1,10	1,13	1,15
2000	0,86	0,95	0,96	1,03	1,07	1,10	1,16	1,18
2500	0,87	0,93	0,94	0,99	1,05	1,08	1,15	1,17
3150	0,89	0,91	0,95	0,95	1,04	1,08	1,15	1,17
4000	0,96	0,90	1,04	0,89	1,06	1,04	1,11	1,17
5000	0,83	0,72	0,99	0,69	0,94	0,95	0,99	1,01

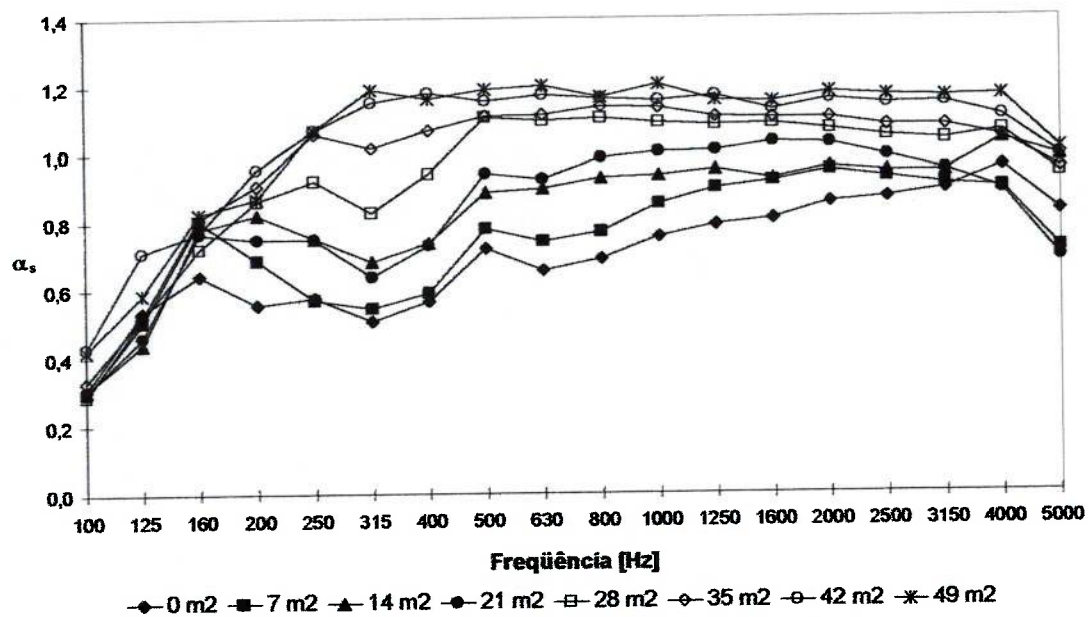


Fig. AP.4: Coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.

Tabela AP.4: Média dos coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.

Área instalada de difusores (m ²)	Média de α
0	0,80
7	0,86
14	0,94
21	0,97
28	1,08
35	1,10
42	1,15
49	1,15

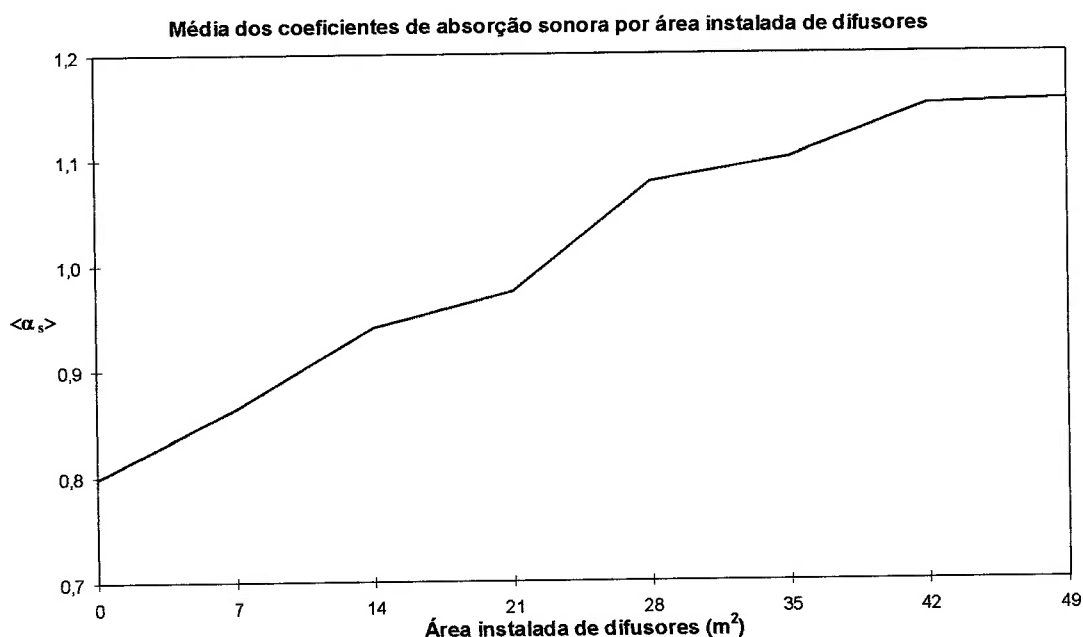


Fig. AP.5: Média dos coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.

Como demonstram a Tabela AP.4 e a Figura AP.5, a estabilidade da média dos coeficientes de absorção sonora foi atingida com aproximadamente 42 m^2 de área de difusores, equivalente a 12 difusores. Por uma questão de segurança, decidiu-se pela permanência do décimo terceiro difusor, somando 49 m^2 de área total.

O anexo A da norma ISO 354 apresenta um dado de que, conforme resultados empíricos, a área instalada de difusores para a qualificação da câmara costuma ser de 15% a 25% da área total desta (paredes, piso e teto). No caso da câmara reverberante nº1 do LAC, a estabilização dos coeficientes foi atingida com aproximadamente 49 m^2 de área instalada de difusores, o que corresponde a aproximadamente 20,7% da área total da câmara (237 m^2), um valor intermediário em relação aos recomendados pela norma.

Apesar de atingido o número ideal de difusores, outro problema havia de ser resolvido: o formato da curva de absorção sonora da câmara vazia (ver item AP.2). Historicamente, a curva dos tempos de reverberação da sala vazia (inversamente proporcional à curva de absorção sonora) sempre apresentou um formato irregular, com um vale acentuado em 315 Hz, mesmo sem difusores instalados. A Figura AP.6, com as curvas dos tempos de reverberação da câmara vazia para cada área instalada de difusores, demonstra este fato.

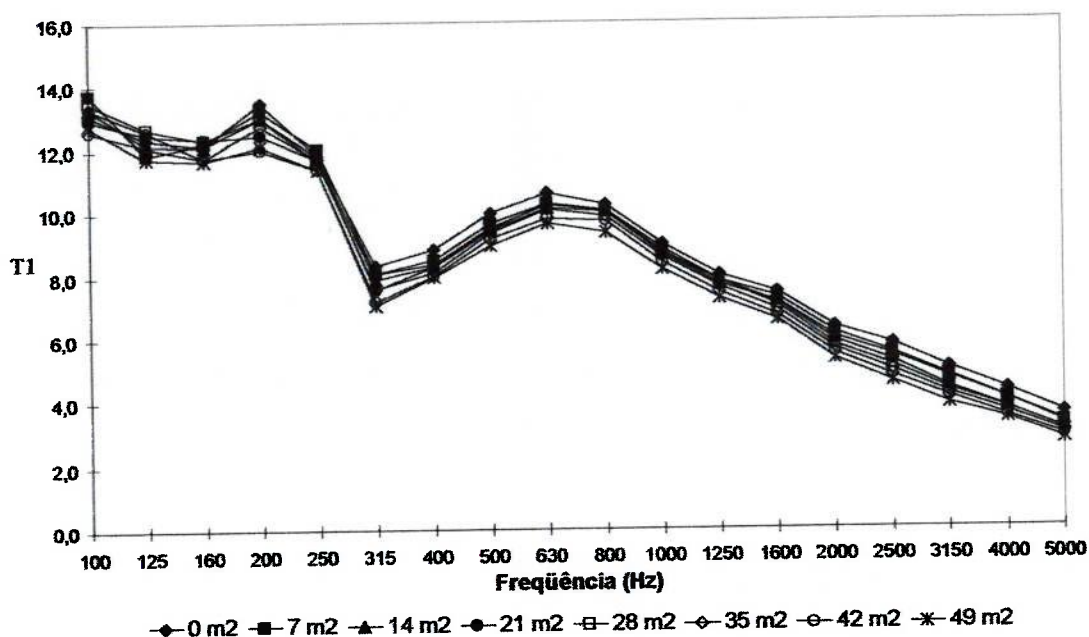


Fig. AP.6: Curvas dos tempos de reverberação da câmara vazia para cada área instalada de difusores.

Inicialmente, buscou-se a correção da curva instalando-se absorvedores de baixa frequência tipo membrana, dispostos dois a dois, junto às paredes da câmara. A Figura AP.7 apresenta a evolução das curvas de absorção sonora da câmara vazia de acordo com a área instalada de difusores e com a instalação dos absorvedores de baixa frequência, demonstrando que, apesar de a curva ter-se tornado mais equilibrada, ainda havia uma irregularidade em seu formato, agravada pela absorção em 315 Hz.

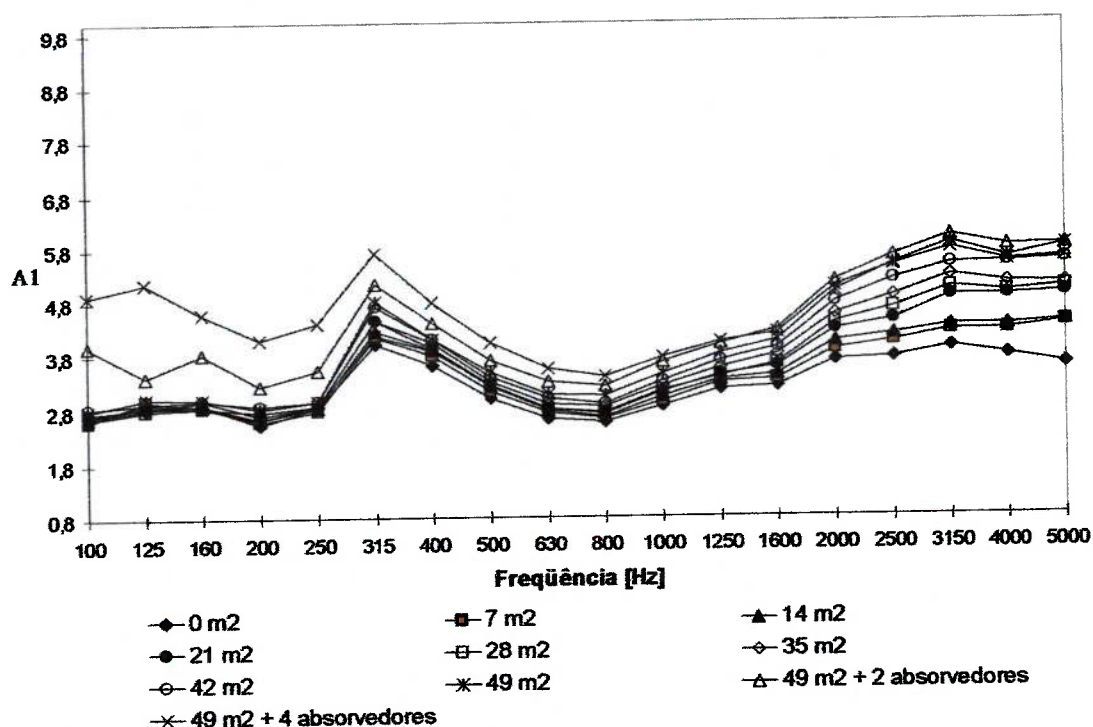


Fig. AP.7: Curvas da absorção sonora da câmara vazia para cada área instalada de difusores.

Em seguida buscou-se a causa da absorção excessiva em 315 Hz. Primeiramente cogitou-se a absorção sonora pelas caixas acústicas utilizadas nas medições. Por tratarem-se de duas caixas tipo refletor de graves, e tendo em vista que, durante a medição dos tempos de reverberação, apenas uma caixa é utilizada de cada vez (ver Anexo), foi considerada a possibilidade de que a caixa acústica não utilizada durante a medição pudesse absorver o som de forma sintonizada, por um efeito de ressonador de Helmholtz (KUTTRUFF, 1991). A medição dos tempos de reverberação feita com apenas uma das caixas acústicas, porém, não indicou mudanças no comportamento do campo sonoro da câmara.

A segunda tentativa considerou a hipótese de que havia uma influência da cavidade onde é inserido o pórtico entre as câmaras reverberantes. Conforme descrito no item AP.1, o pórtico de concreto é movimentado sobre um trilho metálico para ser posicionado entre as câmaras reverberantes. Uma vez posicionado o pórtico, restam cavidades acima, abaixo e em um dos lados deste. Estas cavidades são ligadas às câmaras pelas duas frestas entre o pórtico e cada uma das câmaras, de

aproximadamente 2 cm de largura média, que são vedadas com três câmaras pneumáticas de borracha de cada lado do pórtico.

Para avaliar a influência destas cavidades, a fresta entre o pórtico e a câmara reverberante nº1 foi vedada com perfis metálicos e fitas adesivas, além da vedação original com câmaras pneumáticas. O esquema é ilustrado na Figura AP.8 a seguir.

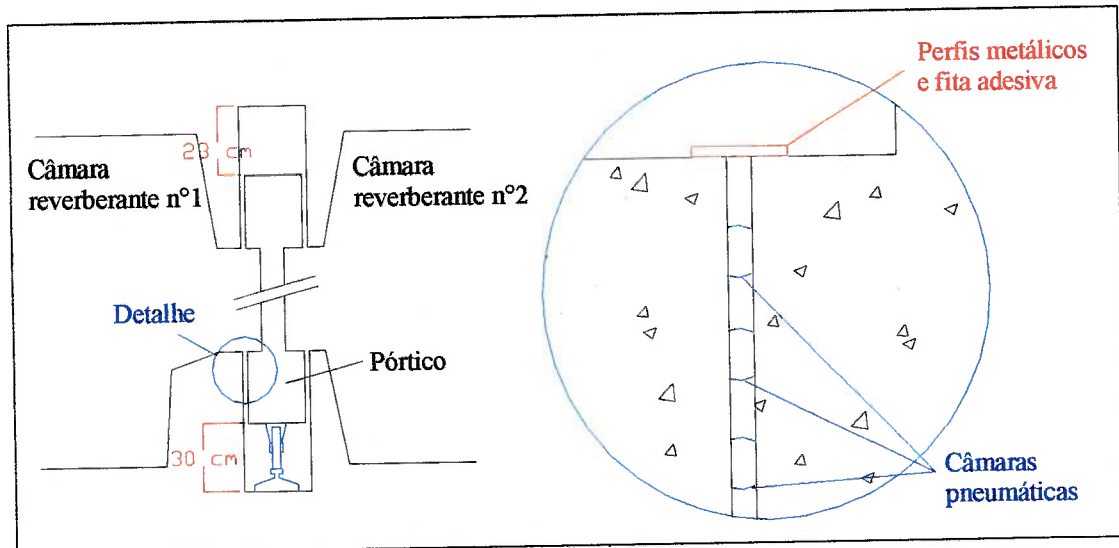


Fig. AP.8: Cavidades e vedação entre o pórtico e as câmaras.

A medição dos tempos de reverberação feita com esta vedação demonstrou que as cavidades ao redor do pórtico exerciam grande influência sobre o campo sonoro da câmara, mesmo com a vedação pelas câmaras pneumáticas. A Figura AP.9 a seguir apresenta a curva da absorção sonora da sala vazia com 49 m^2 de difusores instalados, com e sem a vedação com os perfis metálicos.

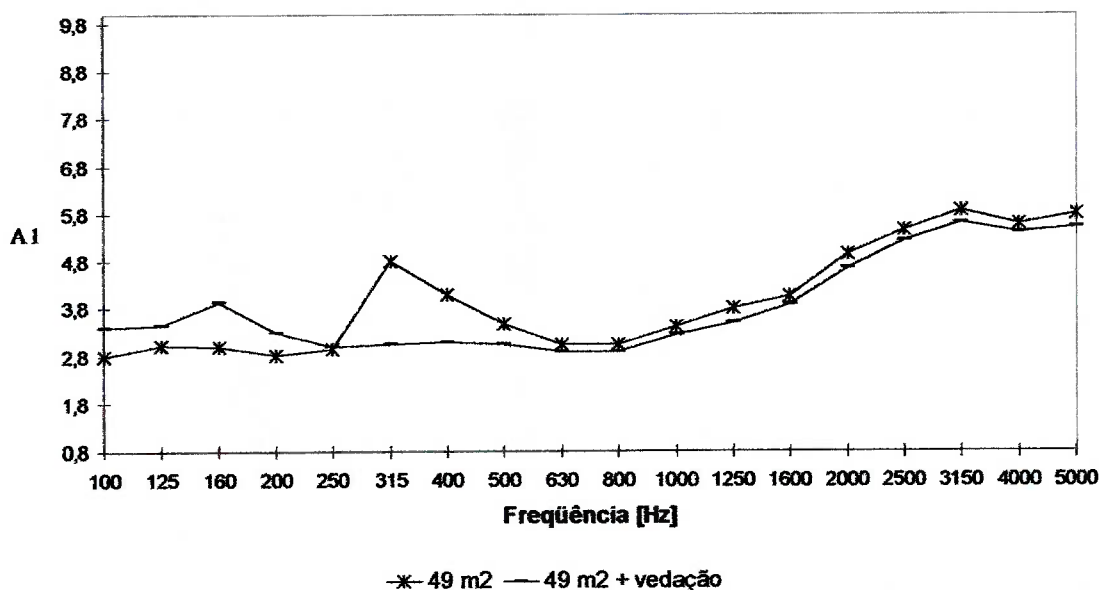


Fig. AP.9: Curvas de absorção sonora da câmara vazia e com difusores (49 m²), com e sem a vedação das frestas com perfis metálicos.

Por fim, optou-se pela instalação de dois dos absorvedores de baixa frequência utilizados anteriormente (ver Figura AP.7), promovendo, juntamente com os 13 difusores e a vedação das frestas com perfis metálicos, a curva de absorção sonora mais vantajosa, conforme ilustra a Figura AP.10. Todos os ensaios do Capítulo 5 foram feitos nesta configuração.

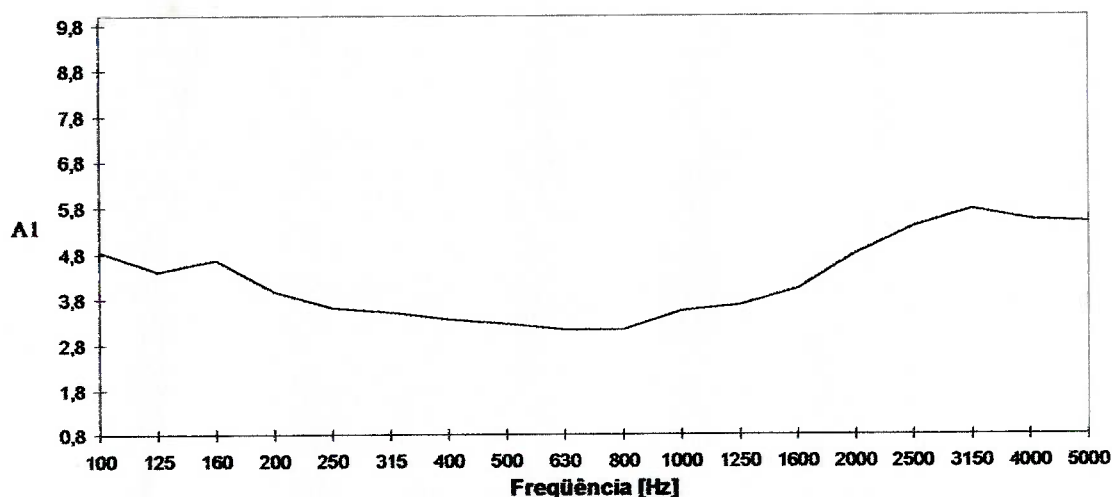


Fig. AP.10: Curva de absorção sonora da configuração final da câmara.