

---

# **Análise Paramétrica do Campo Acústico de Escritórios Panorâmicos**

**FLÁVIA FERREIRA NOGUEIRA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil – Conforto Ambiental

**Orientadora: Elvira Barros Viveiros da Silva**

---

**Florianópolis**

**2002**

NOGUEIRA, Flávia Ferreira. *Análise paramétrica do campo acústico de escritórios panorâmicos*. Florianópolis, 2002. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina

Orientadora: Elvira Barros Viveiros da Silva  
Defesa: 01/07/2002

O trabalho tem como escopo avaliar o campo acústico de um escritório panorâmico, considerando a influência da fala e de nove parâmetros de projeto em diferentes estações de trabalho, através de análises comparativas.

Palavras-chave: inteligibilidade da fala, escritórios panorâmicos, escritórios de plano aberto, *open plan offices*, estações de trabalho.

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Dissertação defendida e aprovada em 01 / 07 / 2002,  
pela comissão examinadora:**

---

**Prof. Elvira Barros Viveiros da Silva, Dr. Eng. – Orientadora – Mediadora**

---

**Prof. Roberto A. Tenenbaum, Dr – Examinador**

---

**Prof. Marta Dischinger, Ph D – Examinadora**

---

**Prof. Arcanjo Lenzi, Ph D – Examinador**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>RESUMO</b> .....	xiv
<b>ABSTRACT</b> .....	xv
<b>Capítulo 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 - Objetivo.....	2
1.2 - Metodologia.....	2
1.3 - Organização da dissertação.....	3
<b>Capítulo 2 - ESCRITÓRIOS PANORÂMICOS</b> .....	<b>5</b>
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Espaço Arquitetônico e Privacidade Acústica.....	6
2.3 - Elementos Arquitetônicos.....	9
2.3.1 - Barreiras Acústicas.....	10
2.3.2 - Paredes.....	18
2.3.3 - Forros.....	19
2.3.4 - Piso.....	22
2.4 - Fontes Sonoras.....	23
2.4.1 - Ar Condicionado.....	24
2.4.2 - Fala.....	26
2.5 - Ruído de Mascaramento.....	28

<b>Capítulo 3 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA PELO O MÉTODO DE ACÚSTICA DE RAIOS.....</b>	<b>35</b>
3.1 - Princípios da Acústica Geométrica.....	35
3.1.1 - Método de Imagem (MISM).....	36
3.1.2 - Método de Raios (RTM).....	38
3.2 - Outros Métodos.....	39
3.2.1 - Método do Feixe Cônico (CBM).....	39
3.2.2 - Método Triangular (TBM).....	40
3.3 - Programas Computacionais Utilizados.....	40
3.3.1 - Ansys®.....	41
3.3.2 - Raynoise®.....	41
3.4 - Sumário.....	42
<b>Capítulo 4 – TESTES PRELIMINARES DE VALIDAÇÃO DO MODELO.....</b>	<b>43</b>
4.1 - Ensaaios Experimentais.....	43
4.2 - Ensaaios Simulados.....	48
4.2.1 - Resultados das Simulações.....	52
4.2.2 - Critério de Convergência Adotado.....	53
4.2.3 - Análise dos Resultados.....	55
4.3 - Cálculos Teóricos.....	55
4.3.1 - Teoria de Salas.....	56
4.4 - Análise Comparativa entre os Resultados Simulados, Experimentais e Teóricos.....	61
4.5 - Conclusões.....	66
4.6 - Sumário.....	66
<b>Capítulo 5 – ESCRITÓRIOS PANORÂMICOS REAIS.....</b>	<b>67</b>
5.1 - Ensaaios Experimentais.....	67
5.2 - Ensaaios Simulados.....	70

5.2.1 - Resultados das Simulações.....	75
5.2.2 - Análise dos Resultados.....	76
5.3 - Conclusões.....	79
5.4 - Sumário.....	79
<b>Capítulo 6 – ANÁLISE PARAMÉTRICA COMPUTACIONAL.....</b>	<b>80</b>
6.1 - Objetivo.....	80
6.2 - Descrição da Sala e Parâmetros simulados.....	81
6.3 - Resultados das Simulações em NPS.....	89
6.4 - Análise dos Resultados.....	98
6.4.1 - Análise dos Resultados em NPS.....	99
6.5 - Resultados das Simulações em STI.....	107
6.5.1 - Análise dos Resultados em STI.....	115
6.6 - Decaimento Sonoro Espacial.....	121
6.6.1 - Resultados dos Decaimentos Espaciais.....	122
6.6.2 - Análise dos Resultados dos Decaimentos Sonoros Espaciais.....	125
6.7 - Sumário.....	127
<b>Capítulo 7 – Conclusões.....</b>	<b>128</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>131</b>
Apêndice I - Índice de Articulação AI.....	134
Apêndice II - Perda de Transmissão (TL); Classe de Transmissão Sonora (STC).....	136
Apêndice III - Índice de Transmissão da Fala (STI).....	139
Apêndice IV - Critérios de Avaliação de Ruído.....	141

## RESUMO

Atualmente o ambiente de trabalho tem sofrido transformações de modo a integrar cada vez mais a equipe de funcionários. Escritórios panorâmicos (*open plan offices*) com sala amplas têm sido cada vez mais adotados em substituição aos escritórios ditos estanques. As estações de trabalho são separadas por divisórias baixas, oferecendo separação visual e certo grau de isolamento acústico. O principal aspecto nestes escritórios, então, é a privacidade entre estações. Neste trabalho, o objetivo é avaliar de forma ampla o campo acústico destes espaços panorâmicos.

Primeiramente, um levantamento das características de espaços panorâmicos e dos parâmetros que influenciam a qualidade acústica destes ambientes é apresentado. Uma investigação sobre os métodos numéricos empregados nas simulações complementa esta etapa inicial.

A seguir, um modelo simples de escritório foi gerado e, através da análise de resultados de medições experimentais e simulações numéricas, o método de investigação foi validado e os parâmetros adequados à investigação posterior de modelos de maior complexidade definidos.

Em etapa posterior, dois escritórios panorâmicos reais, de uma empresa comercial, foram objeto de estudo dos fatores que influenciam o conforto acústico nestes ambientes. Modelos virtuais foram gerados e processados pelo programa de acústica de raios Raynoise. Os resultados obtidos foram comparados a valores medidos em escritórios reais e os valores de coeficientes de absorção e de perda de transmissão dos diversos materiais e componentes foram ajustados até a convergência de dados ser obtida.

Em conclusão, um escritório panorâmico composto por 64 estações de trabalho foi idealizado. Tendo como fonte sonora a fala, e considerando nove outros parâmetros de projeto desta tipologia de espaço, análises comparativas entre diferentes estações de trabalho permitiram analisar a relevância de cada variável de projeto na inteligibilidade e na privacidade entre estações. Junto as conclusões, também, tópicos para estudos futuros são sugeridos.

## ABSTRACT

The workspace has been transformed in order to integrate staff members lately. Open plan offices are being in favour of traditional offices. Now, workstations are separated by partial height barriers, which allow certain degree of visual separation and some acoustical isolation. The main aspect in these offices is, therefore, privacy among workstations. In this work, the aim is to evaluate the sound field of such open rooms considering different layouts and their consequence in privacy.

Firstly, an investigation was performed to define which parameters influence the sound quality in such space, considering volume, area and usual surface coverings. A brief introduction on numerical methods for room acoustics simulation integrates this initial part as well.

A simple model was create for a preliminary analysis in order to validate the procedure and more complex parameters were set for further simulations.

Thereafter, two real offices were used to study the influence of several factors on users satisfaction. Numerical models were generated in an acoustic software, according to the real layouts, and the results compared to measured data. The absorption and transmission loss coefficients of real materials and components were adjusted up to a level in which a desired until convergence was obtained. These values were input data for following simulations.

Lastly, an open plan office composed of 64 workstations was proposed for a more advanced study. A speaker positioned in a central station was considered as noise source. Nine design parameters were taken as variables for a parametric analysis regarding privacy and intelligibility levels.

## Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

A busca cada vez mais intensa por produtividade tem levado as empresas a reverem seus conceitos nas relações interpessoais no local de trabalho. A tipologia de escritórios fechados, nos quais os espaços de trabalho são delineados por paredes, vem paulatinamente sendo substituídos por ambientes abertos, onde as divisões entre estes espaços são realizadas por barreiras de meia altura que permitem contato visual direto. Há propostas mais radicais, onde nem mesmo barreiras são admitidas. Concomitante ao ganho de produtividade oferecido com a adoção de escritórios sem paredes, alguns aspectos tornam-se críticos no que tange ao conforto, troca de informações confidenciais e capacidade de concentração dos seus usuários. Portanto, uma correta adequação acústica deste espaço faz-se imprescindível para obtenção do bom desempenho das tarefas realizadas nestes ambientes.

Estes ambientes abertos, também chamados escritórios panorâmicos ou escritórios de plano aberto (*open plan offices*) são compostos por unidades modulares, chamadas estações de trabalho. Normalmente, as estações de trabalho (ou módulos) são distribuídas simetricamente pelo espaço, cada estação consistindo de uma estação de trabalho individual que contém os mesmos móveis e máquinas (ou fontes sonoras), sendo cada estação, na maioria das vezes, ocupada por um usuário diferente (ou fonte sonora).

A ausência de partições altas e de portas, se por um lado beneficia a visualização direta de todo o ambiente, a maior troca de informações entre usuários, o acesso a departamentos, permitindo, também, uma maior flexibilidade de *layout*, por outro lado amplia a interferência sonora entre as estações de trabalho. Assim, considerando-se o campo acústico gerado, o principal problema destes ambientes é caracterizado pela falta de inteligibilidade ou privacidade.

Apesar de muitas publicações e dados disponíveis sobre escritórios panorâmicos, a bibliografia disponível relata apenas simulações de estações adjacentes separadas por barreiras de meia altura. Estas simulações são basicamente descritas como uma ou mais fontes sonoras situadas em uma estação. São calculados índices de avaliação de privacidade e inteligibilidade tais como AI

(*Articulation Index*) (ver apêndice I), STI (*Speech Transmission Index*) (ver apêndice III), entre outros, na altura do ouvinte posicionado na estação adjacente. São relatados casos de barreiras que podem ser inteiriças ou não, e também estações próximas a plano refletoras, tais como paredes ou janelas. Atualmente é comum observar ambientes onde as barreiras só delimitam um ou dois lados da estação de trabalho, permitindo exposição direta entre as estações. Porém, não há relatos da contribuição de estações mais afastadas, ou mesmo de estações de trabalho adjacentes, onde não há separação por barreiras.

Com base nestas observações, este trabalho está direcionado a um estudo acústico mais completo de um ambiente panorâmico, considerando um espaço composto por 64 estações de trabalho, avaliando a influência da fala como fonte sonora e de parâmetros de projeto em estações de trabalho em diferentes posições.

### **1.1 – Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo avaliar de forma ampla o campo acústico de um espaço panorâmico. Para conclusão da proposta, um escritório panorâmico composto por 64 estações de trabalho foi idealizado. Uma fonte sonora, a fala, localizada em uma estação central e a adoção de diferentes variáveis de projeto, apontadas como relevantes pelo estudo bibliográfico para a composição desta tipologia de ambiente, foram tomadas como parâmetros para este estudo. Assim, análises comparativas entre estações de trabalho em diferentes posições permitiram avaliar a relevância da influência da fala e de cada parâmetro de projeto na inteligibilidade/privacidade de estações contíguas e afastadas.

### **1.2 – Metodologia**

- 1 - Estudos de embasamento teórico através da revisão bibliográfica.
- 2 - Estudar os princípios básicos dos programas computacionais utilizados.
- 3 - Realizar ensaios experimentais em ambiente vazio para validação e ajuste dos modelos teóricos a serem concluídos - descrição dos instrumentos de medição e dos principais conceitos

relativos às avaliações e cálculos teóricos; comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados simulados e teóricos.

4 - Realizar ensaios experimentais em ambientes reais de trabalho visando obter valores típicos de coeficientes de absorção e medidas físicas do mobiliário.

5 - Estudar, através de análises computacionais, um ambiente idealizado para avaliar de forma ampla o campo acústico de escritórios panorâmicos. Verificar a influência da fonte sonora considerando relações espaciais distintas entre as estações e a influência de três grupos de fatores: dimensões e posições das barreiras (4 variações), absorção (3 variações - piso, forro e barreira) e espaçamento entre as estações (2 variações - maior e menor afastamento). Para cada estudo serão desenvolvidas conclusões detalhadas.

6 - Discutir os resultados gerais e elaborar propostas para continuação do trabalho.

### **1.3 – Organização da dissertação**

- No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre escritórios panorâmicos (*open plan offices*), abrangendo teorias e principais trabalhos publicados, com o objetivo de apresentar uma visão geral do assunto.

- O capítulo 3 expõe um resumo sobre os métodos numéricos utilizados em acústica de salas. Objetiva-se descrever os princípios básicos de programas computacionais que são utilizados nas etapas de simulação. A cada técnica, uma descrição sucinta é apresentada.

- No capítulo 4 são apresentados ensaios experimentais preliminares e descritos os detalhes de sua execução. Em seguida, são apresentadas as simulações implementadas e discorridos sobre os parâmetros de entrada, teorias e critério de convergência adotado para posterior comparação e validação dos resultados. Por fim, os resultados são discutidos.

- Primeiramente são efetuados levantamentos em dois escritórios panorâmicos reais. Tendo como referência os dados obtidos, estes escritórios foram simulados objetivando-se ajustar o modelo teórico aos valores medidos através da análise de sensibilidade dos coeficientes de absorção. Esta etapa do trabalho é apresentada no capítulo 5.

- No capítulo 6 são apresentadas simulações para um ambiente panorâmico formado por 64 estações de trabalho. É discutida a influência da fala e de diferentes parâmetros de projeto em diferentes estações de trabalho.

- No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões e feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# ESCRITÓRIOS PANORÂMICOS

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre escritórios panorâmicos (*open plan offices*), abrangendo teorias, referências aos principais trabalhos publicados e resultados provenientes de ensaios laboratoriais. Objetiva-se adquirir uma visão geral do assunto e coletar subsídios para discussões e análises dos resultados das simulações propostas como objeto de pesquisa deste trabalho.

### 2.1 – Introdução

É do início dos anos sessenta o surgimento do conceito de escritórios de plano aberto ou escritórios panorâmicos (*open plan offices, landscape offices*), representados por amplas salas que abrigam vários trabalhadores próximos, sem divisões de setores ou atividades definidas por ambientes privativos, circundados por paredes ou divisórias totais, de piso a teto. As separações nestes ambientes são feitas por divisórias baixas, de altura parcial.

Esta idéia foi primeiramente apresentada na Alemanha, desenvolvida pela parte administrativa da Empresa Quickborner Team [10] e baseava-se na rapidez do fluxo de informações e documentos. Suas vantagens eram a eficiência e flexibilidade em termos de administração do escritório. Desde então, este conceito, acrescido da idéia de integrar cada vez mais a equipe e possibilitar uma flexibilidade de *layout*, tem sido amplamente difundido, existindo vários exemplos de companhias que adotaram o sistema. O crescimento de sua utilização é cada vez maior.

No entanto, algumas preocupações surgem com esta tipologia de ambiente, que demandam soluções acusticamente marginais. Exigências opostas, comunicação e privacidade, são requeridas a coexistirem em um único ambiente. Sem dúvida alguma, o principal problema destes escritórios é a falta de privacidade entre as estações de trabalho vizinhas. A ausência de partições altas e portas resulta em significativa perda de privacidade sonora e em incômodo gerado pelo ruído das diversas fontes sonoras presentes, originando situações que podem desviar a concentração mental e, também, interferir na produtividade. Se cuidadosamente projetados, os escritórios panorâmicos podem

oferecer razoável grau de privacidade, desde que as funções de trabalho adjacentes sejam compatíveis ou não muito próximas. É essencial, no entanto, que certos fatores básicos como, por exemplo, absorção adequada, sejam incorporados ao projeto, ou o sistema não funcionará satisfatoriamente.

## 2.2 – Espaço Arquitetônico e Privacidade Acústica

Um escritório panorâmico é um amplo espaço que abriga diversas estações de trabalho, geralmente ocupadas por pessoas sentadas. A volumetria desses ambientes é caracterizada por uma geometria achatada, onde teto e piso formam dois planos horizontais com dimensões bem maiores que a altura ou pé-direito. As estações de trabalho são separadas por divisórias (também chamadas de partições de altura parcial ou de meia altura ou, ainda, barreiras) que oferecem separação visual e certo grau de isolamento acústico, com ampla flexibilidade de *layout*, permitindo também um rearranjo das estações de trabalho para atender eventuais mudanças organizacionais. Com exceção de alguns ambientes como, por exemplo, a sala de reuniões, que poderá ser totalmente fechada, o escritório constitui-se de uma área ampla única.

Nestes ambientes, a interferência com a fala é um efeito particularmente incômodo. Qualquer ruído de intrusão pode ser irritante, mas a conversa inteligível é inevitavelmente a que mais distrai em comparação a outros ruídos. Uma meta importante nestes escritórios é o grau de privacidade da fala entre as estações de trabalho vizinhas. A privacidade está associada com a ausência de sinais de fala estranhos e baseia-se em dois pontos: em minimizar a porcentagem de comunicação verbal entendida entre postos de trabalho e em maximizar as condições de concentração oferecidas. A fala pode ser audível entre os postos de trabalho, mas não deve ser completamente inteligível. Em escritórios de plano aberto, a privacidade acústica depende basicamente da composição de três aspectos: a absorção sonora com o uso de materiais de acabamento, o bloqueio da trajetória sonora entre estações de trabalho adjacentes e a sobreposição dos sons de intrusão pela elevação do nível do ruído de fundo. Logo, o grau de privacidade da fala depende da redução da inteligibilidade, isto é, a maior ou menor capacidade de reconhecimento, pelo ouvinte, do que é proferido pelo orador, pelo uso de algumas variáveis acústicas. Cada uma dessas variáveis pode ser controlada até certo ponto,

mas é importante reconhecer que a privacidade depende de atenuação parcial do nível de voz ou fonte sonora por elementos arquitetônicos e mobiliário, como também do nível geral de ruído de fundo do ambiente, que por sua vez é dependente dos níveis de ruído dos sistemas de tratamento de ar, das atividades rotineiras do escritório, ou do sistema sonoro de mascaramento.

A inteligibilidade da fala depende, principalmente, da intensidade do som comparada ao nível do ruído de fundo na área de trabalho do receptor. Por sua vez, o nível da fala é determinado pelo nível da voz e pela distância que separa o orador do ouvinte. Quando a inteligibilidade melhora, a distração aumenta até o ponto em que toda a privacidade é perdida. Onde há excelente comunicação pela fala, a inteligibilidade é alta e onde há uma perda gradual da inteligibilidade, existe dificuldade de entendimento, até que a compreensão se torne impossível. Assim, a privacidade da fala dentro de escritórios é dependente da razão sinal/ruído entre o nível da fala de intrusão e do nível de ruído de fundo regular.

A inteligibilidade da fala em uma sala é dependente de quatro fatores: a) da forma da sala, incluindo efeitos como ecos, concentrações sonoras e reflexões atrasadas; b) do nível de pressão sonora requerido para uma audição confortável; c) do efeito da reverberação na fala; e d) do efeito da interferência produzida por ruído na sala.

Tanto a inteligibilidade, quanto o nível da escuta e o esforço vocal requeridos são fatores que determinam o nível de ruído de fundo aceitável em recinto fechado. A maioria das medições das variações na intensidade da fala são realizadas sob condições calmas, laboratoriais. Um conjunto de palavras é falado e um grupo de ouvintes é requerido para identificá-las. Os testes de articulação, habitualmente, usam listas de palavras especialmente selecionadas, de uma ou duas sílabas. A pontuação dos testes, representada pela porcentagem de palavras corretamente identificadas, será mais baixa para as palavras isoladas de teste que para as palavras usadas no contexto normal de fala. O grau de mascaramento da fala depende da intensidade e do espectro do ruído que interfere. Um tom de mais baixa frequência pode mascarar um tom de frequência mais alta muito mais efetivamente que a conversação. Dependendo do nível de ruído em um ambiente, o orador, mesmo que involuntariamente, aumentará um pouco seu esforço vocal para superar, pelo menos até certo ponto, os efeitos de mascaramento do ruído. Ele elevará sua voz assim que o ruído de fundo aumentar.

Como a relação ruído intrusivo/ruído de fundo é determinante na capacidade de compreensão da fala, diversos índices de quantificação têm sido desenvolvidos especificamente para determinar o

grau de privacidade acústica ou inteligibilidade. Os mais difundidos são: STI (*Speech Transmission Index*), SIL (*Speech Interference Level*), Rasti (*Rapid STI*), AI (*Articulation Index*).

O índice de articulação AI (*Articulation Index*), uma medida objetiva da inteligibilidade, tem ganho aceitação como o mais importante índice na avaliação das condições de comunicação pela fala e/ou de privacidade (ver apêndice I). Foi derivado da comparação do nível do sinal de intrusão da fala (a voz) e do nível do ruído de fundo na posição do ouvinte. Seu valor varia entre zero e um, sendo o valor zero a situação de nenhuma inteligibilidade e o valor um, de total inteligibilidade.

Para se caracterizar se a situação entre estações de trabalho adjacentes é de comunicação ou privacidade, níveis de voz humana podem ser ordenados em uma escala dividida em baixa, normal, elevada e alta. Para referenciar estes níveis, é usual associar a voz “normal” com a conversação; a voz “alta” implica sonoridade máxima sem forçar a mesma e a voz “cochichada” cairia abaixo do nível baixo. De acordo com Pirn [30], a privacidade da fala é considerada “confidencial” quando o valor do AI está entre 0,00 e 0,05. É considerada “normal” quando este valor está compreendido no intervalo de 0,05 e 0,20. Em seu trabalho, o autor formula uma tabela onde mostra a relação entre os valores do AI e o grau de privacidade ou comunicação (ver Tabela 2.1).

Segundo Moreland [27], para um ambiente acústico satisfatório em um escritório de plano aberto (por exemplo, para privacidade da fala “normal”), geralmente busca-se um AI de mais ou menos 0,2. Isto significa que a conversação de outros no escritório não está causando a distração de quem a escuta, mas em torno de 80% a 90% das conversas de outros ainda estarão sendo compreendidas por um ouvinte treinado que está tentando entender a conversa. Para uma privacidade de fala confidencial, um AI de 0,05 ou menos é o desejado, o que significa que menos de 12% da conversação será compreendida.

AI	Grau de privacidade ou comunicação
0,00 - 0,05	Confidencial
0,05 - 0,20	Normal
0,20 - 0,35	No limite
0,35 - 0,50	Comunicação moderada
0,50 - 0,65	Boa comunicação
0,65 - 1,00	Excelente comunicação

Tabela 2.1 – Relação entre o índice de Articulação AI e Privacidade ou Comunicação [30].

O principal problema em escritórios panorâmicos não é a propagação em grande distância e, sim, o caminho sonoro de pequeno alcance entre as estações é o mais importante na interferência com a fala. Este fato tende a ser mais relevante à medida em que máquinas mais silenciosas estão sendo incorporadas aos escritórios atuais em detrimento de máquinas ruidosas. A virtual eliminação do telex pelo aparelho de fax e a substituição de impressoras matriciais por jato de tinta são exemplos comuns.

### 2.3 – Elementos Arquitetônicos

A obtenção da privacidade acústica entre estações de trabalho depende do quanto o ruído intrusivo proveniente de estações vizinhas excede o nível de ruído de fundo junto ao ouvinte em uma estação adjacente. Os ruídos intrusivos dominantes estão ligados, principalmente, aos ruídos da fala e as atividades exercidas pelo usuário e dependem das seguintes variáveis: a) fonte sonora (origem, amplitude, direcionalidade, orientação e conteúdo espectral); b) atenuação do ruído intrusivo, resultante da combinação da redução sonora pela distância e proteção oferecida por barreiras; c) aumento / diminuição do som direto pelas reflexões sobre as superfícies que compõem o ambiente (paredes, forros e piso) e d) nível do ruído de fundo que depende dos sistemas de ar condicionado, equipamentos e da existência do sistema eletrônico de mascaramento. Pirn [30] afirma que em edifícios sem partições completas, de piso a teto, o AI muda drasticamente com as

seguintes variáveis: esforço vocal, orientação da fonte, ruído de fundo, distância entre orador - ouvinte e atenuação por barreiras. Em seu artigo, o autor discute o efeito relativo dessas variáveis no AI e assim demonstra a importância de cada parâmetro de projeto.

### **2.3.1 – Barreiras Acústicas**

Barreira acústica, por definição, é qualquer obstáculo sólido que seja relativamente opaco ao som, bloqueando a linha direta entre fonte sonora e receptor criando, assim, uma sombra acústica atrás de si, conforme definição de Daigle [11]. Dentre todas as variáveis que agem para produzir o ambiente acústico final de um escritório panorâmico, as barreiras ou divisórias são de particular importância. Elas definem os locais de trabalho, oferecem privacidade visual para as pessoas sentadas e, principalmente, promovem a atenuação sonora. A atenuação sonora promovida é função da posição relativa do receptor e fonte em relação à barreira, da geometria (principalmente a altura sobre a linha que une fonte e receptor), localização, absorção, espectro do som e perda de transmissão sonora [11]. As barreiras podem ser fixadas livremente ou integradas ao mobiliário.

De acordo com Moreland [27], para configurações normalmente encontradas em escritórios panorâmicos, é questionável se a privacidade da fala satisfatória pode ser obtida entre estações de trabalho adjacentes sem o desenho adequado das divisórias. Ele mostrou em 1987, que uma divisória acústica deve funcionar como uma barreira com o objetivo bloquear a propagação sonora vinda da fonte para o receptor, a fim de prover a privacidade da fala adequada entre as estações de trabalho adjacentes, minimizando o nível de pressão sonora da fala de intrusão.

Em seu artigo, Pirn [30] ressalta que as barreiras de altura parcial são superestimadas. Ele acredita que, se projetadas cuidadosamente e efetivamente localizadas, tais barreiras podem ser bastante úteis, mas a perda máxima que se pode obter do índice de articulação AI (para aumentar a privacidade) geralmente não é tão grande quanto a que pode ser conseguida através da manipulação cuidadosa de no mínimo 3 ou 4 outras variáveis.

Em escritórios panorâmicos, a atenção é focada na privacidade da fala entre estações de trabalho adjacentes porque geralmente é mais difícil se obter a privacidade de fala para os usuários destas estações, que para os ocupantes de estações de trabalho mais distantes.

O caminho de intrusão da fala pode ser direto ou interrompido por barreiras parcialmente altas. Estas realizam sua função redistribuindo a energia sonora vinda diretamente da fonte em direção ao receptor, como ilustrado na Figura 2.1, e controlando possíveis caminhos sonoros entre dois locais de trabalho, que incluem:

- energia sonora transmitida diretamente através da divisória: o quanto é transmitido depende das propriedades do material (massa específica, espessura e velocidade de propagação sonora no material), do ângulo de incidência das ondas sonoras e do espectro do ruído;
- difração pelo topo e pelos lados da divisória: em geral, quanto maior a diferença entre o caminho direto e o caminho difratado, maior é a redução do ruído;
- reflexão/absorção pela barreira: parte das ondas sonoras são redirecionadas para longe do receptor e outra parte é absorvida pelo material de acabamento da mesma.

Embora existam outros caminhos pelos quais o som da fala de um orador alcança o ouvinte em uma estação de trabalho ao lado (como, por exemplo, reflexões vindas do teto, piso e paredes da área), os três caminhos de propagação sonora citados anteriormente são os mais importantes no que se refere às divisórias. Em cada um destes caminhos, critérios de avaliação específicos são usados para descrever o desempenho das mesmas. Nos Estados Unidos, fabricantes de mobiliários para este tipo de escritório utilizam estes critérios para qualificar cada tipo de divisória. Como a atenuação sonora nestes três percursos depende da frequência do som, as medições padrão do desempenho das divisórias são usualmente tabeladas ou graficamente apresentadas em função da frequência.

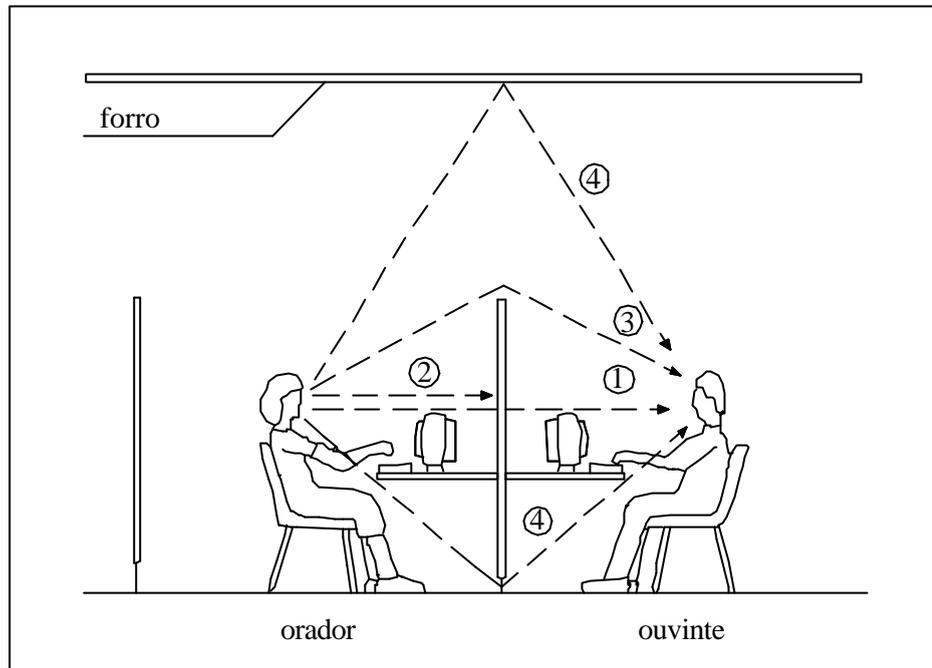


Figura 2.1 – Eventos na propagação sonora entre estações de trabalho [04].

Considerando o caminho 1 (propagação sonora através da divisória), o critério utilizado é o STC (*Sound Transmission Class*), valor que descreve como a divisória previne a passagem do som pela mesma, derivado da Perda de Transmissão, TL (*Transmission Loss*) (ver apêndice II). De um modo geral, segundo os ensaios de Moreland [26], um STC de 20 ou mais é considerado satisfatório para uma atenuação aceitável da fala de um orador em uma estação de trabalho adjacente. Isto, porque, em muitas situações, o som da fala que chega na estação de trabalho do ouvinte será dominado pelos sons que chegam por difração sobre o topo da divisória e por reflexões de outras superfícies, principalmente do teto. Porém, quando orador e ouvinte estão bem próximos, um STC maior que 25 é obrigatório para oferecer maior benefício no isolamento do ruído pela divisória.

De qualquer forma, é consenso que o som transmitido através da barreira deverá ser relativamente desprezível em relação ao som difratado ao seu redor, especialmente nas frequências importantes para a inteligibilidade da fala [4,19,24].

Considerando a componente 2 (absorção sonora pela divisória), o critério usado é o NRC (*Noise Reduction Coefficient*), um valor que descreve o desempenho da divisória na absorção do som incidente. O NRC é um número único, derivado da média dos valores dos coeficientes de absorção do material, nas frequências de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, arredondado ao mais próximo múltiplo de 0,05.

A partir de vários testes e ensaios, Moreland [27] pode perceber que as divisórias absorventes possuem um NRC na faixa de 0,55 a 0,80 e divisórias de superfícies rígidas têm o valor do NRC consideravelmente menor que 0,55. Divisórias com superfície de plástico rígido terão, geralmente, um NRC menor que 0,1. Adicionalmente, investigando o efeito do NRC no índice de articulação AI, Moreland afirmou que divisórias com poder de absorção para frequências altas oferecem melhor privacidade da fala que divisórias com poder de absorção distribuído para a faixa de baixa frequência, mesmo quando os valores do NRC são os mesmos. Isto significa que divisórias tendo o mesmo NRC mas diferentes espectros de absorção, não alcançam a mesma privacidade da fala. Em uma nova investigação, onde relacionava a variação do AI com o NRC, o autor concluiu que a absorção sonora tem um efeito menor que os outros parâmetros no AI entre estações de trabalho adjacentes. Assim, o som que se propaga ao longo dos caminhos 1 e 3 é mais importante que o som que se propaga ao longo do caminho 2 na determinação do nível da fala de intrusão na estação do ouvinte.

Considerando o caminho 3 (difração sonora sobre o topo da barreira), não há critérios adotados que descrevam o quanto uma divisória atenua o som que se propaga ao longo deste caminho. A atenuação sonora é determinada principalmente pelas considerações geométricas, particularmente a altura em relação à altura do orador e ouvinte, devendo ser quebrada a linha de visão entre ambos. As dimensões máximas de uma barreira são usualmente limitadas por conveniências físicas, possíveis interferências com o fluxo de ar e pela capacidade de proporcionar uma ampla visão do ambiente. De um modo geral, pesquisadores concordam que a altura das barreiras tem influência direta na redução do ruído transmitido entre estações adjacentes. Quanto mais alta a barreira, mais a linha de visão é bloqueada, maior a diferença de caminho (diferença no comprimento entre o caminho desobstruído e o caminho sobre o topo da barreira) e, conseqüentemente, maior a atenuação [11]. Não há consenso sobre a altura mínima recomendável de barreira, sendo encontrado na literatura valores de 1,5m [17,19,21], 1,7m [4] ou, ainda, a

recomendação de que uma divisória efetiva deve possuir sua largura duas vezes a altura [17]. De acordo com indicação da ASID (*American Society of Interior Designers - sound solutions*), uma altura de 1,65 m é necessária para conter o som, ressaltando que painéis com alturas inferiores a 1,34 m são bastante ineficientes e normalmente, não provêm níveis normais de privacidade [2]. Se uma atenuação maior é desejada mas a abertura visual deve ser mantida, uma placa de vidro ou material transparente pode ser fixada no topo da barreira baixa, de forma a aumentar sua altura [4,17]. Para Harris [19], o vidro ou material transparente só deve ser colocado sobre a altura mínima por ele recomendada.

A posição do receptor ou fonte relativa à barreira é de fundamental importância para a atenuação [11]. As barreiras colocadas próximas ao orador ou ouvinte são mais efetivas que aquelas colocadas equidistantes deles [4]. Isto ocorre porque, quanto maior o ângulo através do qual o som tem que se “curvar” para alcançar a posição do receptor do outro lado da barreira, maior será a perda por inserção em consequência da barreira. Assim, barreiras mais altas são mais eficientes que as mais baixas, e barreiras colocadas mais perto do orador ou do receptor são mais eficientes que aquelas equidistantes de ambos. Para Irvine e Richards [21], áreas de plano aberto que requerem maior grau de privacidade devem ter a maior separação possível entre as estações de trabalho.

Segundo os estudos de Moreland [27], duas observações em relação a atenuação deste caminho devem ser levadas em consideração. Primeira, a atenuação em consequência da difração também aumenta com o aumento da frequência do som, o que é bastante benéfico para a privacidade da fala, uma vez que as frequências mais altas têm mais efeito no AI. Segunda, a difração também aumenta com o aumento da altura (relativa a altura do orador e do ouvinte), e/ou se a distância entre orador/divisória ou ouvinte/divisória decresce.

Há também modificações de desempenho das divisórias ou barreiras em consequência de sua forma e natureza da aresta difratora. Além de suas dimensões, certos *layouts* de distribuição dos móveis também contribuem no impacto acústico de escritórios panorâmicos. Objetivando-se alcançar níveis normais de privacidade, segundo a ASID [2], as distribuições dos mobiliários devem observar os seguintes aspectos: a) evitar linhas diretas de visão, pois quando há um caminho visual direto entre os trabalhadores, o som pode mais facilmente passar ao longo do caminho e incomodar os usuários; b) criar um design para a estação de trabalho que promova o máximo de enclausuramento, e c) colocar painéis altos separando a equipe de acordo com atividade e nível de ruído por ela gerado, assegurando que outros trabalhadores tenham níveis normais de privacidade em

seu local de trabalho. Egan [17] chama a atenção para outros aspectos que devem ser observados em relação aos *layouts* das estações de trabalho. Quanto maior a distância entre orador e ouvinte, maior o grau de privacidade, isto é, para *layouts* internos dentro de estações de trabalho iguais, é mais importante aumentar a distância entre orador e ouvinte que a distância entre os centros das estações de trabalho.

K. K. Chan e W. M. To [7] apresentaram resultados de diversos ensaios onde avaliaram o grau de privacidade da fala em relação a diversas configurações de divisórias. Os valores de AI medidos indicaram as configurações mais eficazes. Concluíram que: a) a colocação de uma divisória lateral na estação receptora é melhor que colocar na estação fonte; b) duas divisórias pequenas em uma das laterais geram o mesmo valor de AI que uma divisória longa na estação de trabalho receptora; e finalmente, c) a melhor configuração, isto é, a que gerou o menor AI, foi a divisória com duas laterais grandes.

Considerando o caminho 4 (reflexões sonoras pelas frestas e do forro), é comum encontrarmos frestas entre as juntas das divisórias e entre o piso e o fundo das mesmas. Isto permite que o som passe através destas frestas da estação de trabalho do orador, para a estação adjacente. A quantidade de som que passa depende do tamanho da fresta e da frequência do som. Portanto, não se pode alcançar níveis confidenciais de conversação sem dar a devida atenção à propagação sonora por este caminho. Em seu trabalho, Moreland [27] concluiu que o AI melhora se a fresta é menor e o piso carpetado. K. K. Chan e W. M. To [7] concordam que, lacrando as frestas, haverá uma melhora no valor do AI.

A transmissão por reflexão depende das propriedades acústicas do teto, da distância entre o término da barreira e o teto e da natureza das paredes, tanto do lado da fonte sonora quanto do lado do receptor. O som se propagando no plano horizontal e passando por flancos das barreiras (*bypassing*) devido às reflexões que acontecem nas superfícies verticais, podem reduzir a atenuação sonora entre os locais de trabalho. Como testes de laboratórios derivam estes valores de perda de transmissão sonora para uma divisória com todo o entorno e frestas bem vedados, o valor do STC pode ser um indicador enganoso. As frestas entre os pontos de conexão das divisórias e entre o fundo da mesma e o piso reduzirão o valor efetivo do STC.

Após variadas análises, Moreland [26] concluiu que os vários parâmetros interagem de maneira complexa para produzir um dado nível de privacidade da fala em um escritório de plano

aberto e que qualquer tentativa em estimar a privacidade de fala para um dado par de estações de trabalho pelo uso exclusivo do NRC, STC ou qualquer outro único número deve ser visto com precaução.

Ao ar livre, o nível de pressão sonora segue a lei do inverso do quadrado - o nível cai 6 dB a cada dobro de distância. Durante seu trabalho envolvendo instalações de plano aberto, Pirn [30] observou que dentro de espaços razoavelmente absorvedores, o nível sonoro diminui continuamente assim que a distância entre fonte e receptor é aumentada. O decaimento sonoro não precisa ser necessariamente 6 dB para cada dobro de distância. Ele pode ser de 5dB ou menor, mas em espaços tratados uniformemente, a taxa de atenuação tende a ser relativamente constante. Através da análise do efeito da distância entre orador e ouvinte, Pirn traça algumas conclusões: se o desejado é maximizar a privacidade acústica sem a penalidade de ocupação esparsa, é indicado simular tão próximo quanto possível o decaimento sonoro de campo livre. Uma perda de 5 dB pelo dobro da distância é razoável em um espaço panorâmico bem projetado.

Até a década de 60 não se tinha conhecimento de nenhum método digno de confiança e prático que pudesse ser utilizado no projeto de proteções que promovessem a redução de ruído, em função da complexidade do cálculo preciso da difração do som.

Em áreas abertas, onde o entorno é livre, barreiras são comumente usadas e apresentam-se efetivas e previsíveis como, por exemplo, as utilizadas para o controle do ruído de tráfego em rodovias. Em ambientes internos, as barreiras também utilizadas, tendo porém sua eficiência limitada pelas características de reverberação do espaço interior.

Um dos mais importantes fenômenos físicos que surge em função da atenuação oferecida pelas barreiras é a difração. Este fenômeno surge quando a linha reta entre a fonte sonora e o receptor é bloqueada por algum obstáculo e as frentes de ondas modificam seu caminho de propagação, curvando-se sobre a barreira em direção ao observador.

Maekawa, em 1968 [6], com o propósito de solucionar a deficiência de cálculos da época, criou um método para o cálculo da atenuação produzida por barreiras acústicas, baseado na observação de resultados experimentais de uma barreira construída e testada sob condições de campo livre. O autor apresentou a formulação através de um ábaco simples para projeto, dependente apenas de uma grandeza adimensional, o número de Fresnel, que fornece valores aproximados de atenuação. Pela sua simplicidade e relativamente boa aproximação, o método é amplamente difundido e conhecido mundialmente como “Diagrama de Maekawa”.

Antes da definição do número de Fresnel, faz-se necessário a explicar os conceitos de zonas de sombra e de brilho.

Considere uma linha reta partindo da fonte sonora e tangenciando a borda superior da barreira, como na Figura 2.2. O receptor que estiver localizado acima desta linha é considerado na zona de brilho ou iluminada. Por outro lado, qualquer ponto de recepção abaixo desta linha situa-se na sombra acústica. O som que penetra na zona de sombra tem seu nível reduzido, sendo esta redução chamada de atenuação da barreira. Nesta região, a penetração do som é maior em baixas frequências que em altas frequências. Existe, ainda, uma zona de transição, cuja definição não é bastante clara. Esta zona será muito próxima à linha divisória entre a zona de brilho e a zona de sombra, sendo geralmente problemática no que diz respeito à predição do campo acústico difratado.

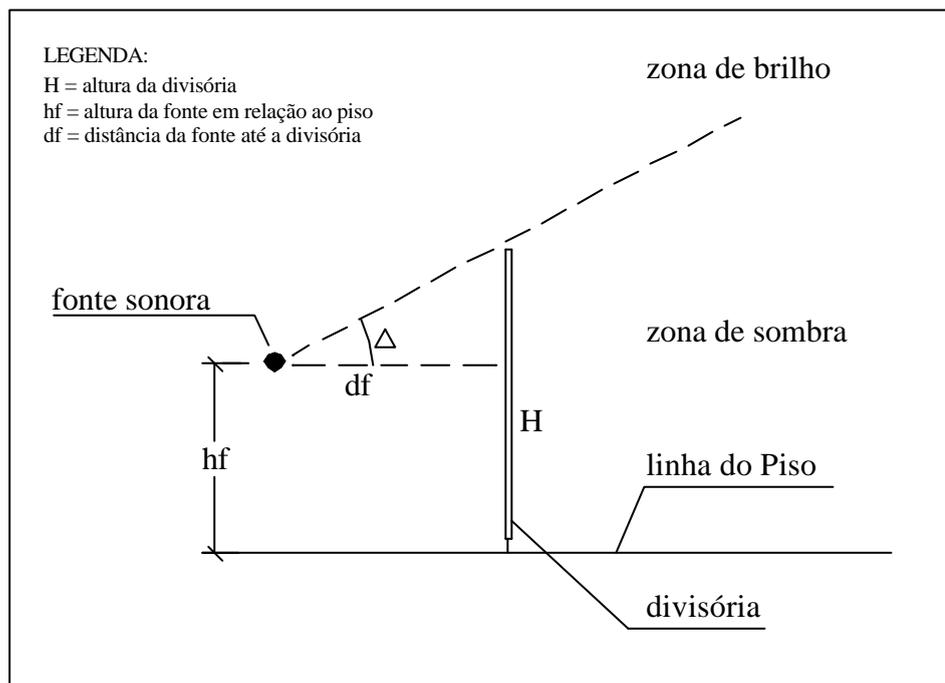


Figura 2.2 - Definição da zona de brilho e zona de sombra [6].

Utilizando a geometria das barreiras, o número de Fresnel,  $N$ , é definido como:

$$N = 2/\lambda (x+y-z)$$

$x + y$  = comprimento do caminho sobre a barreira

$z$  = linha reta que une fonte e receptor

$\lambda$  = comprimento de onda.

A partir do trabalho de Maekawa, até os dias de hoje, vários pesquisadores desenvolveram formulações e rotinas computacionais visando complementar e suprir as deficiências apresentadas por cada novo método. Embora o trabalho de Maekawa seja uma aproximação para barreiras semi-infinitas, seu emprego para o projeto de barreiras reais é amplamente difundido, sendo ignoradas, porém, as interferências ocorridas pela reflexão das ondas sonoras no piso.

### 2.3.2 – Paredes

Em escritórios panorâmicos, a influência das reflexões provenientes das paredes só ocorre em estações de trabalho próximas às mesmas, em função da geometria achatada típica destes ambientes, fazendo que a maior parte das reflexões se formem no piso e no teto. Quando as estações de trabalho estão próximas às paredes, a energia sonora pode ser refletida em torno das bordas das barreiras. Uma maneira simples de se evitar estas reflexões é impedindo a existência de frestas entre paredes e barreiras e entre paredes e janelas, com o uso de painéis adicionais cobrindo as frestas. Alternativamente, como sugerem M. Hodgson e A. C. Warnock [38], deve-se evitar a ocupação destas áreas, reservando estes espaços para corredor de passagem. Paredes externas que são predominantemente de janelas são particularmente problemáticas, sendo difícil prevenir a propagação sonora pela reflexão sobre sua superfície. Este problema não pode ser facilmente solucionado lançando-se mão do uso cortinas, que necessitariam ser de tecido espesso e mantidas fechadas.

M. D. Egan [17] acrescenta algumas sugestões para o tratamento das paredes em escritórios de plano aberto: a) a colocação de painéis absorvedores-sonoros que se estendam de 60 a 183 cm

acima do piso; b) brises verticais absorvedores-sonoros para as janelas; c) paredes com superfícies inclinadas; d) cortinas espessas, que necessitariam serem mantidas fechadas, obstruindo a visão da área externa e iluminação natural (entretanto, a privacidade acústica seria diminuída quando as cortinas estiverem abertas) e e) painéis com faces perfuradas revestidos internamente com material absorvente e painéis de fechamento que complementem os espaços vazios entre divisórias e paredes. É, também, recomendável o uso de alguma irregularidade no perfil das paredes, o que ajudaria a espalhar as reflexões que passam pelos flancos das barreiras.

### 2.3.3 - Forros

Para assegurar que o benefício completo dos demais componentes entre os locais de trabalho seja atingido, selecionar um forro que apresente alta absorção sonora é de fundamental importância. Além de ser a principal área de reflexão dos sons gerados no ambiente, será no espaço entre laje e forro, denominado *plenum*, que será instalado o sistema de mascaramento eletrônico, se houver. O papel principal do sistema de forro em promover a privacidade normal é absorver o som que alcança o plano do teto e evitar que o mesmo reflita de volta ao local de origem e estações de trabalho adjacentes.

Em ambientes de plano aberto, o problema são os ruídos convencionais a um escritório, o que inclui maquinário próprio e, principalmente, a fala humana. Assim, a absorção deve atender especialmente as bandas de frequências importantes na determinação da inteligibilidade da fala (500 Hz a 4000 Hz). O critério de desempenho do forro na absorção destas frequências mais críticas é expresso em termos de porcentagem do som absorvido pelo material utilizado. Para alcançar a privacidade “normal”, segundo recomendação da ASID [2], o critério de absorção recomendado é mostrado na Tabela 2.2.

<b>Freqüências da fala</b>	<b>Coefficiente de absorção</b>
500 Hz	0,65 mínimo
1000 Hz	0,85 mínimo
2000 Hz	0,85 mínimo
4000 Hz	0,85 mínimo

Tabela 2.2 – Coeficientes de absorção recomendados para forros acústicos nas freqüências da fala [2].

Considerando a privacidade da fala, a eficiência da absorção da superfície do forro deveria ser mais alta em ângulos de incidência de 45° a 55° [1] em relação à normal para tetos planos, observando-se que a maior parte das ondas sonoras passam sobre o topo das divisórias dos móveis de trabalhadores sentados neste intervalo angular.

Testes de laboratório e de campo são usados para avaliar a eficiência de isolamento dos diversos tipos de forros acústicos. Os padrões mais comuns de classificação acústica adotados por fabricantes para indicar o nível de controle fornecido por um material são assim determinados:

- NRC - O coeficiente de redução de ruído NRC mede a porcentagem média de ruído absorvida por um material, classificada em quatro freqüências (250 a 2000 Hz). Uma classificação NRC de 0,75-1,00 é a indicada para forro específico de escritórios panorâmicos, de acordo com o fabricante de forros Armstrong. O NRC é o melhor indicador do desempenho de um forro na redução de ruídos de fontes mais distantes [1].
- CAC (*Ceiling Attenuation Class*) - A classe de atenuação CAC classifica a eficiência da estrutura como uma barreira do som, medida em dezesseis freqüências da fala. É uma medida bastante significativa para fornecer a privacidade acústica principalmente entre áreas adjacentes fechadas, onde o som pode penetrar o *plenum* e se dirigir a outros espaços. A CAC é estabelecida por um valor numérico, sendo o valor mínimo de 25 o aceito para escritórios de planos abertos, enquanto que a pontuação mínima de 35 ou 40 é preferida para escritórios fechados [1].

- *AC (Articulation Class)* - A classe de articulação AC classifica o potencial do forro em oferecer privacidade a quem trabalha em escritórios de planos abertos. O índice AC mede a habilidade do forro em absorver ruído em frequências críticas, principalmente conversa de ruído de fundo, que alcança o forro em ângulos que poderiam causar o espalhamento das ondas sonoras sobre os divisores do espaço. A pontuação AC aceita para medir a privacidade normal em escritórios panorâmicos deve ser no mínimo de 170, com 190-210 constituindo o ideal [1].

Para privacidade acústica máxima em ambientes de plano aberto, a maioria dos consultores acústicos recomendam que os índices AC e NRC sejam os mais altos disponíveis. Os valores para AC = 210 e NRC = 0,95 representam uma condição ideal, e os valores AC = 170 e NRC = 0,75 representam uma condição ótima.

Para a avaliação do desempenho do isolamento-fala de combinações divisória-forro pode ser utilizado o valor NIC (*Noise Isolation Class*). Ele é determinado utilizando-se uma divisória padrão de altura parcial e locações-padrão de medições de níveis sonoros entre estações de trabalho. Leituras de níveis sonoros transmitidos de uma fonte padrão de ruído aleatório são tomadas em intervalos de aproximadamente 30 cm ao longo do caminho do lado oposto da divisória. A atenuação é medida em decibels em bandas de terço de oitava, com frequências centrais de 400 a 2000 Hz. Para determinar o NIC, os valores de atenuação medidos são representados graficamente em função da frequência e comparados a um contorno padrão, de acordo com um procedimento que é similar ao método de avaliação STC.

Se os valores NIC não são conhecidos, os materiais de forro também podem ser avaliados por um coeficiente de absorção da fala, SAC (*Speech Absorption Coefficient*), computado a partir de coeficientes de absorção sonora com incidência aleatória, medidos em salas reverberantes, de acordo com as normas da ISO 354. O coeficiente da fala será dado por:

$$SAC = \sum (0,06\alpha_{250} + 0,15\alpha_{500} + 0,24\alpha_{1000} + 0,32\alpha_{2000} + 0,23\alpha_{4000})$$

Sendo leves e porosos, forros absorvedores sonoros são relativamente isoladores pouco eficientes. Entretanto, materiais absorventes sonoros com laminado não poroso em sua parte de trás

podem prover tanto absorção sonora efetiva como isolamento entre salas, pelo aumento da massa e decréscimo da porosidade. Todas as juntas e aberturas onde os painéis são fixados no sistema suspenso devem ser muito bem selados. Irvine e Richards [21] indicam os painéis de lã de vidro como o material mais apropriado, pois possuem uma absorção sonora significativamente alta, com a desvantagem de possuírem baixo desempenho de atenuação de teto. Para melhorar esta característica, os autores concordam que os painéis devam ser cobertos por trás com algum tipo de chapa pesada, que reduz a transmissão do som através dele, devendo-se estar atento para que tal apoio não reduza a absorção sonora. Ainda, ressaltam que pintar materiais acústicos de forro deve ser feito apenas quando é absolutamente necessário. Se a pintura é aplicada incorretamente aos poros do material acústico, a superfície será selada e muito da absorção sonora será perdida. Os aplicadores devem observar atentamente o método que causa menos selamento da superfície.

Tetos tridimensionais (isto é, com seções variáveis, como por exemplo em forma de “V”) também permitem o aumento da absorção total da sala. Tetos rígidos, como placas de gesso (*gypsum*) são inaceitáveis neste tipo de área.

#### **2.3.4 – Piso**

Visando complementar as melhores condições para o alcance da privacidade sonora, o acabamento mais indicado para o piso é um material adequado a: a) atenuação de ruídos de impacto, provenientes da circulação de pessoas, movimento de cadeiras ou o eventual cair de objetos; b) reduzir as superfícies de geração de ruídos e c) ajudar na redução da transmissão sonora para pavimento inferior, se houver. Diversos autores [2,17,21,27] indicam o carpete como sendo este o material, ressaltando sempre que a absorção sonora promovida por esta superfície é menos importante que a absorção gerada pelo teto ou pelo entorno de uma forma geral, uma vez que parte do som incidente é bloqueado pelo mobiliário. A absorção sonora promovida pelo piso carpetado dependerá da espessura e do tipo de fibra do mesmo. Como é um material relativamente fino, ele proporciona muito pouca absorção sonora em baixas frequências, podendo ter melhor absorção sonora em altas frequências.

A aplicação de carpetes diretamente sobre superfícies rígidas não é uma solução tão efetiva, já que os mesmos possuem baixo coeficiente de absorção. Para um melhor aproveitamento do

material, alguns autores [19,21] recomendam que o mesmo não seja selado na sua parte de trás e, sim, usados como revestimento de uma plataforma rígida de absorção sonora. Um trabalho realizado pelo Instituto de Carpetes e Tapetes [1] releva que as propriedades acústicas de um sistema para piso são fortemente influenciadas pela adição de material resiliente entre uma superfície rígida e o carpete, provendo propriedades acústicas superiores.

O coeficiente de redução de ruído NRC é a medida usada para medir a eficiência do material em absorver o som em diversas frequências.

As frestas entre o piso e a barreira devem ser as menores possíveis, evitando-se que o som seja transmitido ao lado oposto pela reflexão no piso. Entretanto, este aspecto não é tão crítico, pois o som transmitido por este caminho tende a ser difundido ou absorvido pelo piso e mobiliário. Há recomendação [27] de que esta altura chegue a no máximo 100 mm, para facilitar a limpeza do piso.

## 2.4 - Fontes Sonoras

Na maioria dos casos, a fonte sonora mais comum neste tipo de ambiente é a fala, podendo ser incluídas outras fontes, como equipamentos próprios de escritórios: computadores, impressoras, telefones e fax. O sistema de ar condicionado e o ruído externo que é transmitido via paredes também devem ser considerados. Um controle das fontes sonoras poderá ser exercido quando for possível, o que é particularmente difícil no que diz respeito às pessoas.

A orientação do ruído proveniente da fala podem ser controlados. Para isto é necessário um estudo da distribuição do mobiliário, de modo a evitar que interlocutores fiquem frente a frente e eliminarem-se caminhos sonoros diretos, sem o uso de divisórias entre estações de trabalho adjacentes. Um trabalho sobre o efeito da orientação da fonte em relação ao ouvinte foi conduzido por Pirn [30]. Ele observou que, assim que o orador se volta afastando-se da direção do ouvinte, o nível da fala recebido começa a diminuir e a razão sinal/ruído também, supondo que não há refletores que poderiam reforçar ou redirecionar o sinal da fala, que é apontada para longe do ouvinte. Pirn apresentou graficamente uma série de espectros de fala com a orientação do orador como parâmetro. A orientação da cabeça,  $\theta$ , é descrita pelo espectro de ruído mais baixo e, a situação onde a face está a  $180^\circ$  do ouvinte é representada pelo espectro de ruído mais alto.

Posteriormente Pirn descreve o efeito da orientação do orador no AI. Exceto na taxa de privacidade (AI abaixo de 0.2), a função é relativamente constante e quase linear. Cada mudança de orientação de 60° resulta em uma mudança de AI de 0,12. O autor concluiu que, uma situação perfeitamente privada, permanecerá razoavelmente privada, mesmo se a orientação do orador sofrer uma mudança máxima (por exemplo, de 0° a 180°). Mas, em uma condição marginal de privacidade ou de comunicação, pode-se tornar rapidamente inaceitável com a reorientação da fonte.

M. D. Egan, 1992, [17] faz sobressair a importância da orientação tanto do orador quanto do ouvinte. Ele mostra uma diferença em torno de 10 dB(A) no nível da fala entre a frente e costas do orador (em torno de 2 dB(A) a cada 30° de rotação em relação a direção central). Conseqüentemente, uma orientação cuidadosa das cadeiras e mesas pode ter um efeito benéfico na privacidade da fala. Além disso, a média do nível dB(A) da fala para homens é de 2 a 5 dB(A) mais alta que para as mulheres. Em relação ao ouvinte, sua orientação afeta a percepção da direção da fonte mas não o nível decibel, ou audibilidade da fonte. Também, a orientação do ouvinte geralmente não é uma consideração de projeto acústico para a privacidade da fala.

### **2.4.1 - Ar Condicionado**

Em qualquer tipo de ambiente onde o conforto é importante, sistemas de climatização artificial são indispensáveis. Em edificações públicas e comerciais, o ar condicionado é, hoje em dia, o sistema mais empregado para a climatização. Consiste em controlar simultaneamente a temperatura, a umidade, a pureza e a distribuição do ar para atender as necessidades ambientais, significando que o ar ficará compatível com o que se deseja, independentemente das condições externas. Os sistemas normalmente utilizados são: ar condicionado de janelas, mini-centrais, mini-centrais do tipo multisplit, self-contained, chiller e fan coil. Dependendo do tipo, estes sistemas podem ser utilizados tanto para aquecer e resfriar (ciclo reverso) ou apenas para resfriar.

Na maioria das vezes, estes sistemas são incômodas fontes de ruído. O controle do ruído será melhor alcançado pela seleção de componentes menos ruidosos e por uma instalação adequada. Há potenciais fontes de ruído nos sistemas de distribuição de ar: ventiladores, formato dos dutos, velocidade do ar, turbulências no fluxo do ar, abafadores ou difusores, motores e compressores. A

cada um destes componentes pode ser atribuído parte do ruído do sistema, cada um tendo características especiais.

Como os ventiladores devem mover o ar, eles criam turbulência e, conseqüentemente, ruído. O ruído do ventilador é normalmente avaliado em níveis de potência sonora, em bandas de oitava, com freqüências centrais de 63 a 4000 Hz. Para grandes ventiladores, o ruído de baixa freqüência é normalmente o mais problemático e o mais difícil de atenuar. Em baixo desempenho, os níveis de ruído podem ser significativamente mais altos. A entrada e saída do fluxo de ar deve ser a mais suave possível, para minimizar a geração de turbulência. Condições que produzem turbulência do fluxo de ar normalmente resultam na geração de ruído maior e aumento da pressão estática no sistema.

Os dutos de ar devem ser projetados para alcançar e manter o escoamento de ar laminar através deles, o que significa um perfil de velocidade uniforme em qualquer ponto ao longo do fluxo. Os sistemas de dutos podem ser classificados como sistemas de baixa ou alta velocidade. Em um sistema de baixa velocidade, o ruído é atenuado por dutos forrados e não forrados, por joelhos com ângulos adequados, pela divisão da pressão sonora entre o duto principal e suas derivações, em caixas de mistura, através de perdas de reflexão final. O excesso de velocidade do ar é freqüentemente uma causa do ruído em dutos. Considerável espaço é necessário em grandes edifícios para o uso de dutos que entregam ar em alta velocidade. Estes dutos requerem uma pequena seção em cruz para entregar a mesma quantidade de ar. Sistemas de alta velocidade não deveriam ser usados onde baixos níveis sonoros são requeridos.

A geometria de dutos que criam turbulência de ar também são fontes de ruído e reduzem a eficiência do sistema, acrescentando perda de pressão estática. A descarga de ar de um ventilador centrífugo não possui um perfil de velocidade uniforme, portanto, a descarga dentro de um *plenum* revestido com material absorvente é uma boa maneira de se evitar a geração de ruído e alcançar uma redução significativa, particularmente em baixas freqüências.

Dispositivos terminais como grelhas, caixas de insuflamento com ventiladores, aletas e difusores que estão localizados muito próximos ou dentro de espaços ocupados são especialmente importantes já que podem gerar ruído. Algum ruído de fundo em um escritório pode prover mascaramento e melhorar a privacidade acústica, mas o ruído deve ter um espectro sem uma freqüência preponderante e não pode ser tão alto que se torne incômodo. O fato é que o ruído mecânico não é confiável para produzir um sinal de mascaramento satisfatório, porque varia com o

tempo e é de difícil de predição. Velocidades excessivas de ar através de difusores são uma fonte comum de ruído e podem ser reguladas, na tentativa de se reduzir a velocidade de volume com aletas localizadas diretamente atrás do difusor. Aletas deveriam ser colocadas bem antes do difusor, assim o ruído que ele produz pode ser atenuado antes de alcançar a sala.

### **2.4.2 - Fala**

Na fala, uma pessoa gera ondas de som complexas, variáveis continuamente. O som da fala varia largamente tanto em nível de pressão sonora global, como em conteúdo de frequência em função do tempo. Fisicamente, a fala consiste de uma série de pulsos de energia sonora de várias amplitudes, durações e espaços de tempo entre os pulsos. Os picos tendem a exceder a média, em torno de 12 dB, e o nível mínimo em torno de 30 dB [32]. Há grandes variações de articulação entre os indivíduos, assim como o alcance da fala.

Uma das conseqüências mais sérias do ruído é que este dificulta a compreensão do que outra pessoa está nos falando diretamente ou ao telefone, por exemplo. A compreensão das palavras é definida como inteligibilidade e a identificação do orador ou de suas emoções a partir do som de sua voz não está incluída neste termo. Para ser inteligível na presença de ruído, a fala deve ser mais alta que o ruído que chega ao ouvido do ouvinte e isto deve incluir palavras e linguagem familiar ao orador. A inteligibilidade da fala depende da presença ou não de ruído de fundo e de seu nível, do nível de voz do orador, da distância do orador ao ouvinte, da familiaridade do ouvinte com as palavras usadas, da redundância da fala para ser compreendida, do contexto na qual é falada, da nitidez da fala, da maneira como o orador altera os hábitos de falar na presença de ruído e da reverberação do ambiente. Mesmo o estado emocional ou grau de stress do orador causam mudanças no comportamento vocal e, conseqüentemente, mudanças na inteligibilidade da fala.

Em média, um orador produz um espectro de pressão sonora próximo ao da Figura 2.3.

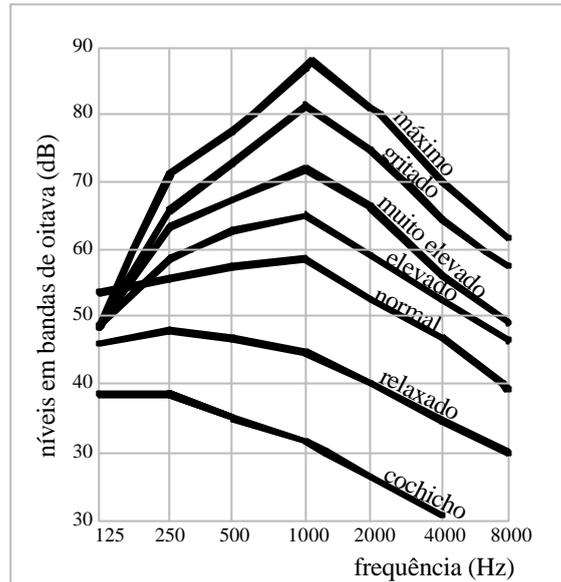


Figura 2.3 – Espectros típicos de um orador homem para diferentes esforços vocais [19].

Estas são curvas comuns para um homem típico, mostrando o nível de pressão sonora em bandas de oitava para várias condições de fala [19]. Há alguns desvios a partir destes dados em consequência de diferenças individuais, havendo também uma curva diferente para as mulheres. Os termos descritivos que identificam estes esforços vocais não são precisos. Por exemplo, o que é fala “normal” sob determinadas condições, pode ser alta ou baixa em outra situação. As diferenças individuais são grandes e o tempo de reverberação, o nível do ruído de fundo e muitos outros fatores influenciam este nível normal.

Apesar destas diferenças, segundo Harris [19], podemos considerar que níveis sonoros em dB(A) a uma distância de 1m do orador estão usualmente entre 50 e 65 dB(A) para a maioria dos oradores, sob a maioria das condições, quando instruídos a falarem em tom de voz “normal”. A média do nível sonoro em dB(A), com o orador em condição calma, é de 57 dB(A) a uma distância de 1 m do mesmo. Os níveis sonoros em dB(A) variam de 40 dB(A) (para cochicho) a 88 dB(A) (para o esforço vocal máximo). Para propósitos práticos, o alcance é considerado de 50 a 75 dB(A). Os valores médios para vários esforços vocais, sob condições calmas e medidos a 1 m de distância, são dados na Tabela 2.3.

<b>Esforço Vocal</b>	<b>Nível Sonoro - dB(A)</b>
Máximo	88
Gritado	82
Muito alto	74
Elevado	65
Normal	57
Relaxado	50
Muito baixo	40

Tabela 2.3 - Níveis sonoros em dB(A) para diferentes esforços vocais [19].

Ainda, de acordo com o mesmo autor [19], em situações de trabalho ruidosas, as pessoas não deveriam esperar conversar a distâncias maiores que 1 m. É recomendável que o nível sonoro em dB(A), em locais de trabalho onde a comunicação é essencial, não exceda 62 dB(A); este nível permite comunicação satisfatória a uma distância de 2 m.

## 2.5 - Ruído de Mascaramento

Até mesmo se todos os requisitos arquitetônicos em uma área de plano aberto forem atendidos, ainda assim a atenuação sonora poderá ser limitada e a privacidade acústica não ser alcançada se o ruído de fundo for muito baixo. É consenso geral [10,19,24,30] que o ruído de fundo é um dos mais importantes componentes da privacidade da fala. Tratamentos com divisórias, forros altamente eficientes e painéis nas paredes têm, por consequência, a redução global do ruído de fundo e a redução na propagação sonora entre as estações de trabalho, mas serão insuficientes em alcançar um grau ótimo de privacidade acústica.

A privacidade poderá ser melhorada de forma mais efetiva tornando-se o nível do ruído de fundo mais alto para encobrir a conversa de intrusão. Suficiente ruído de fundo deverá ser colocado para mascarar os sons da fala transmitidos entre as estações de trabalho. O nível do ruído de fundo é de extrema importância pois, se reduzido em excesso, os ruídos oriundos de estações de trabalho mais distantes são escutados e podem perturbar. Além disso, a uniformidade da ambientação

acústica promovida pelo ruído das atividades deveria ser constante no tempo e espaço para complementar o nível do ruído de fundo. Por outro lado, caso seja muito intenso, tornar-se-á incômodo. O objetivo é então, promover um equilíbrio entre a comunicação e a privacidade. É de grande aceitabilidade que um ruído intermitente é mais incômodo que um ruído constante, muitas vezes com nível sonoro mais intenso, ao qual é mais fácil se acostumar após algum período.

Um som com espectro, nível de intensidade e distribuição adequados irá sobrepor a fala de estações de trabalho adjacentes, com diminuição da inteligibilidade a partir de determinada distância e permitindo a conversação em distâncias inferiores a este limite, resultando em áreas de comunicação e de privacidade. Será necessário, então, um tipo especial de sistema sonoro que promova o mascaramento, usado para gerar um ruído de fundo moderado e constante, em espaços que, de outra forma, seriam tão quietos que qualquer som discreto poderia distrair ou incomodar. Torna-se interessante, então, a introdução de um certo ruído de fundo controlável e sem conteúdo significativo, obtendo-se uniformidade e níveis sonoros desejados. Porém, este sistema só funcionará se houver uma integração entre este sistema e os tratamentos acústicos necessários, caso contrário, o uso do sistema sonoro de mascaramento apenas contribuirá para o aumento do nível do ruído de fundo.

De acordo Irvine e Richards [21], as características de um ruído de fundo ideal são bastante restritivas. O ruído deve ser de banda larga como um ruído aleatório, mas com energia reduzida nas altas frequências para evitar que este ruído soe como “chiado”. Se o ruído não é alto o suficiente, não consegue mascarar o som intruso. É necessário lembrar que o ruído branco e o ruído rosa não se adequam ao mascaramento [8] embora tenham espectro distribuído de forma constante, pois são obstrutivos. É interessante notar que escritórios maiores tendem a ser mais confortáveis acusticamente, devido ao fato da atividade de diversas pessoas criarem um ruído de fundo estável, o que não ocorre em escritórios com baixa densidade de ocupação.

Sistemas eletrônicos de mascaramento frequentemente são usados como um recurso para controlar o nível do ruído de fundo. Estes sistemas são compostos basicamente de um gerador de ruídos eletrônico pseudo-randômico e de um sistema de alto-falantes. Na maior parte de vezes, as unidades do sistema de mascaramento, como filtros, pré-amplificadores, amplificadores e o próprio gerador de ruído estão localizados em um sala própria para o equipamento de som, enquanto os alto-falantes ficam suspensos sobre o forro acústico, no espaço denominado *plenum*. A quantidade de equalização necessária será em função de muitos parâmetros, incluindo a quantidade de atenuação

através do material do forro, das dimensões e acabamento de todo o espaço sobre o forro acústico suspenso, orientação e locação dos alto-falantes, e da configuração do espaço do escritório de plano aberto. A localização e orientação dos alto-falantes são críticas em todos os aspectos de funcionamento, incluindo o espectro do nível sonoro, uniformidade e incoerência. Cada alto-falante é suspenso por uma corrente fixa na laje. O som refletido pela laje, ao atravessar o forro acústico, terá sua uniformidade acentuada de acordo com o tipo de forro empregado. O propósito é distribuir um ruído moderado, ajustado e controlável com espectro de frequência e nível sonoro precisos, gerando um som discreto, menos intrusivo. Diversos pesquisadores [4,21,24] concordam que é de extrema importância que o nível de ruído não sofra variações ao longo de toda a área. Uma pessoa andando pelo local irá prestar atenção ao ruído se houver mudanças perceptíveis do mesmo e esta não é uma condição desejável. O resultado é que os níveis sonoros de intrusão transmitidos entre os locais de trabalho serão menos percebidos. O sistema de mascaramento é um método muito efetivo, não devendo ser usado para comunicação interna ou ter música como ruído de fundo, porque isto chamaria a atenção para a localização dos alto-falantes, que devem permanecer anônimos. Um outro problema em relação a distribuição do ruído de fundo, destacam Irvine e Richards [21], ocorre nos limites da área dos escritórios panorâmicos. Uma transição gradual é requerida para evitar que o sistema eletrônico de mascaramento chame a atenção das pessoas que estejam entrando ou deixando a área.

Sistemas mecânicos de tratamento de ar suprem o escritório com algum som ambiente, mas esse som não é uniformemente distribuído e não tem energia sonora suficiente, na frequência da fala, para mascarar sinais de intrusão na mesma. Isto é válido mesmo considerando os mais silenciosos sistemas mecânicos, que não operam continuamente. Considerações também especiais de projeto deverão ser aplicadas onde não há forros suspensos para esconder o sistema de alto-falantes ou onde o espaço acima do forro é utilizado como retorno de ar. Neste último caso, uma preocupação em particular é evitar zonas mais marcantes, resultante do ruído de mascaramento advindo das grelhas de retorno do ar no forro. A solução é construir um anteparo vertical que atenua o ruído vindo advindo da grelha, sem impedir o fluxo de ar.

Um sistema corretamente ajustado não deve ser reconhecível ou parecer como uma fonte artificial sonora.

Em grandes espaços ou edifícios que possuem várias salas onde é necessário o ruído de mascaramento, o sistema utilizará um equipamento central de geração de ruído, equalizadores para

ajustar o espectro e amplificadores para distribuir o sinal para os alto-falantes. Este sistema deverá ser dividido em partes para facilitar os ajustes do nível sonoro em ambientes diferentes.

Há diferentes filosofias de projeto considerando um sistema de mascaramento. Alguns projetistas [21] defendem a utilização de vários geradores de ruído alimentando alto-falantes alternados em uma dada área. A alegação é que isto torna mais difícil de dizer a origem do ruído e, se há uma falha de um componente em um certo canal de ruído, a área não estará totalmente desprovida do ruído de mascaramento. O efeito pode ser mais perceptível se o mascaramento, de repente, for interrompido. Outros projetistas defendem a variação automática no nível do ruído de mascaramento com o tempo, durante o dia ou nível de atividade na área. O perigo aqui é que qualquer mudança nas características do sistema pode chamar a atenção para o sistema em si, enquanto que o objetivo é ter um sistema que desapareça no ambiente acústico da área a ser servida. Níveis variados de sistema de mascaramento não são recomendáveis.

Lewitz [24] acrescenta que um dos aspectos mais críticos para um sistema sonoro de mascaramento está na habilidade de se obter o mesmo instalado e completamente ajustado antes que os usuários ocupem o edifício. Isto permite fixar o ambiente acústico e, assim que os ocupantes chegarem, aceitarão o nível sonoro como normal.

É muito importante que o espectro de ruído produzido pelo sistema de mascaramento tenha as características especificadas e seja livre de quaisquer características que o torne reconhecível. Lewitz [24] acentua que as características importantes do sistema de mascaramento eletrônico incluem faixa de frequência (devendo ter adequado conteúdo de baixa frequência), nível sonoro, uniformidade da distribuição sonora e capacidade de agradar ao usuário do espaço.

O nível sonoro produzido pelo sistema de mascaramento é muito crítico. Se ele for muito baixo, o sistema será inefetivo e se for muito alto, o sistema será notado. Os limites superiores recomendados de ruído de fundo, em dB(A), para vários tipos de espaços são apresentados em tabelas. Para diversos autores [4,17,19], em escritórios panorâmicos o nível sonoro adequado para o sistema de mascaramento está entre 45-50 dB(A), e as variações espaciais e temporais menores que 3 dB(A). Para Irvine e Richards [21], um espectro aproximado de um ruído adequado segue o contorno da curva RC 40, apenas com valores menores acima de 2000 Hz. É importante que o sistema eletrônico consiga responder a partir de 100 Hz. Este espectro terá um nível sonoro de aproximadamente 47 dB(A). De um modo geral [21], para a maioria de tipos de ambientes domiciliares e de trabalho, o limite superior para o nível de ruído de fundo está em 50 dB(A). De

acordo com a tabela que define os esforços vocais, este nível permite uma compreensão de uma conversa a uma distância de 4 m do orador, falando em tom de voz normal.

Um dos métodos mais comuns para avaliar o ruído de fundo de um ambiente é o Critério de Ruído conhecido através das curvas NC (*Noise Criteria Curves*) (ver apêndice IV). É comum as curvas NC estarem associadas a um único valor em dB(A), o que permite apenas uma noção do ruído adequado ao espaço. Vale lembrar que espectros diferentes podem ter a mesma leitura em dB(A), significando que podem estar classificados pela mesma curva NC. O ideal é avaliar o ruído pela faixa de frequência. Em concordância com a norma NBR-10152 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), o nível de conforto acústico para escritórios está entre 30 e 65 dB(A), ou entre as curvas NC25 e NC60, dependendo da utilização da sala, não fazendo nenhuma referência ao caso específico de um escritório panorâmico.

Durante a última década, pesquisadores se propuseram a estabelecer um critério aceitável para o projeto de ambientes fechados. Isto levou ao estabelecimento de vários critérios de avaliação de ruído. Beranek [36] fez um questionário baseado em um estudo de campo e definiu as curvas de critério de ruído NC Keighly [36] sugeriu o uso do índice de pico transiente, para levar em consideração a natureza intermitente do ruído produzido por máquinas de escritório. Existem ainda outras curvas diferentes tais como, as curvas de avaliação de ruído NR (*Noise Rating Curves*), curvas de critério para salas RC (*Room Criterion Curves*) e as curvas de critério balanceado NCB (*Balanced Noise Criterion Curves*) (ver apêndice IV). Entretanto, as curvas NC e o nível equivalente de pressão sonora,  $L_{eq}$ , permanecem como os índices mais comumente adotados para projetos e avaliação acústica de ambientes fechados. Apesar dos esforços, não há ainda um consenso internacional quanto ao critério mais adequado. É preciso lembrar que estes critérios foram criados há algum tempo e que as expectativas dos trabalhadores de escritórios e o tipo de ambiente acústico nestes espaços mudaram muito nos últimos anos. Em recentes estudos, S. K. Tang, J. Burnett e C. M. Poon [36] realizaram nova pesquisa com o objetivo de coletar respostas subjetivas sobre o ambiente acústico em um edifício de escritórios. O questionário baseava-se em perguntas onde o usuário deveria avaliar o local definido-o como muito quieto, muito ruidoso ou aceitável, avaliar quais as fontes de ruído e dizer se sentiam algum tipo de vibração mecânica. Dos 30 locais avaliados, 35% das respostas apontaram o ar condicionado como a maior fonte de ruído. Os resultados da pesquisa também sugeriram que se o ruído é classificado como "chiado" ou "rumble", não há ligação direta com as curvas NC, NR e  $L_{eq}$ , sendo que as curvas NC e  $L_{eq}$  foram

consideradas melhores índices na predição subjetiva de conforto auditivo. O trabalho também conclui que os trabalhadores entrevistados estavam satisfeitos com um ambiente com um  $L_{eq} \cong 53$  dB(A), o que corresponde a uma curva NC 48. No entanto, ambos os valores excederam as normas internacionais.

Em um trabalho conduzido por Pirm [30], o ruído de fundo de um escritório de plano aberto foi considerado de valor inestimável. Porém, para mascarar a fala indesejada, não se deve confiar em ruído de atividade artificial por causa da relativa imprevisibilidade, sugerindo que os ruídos gerados eletronicamente são a mais confiável das soluções. O autor observou, também, que o índice de articulação AI é influenciado pelo nível de ruído ambiental exatamente como no caso do esforço vocal. À medida que o nível de ruído ambiental aumenta, o índice de articulação decresce. A relação é tal que, uma mudança de 6 dB no nível do ruído ambiental geralmente resulta uma mudança de 0,2 e, através da Figura 2.4 nota-se que o efeito próximo às extremidades da taxa do AI é menos pronunciada.

A experiência da equipe de Bolt Beranek and Newman Inc. (1971) [3], sugere que o espectro contido na área sombreada da Figura 2.5 promove a qualidade de som de mascaramento desejada, exceto para frequências abaixo de 250 Hz. Ruído de fundo abaixo de 250 Hz normalmente é proporcionado pelo sistema de tratamento de ar. A forma do espectro é similar ao espectro da fala, o que tende a tornar o ruído de fundo menos perceptível.

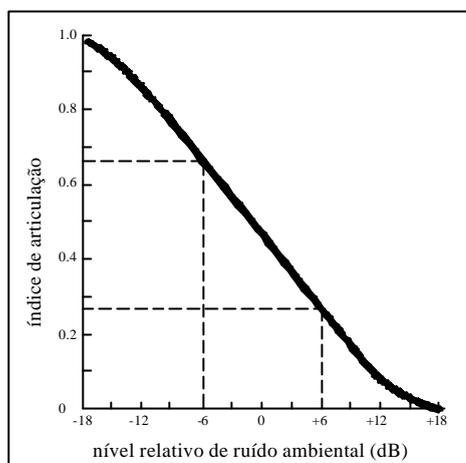


Figura 2.4 – AI em função do ruído de fundo [30].

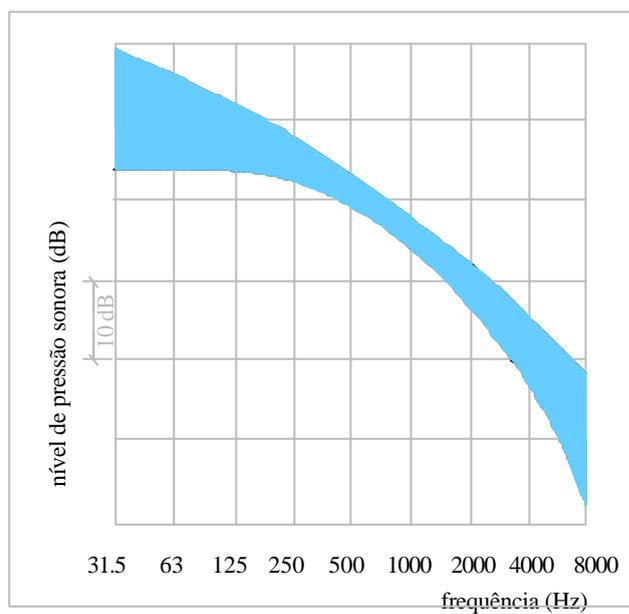


Figura 2.5 – Espectro sugerido para mascaramento da fala [3].

## Capítulo 3

### **SIMULAÇÃO NUMÉRICA PELO O MÉTODO DE ACÚSTICA DE RAIOS**

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão sobre rotinas computacionais utilizadas em acústica de salas. São discutidas as principais características da acústica geométrica e das técnicas de solução de diferentes métodos numéricos que nela se baseiam. Objetiva-se descrever os princípios básicos de programas computacionais que são utilizados nas etapas de simulação. A cada técnica, uma descrição sucinta é apresentada.

#### **3.1 – Princípios da Acústica Geométrica**

A acústica geométrica assume que ondas sonoras comportam-se como raios sonoros, exatamente como ondas de luz na óptica geométrica comportam-se como raios de luz, não considerando fenômenos como a refração ou desvio de raios que se propagam em meios não homogêneos. A reflexão é o fenômeno mais importante para esta teoria. Raios acústicos são refletidos por superfícies sólidas e perdem parte de sua energia a cada encontro com um obstáculo. Esta aproximação é somente válida em médias e altas frequências, devido ao fato do comportamento ondulatório ser parcialmente negligenciado. Para se chegar a esta simplificação, considera-se que o comprimento de onda é infinitamente pequeno, comparado às dimensões da sala. Em geral, esta condição é verificada na prática, mas deve-se ficar atento ao fato que, em baixas frequências, esta condição pode não ser satisfatória. Assim, como a difração, interferências devido a diferenças de fase não são levadas em conta se dois campos acústicos se sobrepõem, sendo suas energias simplesmente somadas, não existindo a possibilidade de haver cancelamento. Uma condição de coerência entre os sinais envolvidos deve ser satisfeita (os diferentes componentes envolvidos devem ser incoerentes).

Existem duas abordagens dominantes na acústica geométrica, a saber:

### 3.1.1 - Método de Imagem (MISM)

O método de imagem, também conhecido por MISM (*Mirror Image Source Method*) é uma técnica computacional que pode ser usada para simular diversos problemas reais. O método de imagem utiliza fontes virtuais espelhadas com o objetivo de traçar os caminhos de reflexão do receptor para a fonte sonora.

Isto pode ser ilustrado com uma simples figura bidimensional de uma caixa retangular contendo uma fonte esférica no ponto S e um receptor no ponto R. Primeiramente são construídas imagens de primeira ordem do ponto S com as respectivas paredes, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>. Calculando-se os pontos de interseção das linhas S<sub>i</sub>R com as paredes correspondentes, pode-se projetar facilmente os caminhos de reflexão de 1<sup>a</sup> ordem, como mostrado na Figura 3.1.

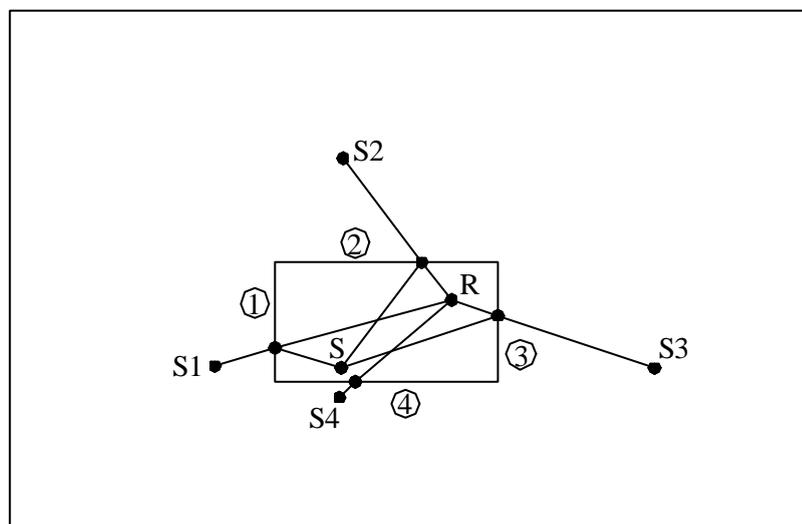


Figura 3.1 – Caminhos de reflexão de 1<sup>a</sup> ordem em uma caixa retangular [012].

Do mesmo modo as fontes secundárias são processadas, eliminando-se a parede na qual a fonte secundária é espelhada. Este processo tem que ser continuado até que a ordem de imagens desejada seja atingida. Quando aplicado a uma caixa retangular, resulta em imagens espelhadas regulares da qual cada elemento é visível de cada posição dentro da sala.

Em salas irregulares, entretanto, testes de visibilidade têm que ser feitos. Um simples exemplo exposto na Figura 3.2 mostra que o receptor R1 pode ser alcançado pela reflexão de 1ª ordem contra a parede 1, enquanto que o receptor R2 não pode. Em outras palavras, R1 é “visível” a partir de S1 e R2 não é “visível”. Isto significa que para todos os pontos de interseção calculados, deve ser checado se os eles estão situados dentro do contorno real do espaço simulado.

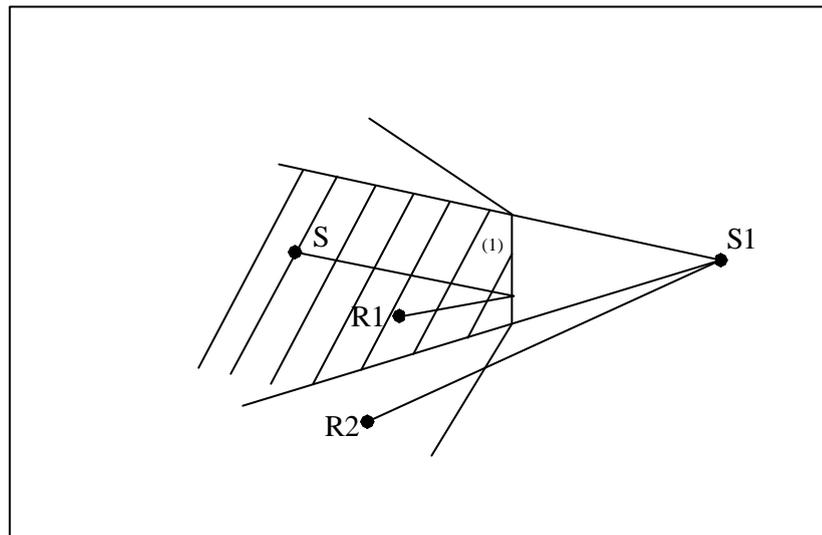


Figura 3.2 – Teste de Visibilidade[012].

Em consequência dos testes de visibilidade, o método de imagem necessita de grande esforço computacional, especialmente quando um grande número de superfícies é envolvida e/ou quando a absorção é pequena, aumentando assim o número de imagens da fonte que deve ser levada em consideração. Este método apresenta como vantagem principal a boa resolução temporal obtida, fato importante, principalmente quando se pretende realizar a convolução da resposta impulsiva com um sinal gravado em processos de auralização. Em compensação, o tempo de computação necessário para calcular respostas impulsivas cresce exponencialmente com o comprimento desta. Outra desvantagem é que este algoritmo não leva em conta os efeitos de difusão das reflexões, ou espalhamento devido às formas irregulares das superfícies refletoras.

### 3.1.2 - Método de Raios (RTM)

O método de raios, conhecido por RTM (*Ray Tracing Method*) é também um conhecido algoritmo computacional. Neste método, assume-se que a energia sonora emitida pela fonte sonora é distribuída em um número finito de raios sonoros. Para fontes onidirecionais, cada raio tem uma energia inicial igual à energia total da fonte dividida pelo número de raios. Cada raio desloca-se na velocidade do som e colide com as superfícies da sala de onde são refletidos de acordo com a lei da reflexão especular. O nível de energia de cada raio diminui a cada reflexão de acordo com a absorção de cada superfície, e também decresce devido à absorção do ar, enquanto o raio se desloca entre as reflexões. Quando o nível de energia cai abaixo do limiar definido pelo usuário, o raio é abandonado e o próximo é traçado.

Para calcular a energia sonora em diferentes pontos de uma sala, células receptoras com volumes finitos são definidas. Cada raio é averiguado para ver se ele atravessa o volume receptor. O número de raios atravessando um volume receptor e a contribuição de energia deste raios dão a medida do nível de pressão sonora.

Quando quer-se conhecer o comportamento temporal em determinado ponto da sala, o procedimento é então modificado. As contribuições de energia de vários raios para uma certa célula receptora são somadas dentro de intervalos de tempo prescritos, resultando em um histograma. Entretanto, o efeito da média temporal e o caráter fortemente aleatório da chegada dos raios, faz com que o histograma calculado seja apenas uma aproximação do comportamento temporal real da sala. A solução é refinar os intervalos e aumentar o número de raios.

O algoritmo de acústica de raios, apesar de não oferecer um resultado com uma boa resolução temporal, pode levar em conta as reflexões difusas e ainda permitir um tempo computacional proporcional ao comprimento da resposta impulsiva.

### 3.2 – Outros Métodos

Com o objetivo de unir as vantagens dos algoritmos mais tradicionais, algoritmos alternativos começaram a ser propostos.

#### 3.2.1 - Método do Feixe Cônico

O método cônico (CBM- *Conical Beam Method*) emite um grande número de cones com seus vértices na fonte. A propagação dos cones através da sala é tratada pela aplicação do algoritmo de raios nos eixos dos cones, como, mostra a Figura 3.3. Receptores são pontos, não volumes como no método RTM. Quando um ponto receptor cai dentro de um cone truncado, entre duas reflexões sucessivas, uma fonte espelhada visível foi encontrada. Esta contribuição é facilmente calculada usando a divergência esférica dentro do cone.

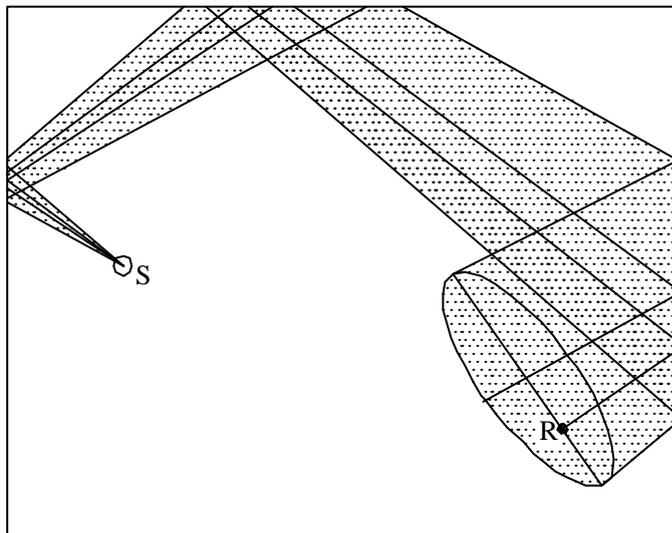


Figura 3.3 – Propagação do Cone através dos contornos físicos [012].

### 3.2.2 - Método Triangular (TBM)

O método triangular (TBM – *Triangular Beam Method*) é muito similar ao método cônico, mas no lugar de emitir cones, pirâmides de base triangulares são usadas para discretizar as ondas esféricas, como mostra a Figura 3.4.

Este método apresenta resultados mais precisos que o método cônico, mas sua taxa de convergência é um pouco menor. É recomendado para aplicações em áreas externas, onde o número de reflexões é menor.

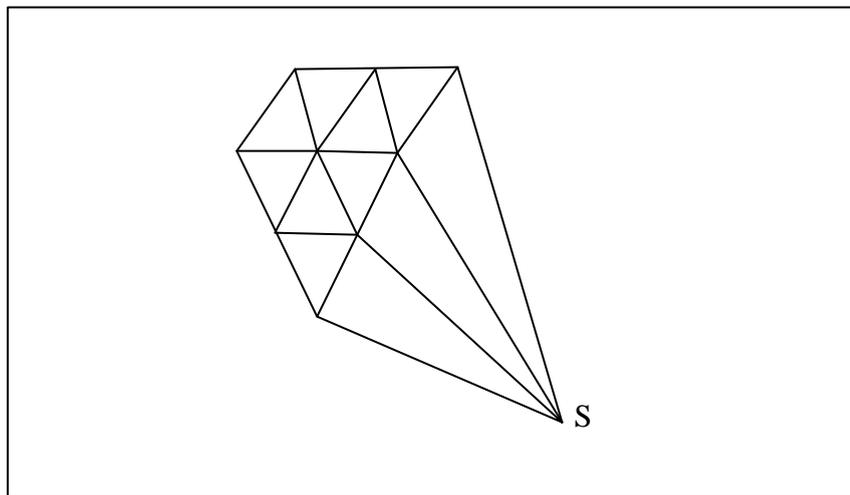


Figura 3.4 – Método Triangular [012].

### 3.3 – Programas Computacionais Utilizados

Nos capítulos posteriores são apresentadas simulações para as quais foram utilizadas os programas Ansys® (para modelamento do espaço físico a ser analisado) e Raynoise®.

O Raynoise® não possui gerador de malhas próprio, sendo necessário que a malha de elementos seja gerada externamente. Para tanto, possui interface com diversos programas comerciais. Após a importação da malha de elementos, foram definidas as características dos materiais e aplicadas as

diferentes condições de contorno. Finalmente, concluído o processamento de dados, segue-se a análise dos resultados.

Uma breve descrição dos programas é apresentada a seguir.

### 3.3.1 - ANSYSÒ

O ANSYS é um programa, comercialmente disponível, para análise por elementos finitos de uso geral, permitindo a abordagem de problemas em diversos campos da engenharia como, por exemplo, problemas na área industrial, térmica, elétrica e etc.

O programa é dividido em pré- processador, processador (*solver*) e pós-processador.

O pré-processador possui amplos recursos para a construção do modelo da estrutura a ser analisada, permitindo a modelagem de geometrias complexas e geração automática da malha de elementos. Depois da construção do modelo, pode-se entrar na fase de solução, onde deve-se escolher o tipo de análise a ser realizada, além das aplicações das condições de contorno.

Após a obtenção da solução, o programa permite a visualização e pós-processamento dos resultados, com geração de curvas, mapas de respostas (cores ou contornos) e animação gráfica.

### 3.3.2 - RAYNOISEÒ

O programa utilizado para realizar as simulações deste trabalho foi o Raynoise®, desenvolvido pela LMS Numerical Technologies – Bélgica. O Raynoise® é um programa próprio para simular o comportamento acústico de geometrias fechadas, abertas, semi-abertas, utilizando métodos acústicos geométricos.

O Raynoise® modela precisamente a propagação acústica, incluindo reflexões especulares e difusas em contornos físicos, a absorção de paredes e do ar, a difração em torno de divisórias e transmissão através de paredes. Padrões de diretividade da fonte sonora podem ser colocados como dados de entrada de modo detalhado. As fontes podem, também, ser coerentes ou incoerentes, ou seja, que tenham informações de fase entre si.

O núcleo do modelo é uma combinação híbrida de algoritmos do método de imagem de fonte espelhada (MISM) e o método de raios (RTM). O programa inicia com um modelo geométrico feito em um programa externo (por exemplo, programas de CAD como o Autocad® ou programas CAE como o programa MSC/Patran ou Ansys®). Propriedades de materiais são atribuídas aos elementos e o número de fontes e receptores, faixa de frequência são definidos pelo usuário. O critério de abandono dos raios também é definido pelo próprio usuário, que define o número de reflexões (R) a ser utilizado, assim como o número de raios (N), que quanto maior, menor a chance de ocorrerem fenômenos como o estreitamento de cones. O tempo de computação necessário cresce com o aumento de R ou N e, desta forma, deve-se chegar a uma relação de compromisso na escolha destes dois parâmetros. Uma forma de determinar estes parâmetros é realizar testes de convergência. Podem ser definidos também a temperatura e a umidade relativa do ar.

Parâmetros de análise podem também serem controlados pelo usuário, incluindo a escolha das opções de análise, nível de detalhes dos dados de armazenagem e o refinamento do cálculo como, por exemplo, adição de difusão.

Os resultados incluem tempo de reverberação, volume fechado e caminho livre médio entre reflexões. Mapas coloridos capacitam a visualização de quantidades acústicas como nível de pressão sonora (NPS), nível de pressão sonora ponderado (ponderação A), índice de transmissão da fala (STI), e muitos outros.

Detalhados ecogramas e histogramas nos pontos receptores pré-determinados capacitam um exame cuidadoso do som, no domínio do tempo e da frequência. Há ainda a possibilidade de, através da resposta impulsiva calculada, escutar a resposta à sua excitação em um ponto da sala. Isto permite a auralização do ruído e avaliação subjetiva para um completo estudo acústico.

### **3.4 – Sumário**

Neste capítulo foi feita uma revisão sobre os princípios da acústica geométrica e técnicas de solução de diferentes rotinas computacionais.

Uma descrição dos programas computacionais utilizados para as simulações apresentadas nos capítulos anteriores, foi exposta.

## Capítulo 4

### TESTES PRELIMINARES DE VALIDAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo são apresentados os ensaios experimentais realizados e descritos os detalhes de sua execução, compreendendo os equipamentos usados, detalhes da sala, configurações empregadas e resultados medidos.

Em seguida, são explanadas as simulações preliminares implementadas. São discorridas explicações sobre os parâmetros de entrada, teorias e critério de convergência adotado para posterior comparação e validação dos resultados.

Finalmente, os resultados obtidos são comentados.

#### 4.1 - Ensaios Experimentais

Os estudos experimentais são considerados de extrema importância, tanto no desenvolvimento de teorias de predição, quanto na validação e ajuste dos modelos numéricos utilizados. Assim sendo, antes de dar início às simulações correspondentes à meta deste trabalho, ensaios experimentais serviram de base para simulações preliminares implementadas com o objetivo de testar a validade do método empregado para o problema em questão.

As simulações consistiram em determinar numericamente os níveis de pressão sonora em alguns pontos do campo acústico de uma sala de aula em diferentes situações, com o propósito de serem observados o campo direto e o decaimento com a distância. A intenção foi investigar o uso das ferramentas envolvidas no processo, não sendo avaliada a qualidade acústica da sala escolhida.

A sala de aula selecionada está localizada no Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Sua geometria aproxima-se de uma sala de planta “quadrada”, com dimensões principais de 7,04 x 7,18 x 3,26 m, piso cimentado liso pintado, paredes em tijolos a vista com juntas de aproximadamente 1,5 cm e teto em concreto áspero pintado.

Uma janela grande, de dimensões 7,04 x 1,53 m, com estrutura em metalon pintado e uma porta de madeira pintada, de dimensões 0,80 x 2,10 m, caracterizam as esquadrias do ambiente.

O sistema de medição (exceto fonte sonora e microfones) foi montado fora da sala de aula para evitar-se interferências no campo sonoro. Os equipamentos utilizados nos ensaios preliminares estão listados a seguir e sua montagem é apresentada esquematizada na Figura 4.1.

- 02 microfones ICP Brüel & Kjaer 4189;
- 01 amplificador, modelo 2706;
- 01 fonte omnidirecional Brüel & Kjaer 4296;
- 01 micro-computador;
- 01 analisador Pulse Brüel & Kjaer de 4 canais;
- 01 programa de aquisição de dados - Brüel & Kjaer pulse 7790;
- 02 tripés de apoio para microfone.

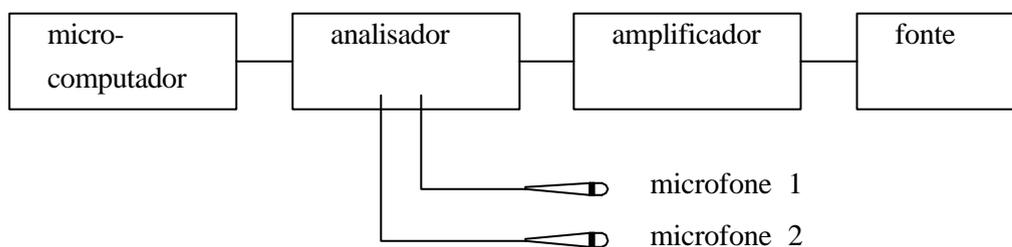


Figura 4.1 - Sistema de medição utilizado nos testes preliminares.

As diferentes situações avaliadas encontram-se ilustradas nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4, bem como descritas na Tabela 4.1. Foram realizadas um total de quatro medições, considerando para cada medição, duas posições de fonte sonora e duas posições de microfone. Foram efetuadas três leituras para cada arranjo e os resultados são apresentados na Tabela 4.2.

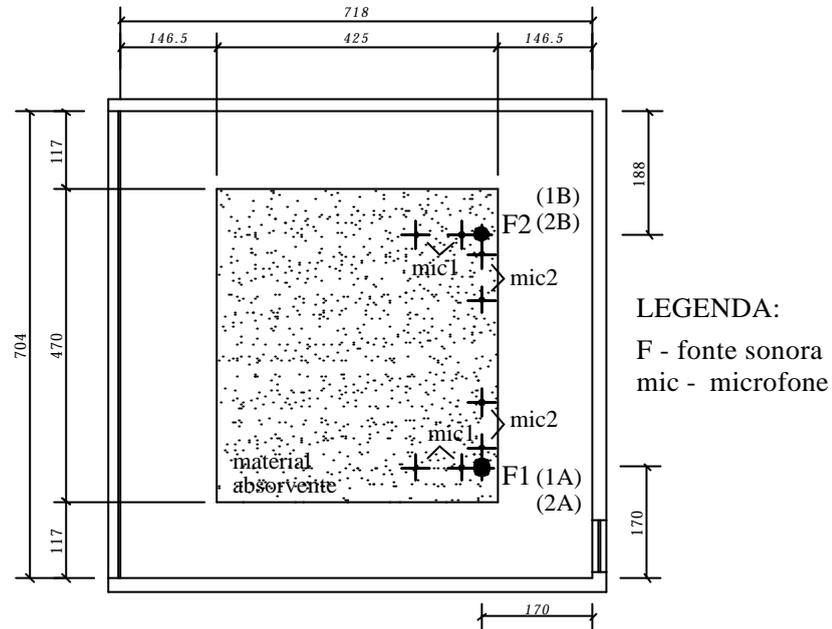


Figura 4.2 – Esquema das medições na sala de aula. Posições da fonte e pontos de recepção das medições 1A, 2A, 1B, 2B.

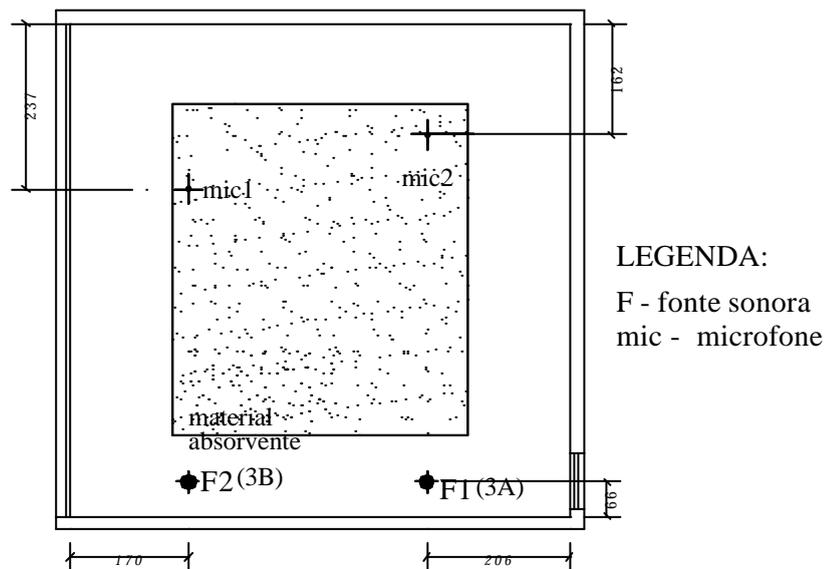


Figura 4.3 – Esquema das medições na sala de aula. Posições da fonte e pontos de recepção das medições 3A, 3B.



Tabela 4.1 - Resumo das condições geométricas e de contorno do ensaio de validação.

<b>Medição 1A</b>		<b>Medição 2A</b>	
Sala	Sem mobiliário, com área no piso coberta com material absorvente.	Sala	Sem mobiliário, com área no piso coberta com material absorvente.
Posição Fonte	<b>F1</b>	Posição Fonte	<b>F1</b>
Distância mic. 1 e 2 - fonte	40 cm – figura 4.2	Distância mic. 1 e 2 - fonte	110 cm – figura 4.2
<b>Medição 1B</b>		<b>Medição 2B</b>	
Sala	Sem mobiliário, com área no piso coberta com material absorvente.	Sala	Sem mobiliário, com área no piso coberta com material absorvente.
Posição Fonte	<b>F2</b>	Posição Fonte	<b>F2</b>
Distância mic. 1 e 2 - fonte	40 cm – figura 4.2	Distância mic. 1 e 2 - fonte	110 cm – figura 4.2
<b>Medição 3A</b>		<b>Medição 3B</b>	
Sala	Sem mobiliário, com área no piso coberta com material absorvente.	Sala	Sem mobiliário, com área no piso coberta com material absorvente.
Posição Fonte	<b>F1</b>	Posição Fonte	<b>F2</b>
Distância mic. 1 - fonte	518 cm – figura 4.3	Distância mic. 1 - fonte	401 cm – figura 4.3
Distância mic. 2 - fonte	476 cm – figura 4.3	Distância mic. 2 - fonte	585 cm – figura 4.3
<b>Medição 4A</b>		<b>Medição 4B</b>	
Sala	Sem mobiliário, sem área no piso coberta com material absorvente.	Sala	Sem mobiliário, sem área no piso coberta com material absorvente.
Posição Fonte	<b>F1</b>	Posição Fonte	<b>F2</b>
Distância mic. 1 - fonte	518 cm – figura 4.4	Distância mic. 1 - fonte	401 cm – figura 4.4
Distância mic. 2 - fonte	476 cm – figura 4.4	Distância mic. 2 - fonte	585 cm – figura 4.4

Tabela 4.2 - Níveis de pressão sonora [dB(A)] medidos nos testes preliminares.

frequência [Hz]	ensaios						
	1a-mic1	1a-mic 2	1b-mic1	1b-mic2	2a-mic1	2b-mic1	2b-mic2
125	47,0	46,5	46,1	46,0	46,0	45,8	46,1
250	65,9	65,7	64,8	65,0	62,5	62,4	64,2
500	76,0	76,7	76,1	75,5	70,9	72,3	72,9
1000	78,0	78,7	78,5	78,0	73,0	74,1	74,5
2000	85,5	85,7	85,4	85,5	81,0	81,7	80,5
4000	90,2	89,8	87,6	90,5	84,0	83,5	85,3
8000	85,7	80,6	81,5	77,8	77,3	75,1	75,1

frequência [Hz]	ensaios							
	3a-mic1	3a-mic2	3b-mic1	3b-mic2	4a-mic1	4a-mic2	4b-mic1	4b-mic2
125	44,1	42,3	41,2	44,7	44,5	43,4	42,5	45,4
250	58,8	61,7	61,2	60,0	61,2	64,4	62,8	62,4
500	68,5	69,7	68,4	66,6	71,6	73,2	72,2	71,3
1000	69,8	71,2	70,1	70,4	74,0	74,3	74,3	74,7
2000	76,5	76,9	76,9	76,4	81,1	81,7	80,8	81,0
4000	80,0	80,4	80,8	80,0	84,1	83,7	84,4	84,2
8000	69,9	70,9	71,3	72,0	74,1	75,0	74,0	75,0

Os valores apresentados são resultados das medições (média das três leituras) realizadas para os testes preliminares de validação, de acordo com cada configuração apresentada nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. A numeração refere-se a cada medição, como mostra a Tabela 4.1. Os valores da medição 2a-mic2 foram desconsiderados. Resultados em dB (A).

## 4.2 - Ensaios Simulados

Concluída a fase das medições e definida a dimensionalidade da análise, dá-se início a etapa de simulações.

Conforme explanado na seção 3.3, a simulação de um modelo pelo método de raios requer, antes de tudo, uma malha de elementos. Para tanto foi utilizado o pré-processador do programa Ansys®. De posse do modelo, pode-se dar início às simulações, realizadas através do programa Raynoise®. Inicialmente, além da aplicação das condições de contorno, é necessário que dados de entrada sejam pré-estabelecidos. Posteriormente, deve-se escolher o tipos de análise a serem realizadas e resultados desejados.

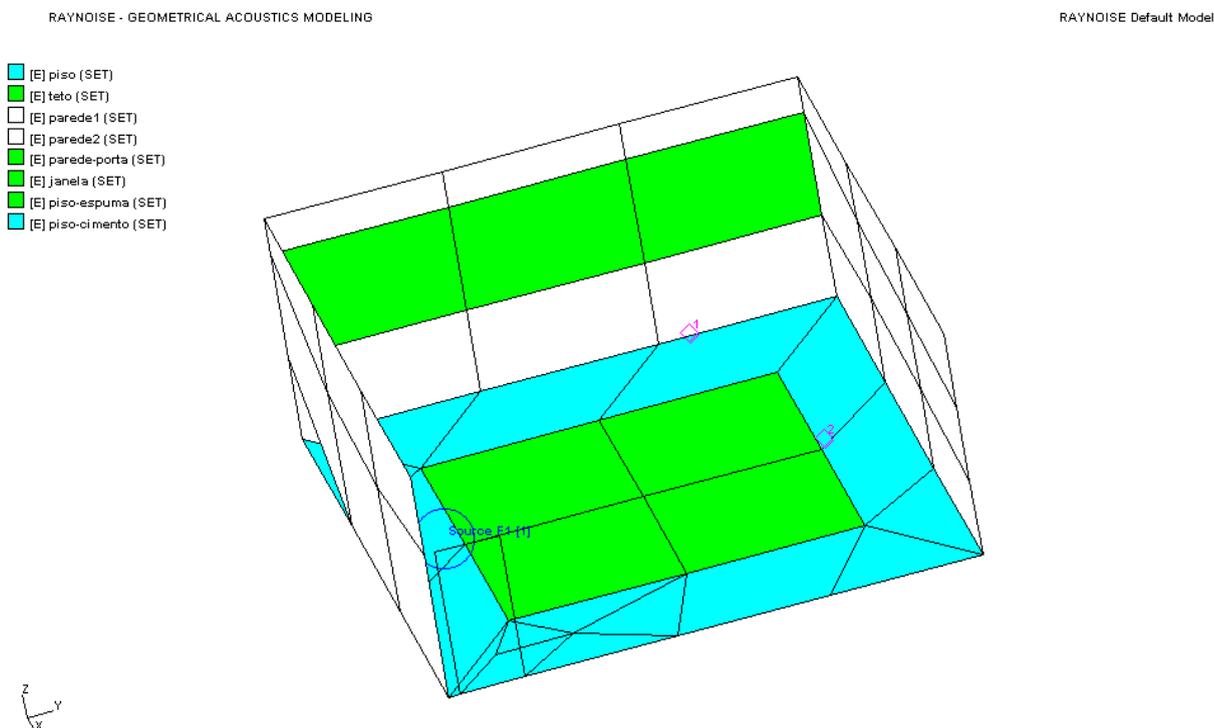


Figura 4.5 – Modelo construído através do programa Raynoise®, representando a sala usada nos testes preliminares.

#### Dados de Entrada:

- Número de raios →  $N = 8000$  - O programa de acústica de raios tem como premissa a determinação da discretização da fonte sonora em ângulos sólidos (número de raios,  $N$ ), e número de reflexões que um raio que parte da fonte atinge até que seja abandonado (ordem de reflexão,  $R$ ). Previamente à definição destas duas variáveis, a sala foi estudada afim de determinar-se os valores aproximados de coeficientes de absorção dos materiais presentes na sala, adotando-se os valores-padrão de  $N$  e  $R$  do programa Raynoise® ( $N=10$ ,  $R= 2000$ ). Ao atingir uma aproximação satisfatória com os valores de NPS medidos, procedeu-se a determinação dos valores adequados de  $R$  e  $N$ . Primeiramente, o valor de  $N$  foi fixado e os valores de  $R$  aumentados em intervalos regulares de 2000, até que os valores calculados de NPS nos pontos de recepção não sofressem alteração significativa. A convergência foi atingida para 8000 raios, valor adotado para as demais simulações.

- Ordem de reflexão

R = 50 - O mesmo processo usado para o número de raios foi realizado para N (ordem de reflexão). Neste caso, R teve seu valor fixado e N teve seu valor alterado de 10 até 50, em intervalos regulares de 10, sendo que a convergência foi verificada para o valor de 50 reflexões.

- Potência da fonte sonora

Seu valor foi previamente medido na câmara reverberante do Laboratório e Vibrações e Acústica da UFSC, através do método descrito pela ISO 3741.

Níveis de potência sonora medidos da fonte sonora Bruel&Kjaer 4296 [dB(A)] - ref.  $10^{-12}$  W

Frequência [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
potência	54,5	70,8	78,9	81,2	88,1	92,6	85,6

- Diretividade e posição da fonte

Considerada onidirecional; Q=1.

- Faixa de frequência das medições

125 a 8000 Hz, em bandas de oitava.

- Nível do ruído de fundo

O ruído de fundo não foi levado em consideração porque durante o período de medição, nenhuma fonte significativa de ruído foi observada (o prédio encontrava - se vazio), obtendo-se uma relação sinal-ruído acima de 10dB em toda a faixa de frequência.

- Coeficientes de absorção

Definidos os valores de R e N, um novo ajuste nos valores de absorção fez-se necessário. Os valores finais de  $\alpha$  são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Coeficientes de absorção ( $\alpha$ ) dos materiais presentes na sala.

material	a - coeficiente de absorção						
	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]	8000 [Hz]
vidro	0,40	0,28	0,14	0,13	0,08	0,12	0,20
madeira	0,40	0,28	0,17	0,09	0,06	0,12	0,20
cimento	0,10	0,06	0,06	0,12	0,08	0,10	0,20
concreto	0,20	0,06	0,05	0,05	0,10	0,12	0,25
tijolo a vista	0,20	0,16	0,12	0,08	0,10	0,16	0,20
espuma	0,50	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Os coeficientes de absorção usados foram extraídos de informações dadas por fabricantes de materiais de acabamento, dados do programa Raynoise®, literatura e trabalhos afins. A cada superfície do ambiente são atribuídos valores de absorção do material de acabamento correspondente. No entanto, vale ressaltar que os valores exatos para estes coeficientes não são conhecidos. Primeiro, pela dificuldade de relacionar determinado material com a descrição existente na literatura. Como exemplo, pode-se citar o carpete, material que na maior parte das vezes é descrito como espesso ou pouco espesso, porém, sem a especificação desta espessura ou textura, ou ainda, sem dados sobre o modo de fixação no momento destas medições dos coeficientes de absorção. Dependendo de como este material está posicionado no ambiente, ele pode se comportar de maneira diferente quanto à absorção. Segundo, por não existir um trabalho abrangente de especificação dos índices de absorção e de perda de transmissão de materiais fabricados pela indústria nacional, o que se reflete na atribuição destes índices encontrados na literatura com materiais nacionais.

- Perda de transmissão

O fenômeno de transmissão não foi considerado porque o experimento não se direcionava ao estudo do campo acústico fora da sala. A energia transmitida foi considerada como energia absorvida, sem prejuízo do cálculo teórico.

- Temperatura e umidade relativa

20°C; 50%.

### 4.2.1 Resultados das simulações

Tabela 4.4 - Resultados das simulações em níveis de pressão sonora [dB(A)].

frequência [Hz]	ensaios						
	1a-mic1	1a-mic 2	1b-mic1	1b-mic2	2a-mic1	2b-mic1	2b-mic2
125	52,1	52,2	52,1	52,2	46,3	46,2	46,3
250	68,5	68,5	68,5	68,5	62,8	62,7	62,9
500	76,7	76,7	76,7	76,7	71,2	71,1	71,2
1000	79,1	79,1	79,1	79,1	73,8	73,7	73,8
2000	85,9	85,9	85,9	85,9	80,5	80,4	80,5
4000	90,2	90,3	90,2	90,2	84,3	84,2	84,3
8000	83,0	83,1	83,0	83,0	76,6	76,5	76,6

frequência [Hz]	ensaios							
	3a-mic1	3a-mic2	3b-mic1	3b-mic2	4a-mic1	4a-mic2	4b-mic1	4b-mic2
125	42,2	42,7	43,2	42,1	43,6	43,9	44,1	43,6
250	58,8	59,6	60,4	58,7	62,5	62,6	62,7	62,4
500	67,3	68,2	69,0	67,2	71,9	72,0	72,1	71,8
1000	70,2	71,1	71,7	70,2	74,4	74,5	74,6	74,4
2000	76,8	77,6	78,3	76,7	80,9	81,0	81,1	80,8
4000	79,9	80,8	81,5	79,8	83,7	83,8	83,9	83,6
8000	71,3	72,2	72,9	71,2	74,2	74,3	74,6	74,0

As diferenças entre os resultados alcançados pela simulação via programa Raynoise® e medições realizadas são apresentadas na tabela 4.5

Tabela 4.5 - Diferenças entre resultados simulados e experimentais em níveis de pressão sonora - [dB(A)].

frequência [Hz]	ensaios						
	1a-mic1	1a-mic 2	1b-mic1	1b-mic2	2a-mic1	2b-mic1	2b-mic2
125	5,1	5,7	6,1	6,2	0,3	0,4	0,2
250	2,6	2,8	3,7	3,5	0,3	0,3	-1,4
500	0,7	0,1	0,6	1,2	0,3	-1,3	-1,7
1000	1,1	0,4	0,6	1,1	0,8	-0,4	-0,7
2000	0,4	0,2	0,5	0,5	-0,6	-1,3	0,0
4000	0,1	0,5	2,6	-0,3	0,3	0,7	-0,9
8000	-2,6	2,4	1,5	5,2	-0,7	1,3	1,5

frequência [Hz]	ensaios							
	3a-mic1	3a-mic2	3b-mic1	3b-mic2	4a-mic1	4a-mic2	4b-mic1	4b-mic2
125	-1,9	0,4	2,0	-2,6	-0,9	0,4	1,6	-1,8
250	-0,1	-2,1	-0,9	-1,3	1,2	-1,8	-0,1	0,1
500	-1,2	-1,5	0,6	0,6	0,3	-1,3	-0,1	0,6
1000	0,4	-0,1	1,6	-0,3	0,4	0,1	0,3	-0,4
2000	0,2	0,6	1,3	0,3	-0,1	-0,7	0,3	-0,1
4000	-0,1	0,4	0,8	-0,2	-0,4	0,1	-0,4	-0,6
8000	1,5	1,2	1,6	-0,8	0,0	-0,6	0,6	-0,9

#### 4.2.2 - Critério de Convergência adotado

Previamente à análise dos resultados alcançados, é oportuna uma revisão sobre o critério de convergência adotado.

A audição, no que se refere ao ser humano, é o princípio da resposta subjetiva ao som. De um ponto de vista subjetivo, o som tem três qualidades: intensidade (ou audibilidade), tom e timbre. Uma compreensão da natureza da resposta do ouvido a mudanças na intensidade do som é muito importante. Via de regra, um bom controle de ruído está associado a um alto custo. Como resultado, é necessário que a redução ou mudança na intensidade do som associada com técnicas de controle de ruído seja claramente notável para aqueles indivíduos que serão afetados pela mudança. A Figura 4.6 mostra a resposta característica do ouvido à mudança mínima perceptível na intensidade em função da frequência e do nível de sensação. Os resultados desta figura não devem ser considerados como absolutos porque podem mudar significativamente de indivíduo para indivíduo e de um ambiente para outro; entretanto, fornecem alguma indicação da resposta da média da população a uma mudança na intensidade do ruído. Como pode ser visto na Figura 4.6, dependendo do nível de sensação, a mudança mínima perceptível na intensidade varia de 0,5 a 7 dB sobre a faixa de frequência audível. A mudança mínima detectável na intensidade é maior em bandas de frequência mais baixas e mais altas. Por exemplo, considerando-se um nível de 40 dB, a mudança mínima detectável na intensidade ou diferença perceptível (*jnd - just noticeable difference*) de um ruído em 1000 Hz é em torno de 0,8 dB. A Tabela 4.6 mostra a resposta subjetiva do ouvido (usualmente na faixa de inteligibilidade da fala) a outras mudanças de amplitude em níveis sonoros. Esta Tabela indica que é usualmente necessário haver uma mudança no nível sonoro na ordem de pelo menos 5

dB para que esta mudança seja claramente perceptível. Indica-se uma redução de 5 dB como uma boa regra prática para obter bom controle de ruído [33].

Como critério de convergência para análise dos resultados foram adotados valores em que as diferenças entre os valores simulados e experimentais devem estar abaixo de  $\pm 1$  dB em valor absoluto e nenhum ponto do espectro deve estar acima da faixa de  $\pm 2$  dB. Trabalhos anteriores [5] assumiram que a diferença média deveria estar abaixo de 1 jnd para todo o espectro e dentro do limite de 2 jnd para toda a medição, o que é similar ao critério adotado neste estudo.

Tabela 4.6 - Efeitos subjetivos de mudanças em níveis sonoros [33].

Mudança no nível sonoro	Mudança na audibilidade aparente
3 dB	Apenas perceptível
5 dB	Claramente notável
10 dB	Dobro ou metade
20 dB	Muito ruidoso ou silencioso

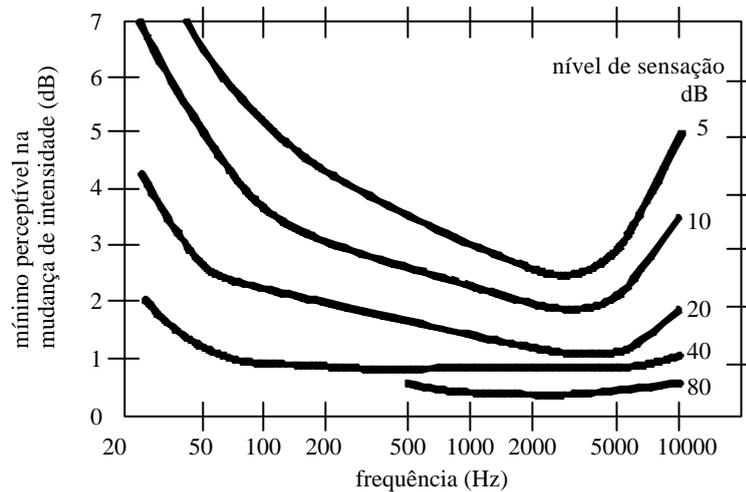


Figura 4.6 - Sensibilidade do ouvido a mudanças na intensidade sonora [33].

### 4.2.3 - Análise dos resultados

De um modo geral, tanto para as medições onde houve a presença ou não de material absorvedor, pode-se afirmar que há boa concordância entre os valores medidos e simulados. Não há uma clara tendência de subestimar ou superestimar o campo sonoro gerado na sala, mas sim uma alternância de valores ora maiores, ora menores que os medidos.

As diferenças de magnitude significativas ocorreram principalmente para as medições 1A e 1B, como mostra a Tabela 4.5. Estas medições representam os microfones posicionados mais próximos à fonte (40 cm). As diferenças ocorridas não seguem tendência específica para toda a faixa de frequência de interesse, havendo um desvio sistemático nas bandas de 125 Hz e 250 Hz. Na banda de frequência de 8000 Hz, há em duas medidas, valores muito acima e muito abaixo do valor medido. Para as demais medições estas diferenças ocorreram de forma aleatória, dentro de uma faixa abaixo de 2dB em valores absolutos.

Os resultados alcançados mostram alguma diferença em relação aos valores experimentais. O maior erro está localizado nas posições mais próximas da fonte sonora e concentrado nas baixas frequências. De modo a verificar a qualidade da simulação, os resultados foram comparados com a teoria disponível para cálculo de pressão sonora em campos difusos (teoria de salas).

## 4.3 - Cálculos Teóricos

Uma enorme quantidade de fenômenos físicos surgem com a propagação do som, e sua interação com cada ambiente dificulta sua descrição precisa através de modelagens matemáticas. Muitos pesquisadores têm procurado, cada vez mais, aprimorar a predição acústica por meio de cálculos teóricos. Apesar das aproximações teóricas ou empíricas disponíveis apresentarem-se com limitações de aplicação, seu emprego pode corroborar resultados de medições e simulações computacionais. Para tanto, a teoria de salas foi utilizada nos testes preliminares de validação do modelo empregado. Os resultados dos cálculos teóricos são mostrados de forma comparativa com os resultados experimentais e simulados. Com base nestes dados a correlação dos resultados é estabelecida.

### 4.3.1 – Teoria de Salas

Os mais conhecidos modelos teóricos para predição de campos sonoros de salas são baseados na teoria do campo difuso [4]. Esta teoria é largamente aplicada em função de sua simplicidade. Porém, sempre é esquecido o fato que sua aplicabilidade é limitada em função de suposições restritivas.

A própria definição de grau de difusão dá margem a controvérsias, porém pode-se considerar que o campo sonoro é difuso se ele possui os seguintes atributos: a) em qualquer posição da sala, a energia incidente a partir de todas as direções, possui intensidade igual (e com fase aleatória); b) o nível de pressão sonora não varia com a posição do receptor.

#### Coefficiente de Absorção da Superfície de Campo Difuso

A teoria do campo difuso usa a taxa média de incidência aleatória de absorção sonora de todas as superfícies da sala. Assim, define-se o coeficiente médio de absorção sonora das superfícies do campo difuso como:

$$\bar{\alpha}_d = \frac{\sum_i S_i \bar{\alpha}_{di}}{\sum_i S_i} \quad (4.1)$$

onde:  $S_i$  e  $\bar{\alpha}_{di}$  são a área da superfície e o coeficiente de absorção, respectivamente, da superfície  $i$ .

Se  $\bar{\alpha}_d$  é usado, é necessário que nenhuma parte da sala seja altamente absorvente, já que neste caso, o campo sonoro difuso não pode existir. Objetos absorvedores como assentos, mesas e mesmo pessoas devem ser incluídos no cálculo de  $\bar{\alpha}_d$ , apesar do fato que tais objetos possuam superfícies mal definidas. É prática comum associar a absorção de campo difuso,  $A_d$ , em metros quadrados, a cada objeto, onde  $A_d = \bar{\alpha}_{di} S_i$ . A absorção de todos os objetos são somadas e a absorção total é incluída no cálculo de  $\bar{\alpha}_d$ , sem modificação na área total. Em outras palavras, somente as áreas que

delimitam a sala (paredes, teto e piso) devem ser consideradas na área total ( $\sum S_i$ ) da equação 4.1, excluindo-se objetos e pessoas. No caso de espaços absorvedores fechados, com assentos de auditórios ou *baffles* suspensos de forros, maior cautela é necessária, já que a absorção total vai depender da área total coberta e pode não ser a soma das absorções dos objetos individuais. Também, o coeficiente de absorção de pequenas amostras de material absorvedor será mais alto que de grandes áreas do mesmo material em consequência do efeito da difração nos contornos do material.

### Teoria de Sabine e de Eyring

Existem diversos modelos de campo difuso. O mais comumente usado é a Teoria de Eyring, expressa pelas equações 4.2 e 4.3, aplicadas para uma fonte pontual.

Condição de estado estacionário:

$$NPS(r) = NWS + 10 \log_{10} \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (4.2)$$

Decaimento Sonoro:

$$T_{60} = \frac{55.3V}{c[4mV - S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_d)]} \quad (4.3)$$

Onde:

NPS = nível de pressão sonora, dB *re*  $2 \times 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>

NWS = nível de potência da fonte sonora, dB *re*  $10^{-12}$  W

T<sub>60</sub> = tempo de reverberação, s

c = velocidade do som no ar, m/s

R = constante da sala =  $[4mV - S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_d)] / (1 - \bar{\alpha}_d)$ , m<sup>2</sup>

r = distância fonte-receptor, m

Q = fator de diretividade

$2m$  = energia de absorção do ar, Np/m

$V$  = volume da sala, m<sup>3</sup>

$\bar{\alpha}_d$  = média dos coeficientes de absorção das superfícies do campo difuso

$S$  = área total das superfícies da sala (superfícies e barreiras), m<sup>2</sup>

A teoria de Eyring é aplicável a salas com coeficientes de absorção médios arbitrários [4]. Poderia ser usada, por exemplo, para determinar os coeficientes de absorção das superfícies de uma sala a partir dos tempos de reverberação medidos. Se, entretanto, a média dos coeficientes de absorção é suficientemente baixo ( $< 0,25$ ), é possível usar a Teoria de Sabine substituindo nas equações 4.2 e 4.3, o termo  $-\ln(1-\bar{\alpha}_d)$  por  $\bar{\alpha}_d$ . Assim, a Teoria de Sabine pode ser usada na determinação dos coeficientes de absorção sonora de materiais em salas reverberantes. É claro que a teoria aplicada na predição de um campo sonoro particular, também deve ser consistente com aquela usada para obter os dados dos coeficientes de absorção usados na predição.

A teoria do campo difuso prediz as seguintes características do campo sonoro:

- 1) Estado Estacionário: O campo sonoro total é a soma dos componentes diretos e reverberantes descritos, respectivamente, pelos primeiro e segundo termos entre parênteses da equação 4.2. O campo direto, que é o dominante próximo à fonte, é independente das propriedades da sala. O nível de pressão sonora decai 6 dB pelo dobro da distância. O campo reverberante, que é o dominante longe da fonte, não varia com a distância entre fonte e receptor. O nível de pressão sonora é, para uma primeira aproximação (quando  $\bar{\alpha}_d$  e  $m$  são pequenos), inversamente proporcional a  $\bar{\alpha}_d$  e a  $S$ .
- 2) Decaimento Sonoro / Tempo de Reverberação: Depois que a fonte sonora cessa a radiação, a média quadrática da pressão sonora no receptor decai exponencialmente com o tempo; o nível de pressão sonora correspondente decresce linearmente com o tempo. Para uma primeira aproximação, o tempo de reverberação é diretamente proporcional à razão  $V/S\bar{\alpha}_d$ .

Vale ressaltar que a teoria de campo difuso explica somente certos parâmetros acústicos importantes e ainda para alguns deles de maneira aproximada. Em particular, a geometria da sala e a diretividade da fonte são modeladas aproximadamente. Nem a distribuição da absorção da superfície e nem a presença de barreiras ou mobiliário são modelados. Isto, e o fato da teoria ser baseada em hipóteses restritivas, limitam seriamente sua aplicabilidade. Como exemplo, o nível de pressão sonora constante predito pela teoria do campo difuso em distâncias suficientemente grandes da fonte é raramente encontrada na prática; como regra, níveis sonoros em consequência de uma fonte sonora simples decaem, de modo constante, com a distância a partir da fonte.

Um outro aspecto do uso da teoria de salas é a capacidade de calcular a distância da fonte na qual a energia sonora direta, ou seja, dos raios diretos que ainda não sofreram nenhuma reflexão, é igual à energia sonora de todos os raios refletidos no ponto calculado. A esta distância é dada o nome Raio de Reverberação.

Os resultados obtidos através do da teoria de salas são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Cálculo teórico dos níveis de pressão sonora [dB(A)] e raio de reverberação (m) através da teoria de Salas.

1 - Configurações 1A e 1B

medições	Fonte-posição microfone	raio	frequência [Hz]						
			125	250	500	1000	2000	4000	8000
1A	fonte1-mic1	0,40	52,0	68,4	76,6	78,9	85,8	90,2	83,0
1A	fonte1-mic2	0,40	52,0	68,4	76,6	78,9	85,8	90,2	83,0
1B	fonte2-mic1	0,40	52,0	68,4	76,6	78,9	85,8	90,2	83,0
1B	fonte2-mic2	0,40	52,0	68,4	76,6	78,9	85,8	90,2	83,0

raio de reverberação	frequência [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	1,1	1,3

## 2 - Configurações 2A e 2B

medições	Fonte-posição microfone	raio	frequência [Hz]						
			125	250	500	1000	2000	4000	8000
2A	fonte1-mic1	1,1	45,8	62,6	70,9	73,3	80,0	84,0	76,2
2A	fonte1-mic2	1,1	45,8	62,6	70,9	73,3	80,0	84,0	76,2
2B	fonte2-mic1	1,1	45,8	62,6	70,9	73,3	80,0	84,0	76,2
2B	fonte2-mic2	1,1	45,8	62,6	70,9	73,3	80,0	84,0	76,2

raio de reverberação [m]	frequência [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	1,1	1,0	0,9	0,9	0,09	1,1	1,3

## 3 - Configurações 3A e 3B

medições	fonte-posição microfone	raio	frequência [Hz]						
			125	250	500	1000	2000	4000	8000
3A	fonte1-mic1	5,18	43,1	60,2	68,6	71,2	77,7	81,3	72,8
3A	fonte1-mic2	4,76	43,2	60,2	68,7	71,2	77,8	81,4	72,8
3B	fonte2-mic1	4,01	43,2	60,3	68,7	71,3	77,8	81,4	72,9
3B	fonte2-mic2	5,85	43,1	60,2	68,6	71,2	77,7	81,3	72,7

raio de reverberação [m]	frequência [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	1,1	1,3

## 4 - Configurações 4A e 4B

medições	fonte-posição microfone	raio	frequência [Hz]						
			125	250	500	1000	2000	4000	8000
4A	fonte1-mic1	5,18	44,2	62,9	72,3	74,7	81,2	84,1	74,6
4A	fonte1-mic2	4,76	44,2	62,9	72,3	74,7	81,2	84,1	74,6
4B	fonte2-mic1	4,01	44,3	62,9	72,3	74,8	81,2	84,1	74,7
4B	fonte2-mic2	5,85	44,2	62,9	72,3	74,7	81,2	84,0	74,6

raio de reverberação [m]	frequência [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8	1,0

## 4.4 - Análise Comparativa entre os Resultados Simulados, Experimentais e Teóricos

Para a análise dos resultados dos testes preliminares, optou-se por fazê-la através de curvas comparativas entre os resultados experimentais, simulados e teóricos, com o objetivo de conferir maior confiabilidade às respostas obtidas.

Os gráficos apresentam a diferença entre os resultados simulados através do programa Raynoise® e os experimentais, comparados com os resultados teóricos e os experimentais, que correspondem às medições da sala do edifício CTC, como ilustrado nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. As referências são as médias destas duas diferenças e podem ser vistas nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

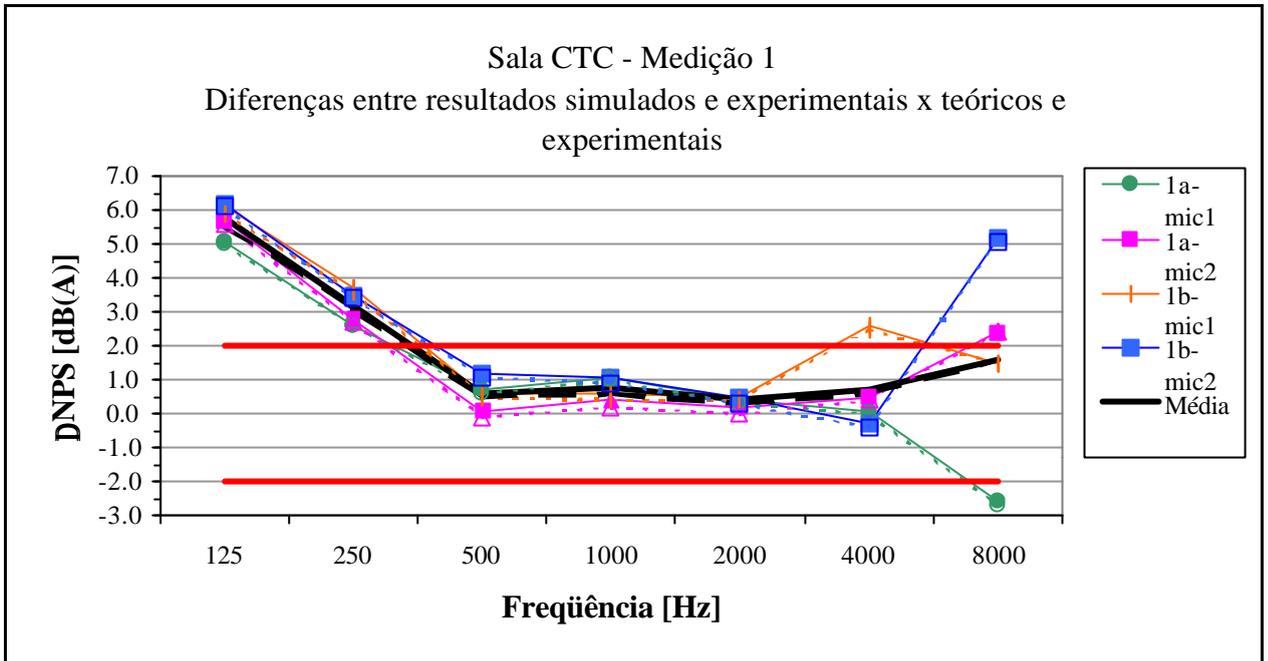


Figura 4.7 – Variações dos níveis de pressão sonora dos pares fonte/mic. das medições 1A e 1B (Figura 4.2), através das diferenças entre os resultados simulados e experimentais, e teóricos e experimentais.

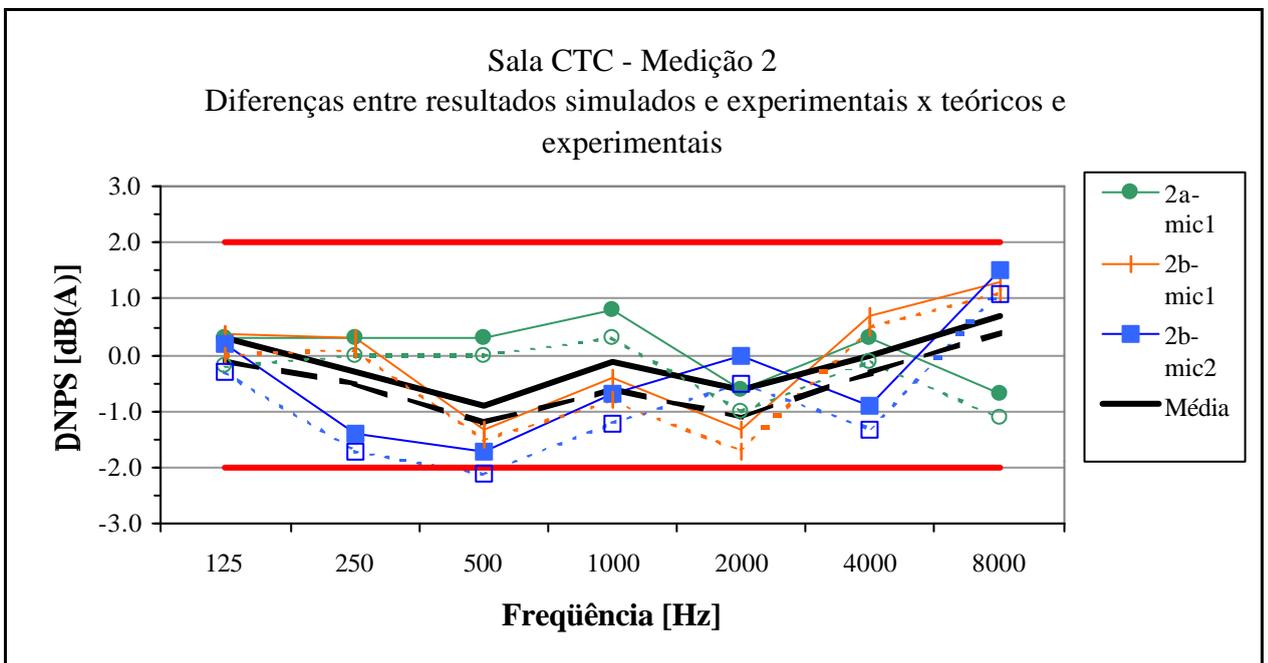


Figura 4.8 – Variações dos níveis de pressão sonora dos pares fonte/mic. das medições 2A e 2B (Figura 4.2), através das diferenças entre os resultados simulados e experimentais, e teóricos e experimentais.

Legenda:

Linha pontilhada - diferença entre os resultados teóricos e experimentais.

Linha cheia - diferença entre os resultados simulados e experimentais.

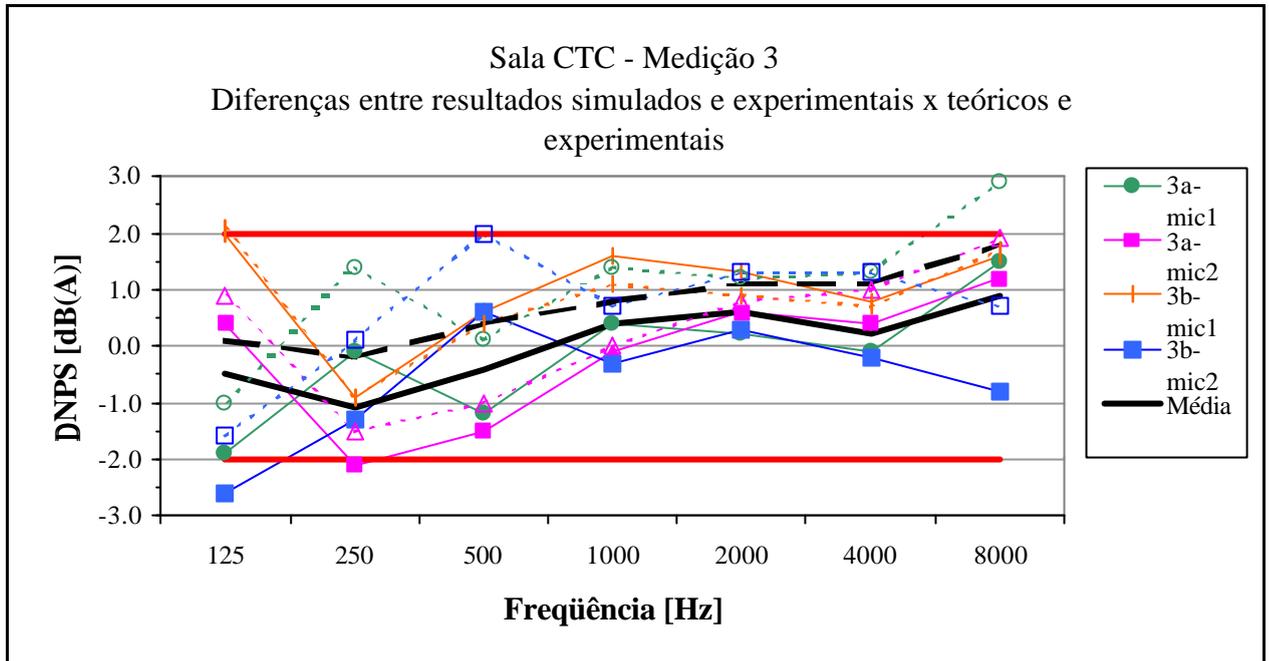


Figura 4.9 – Variações dos níveis de pressão sonora dos pares fonte/mic. das medições 3A e 3B (Figura 4.3), através das diferenças entre os resultados simulados e experimentais, e teóricos e experimentais.

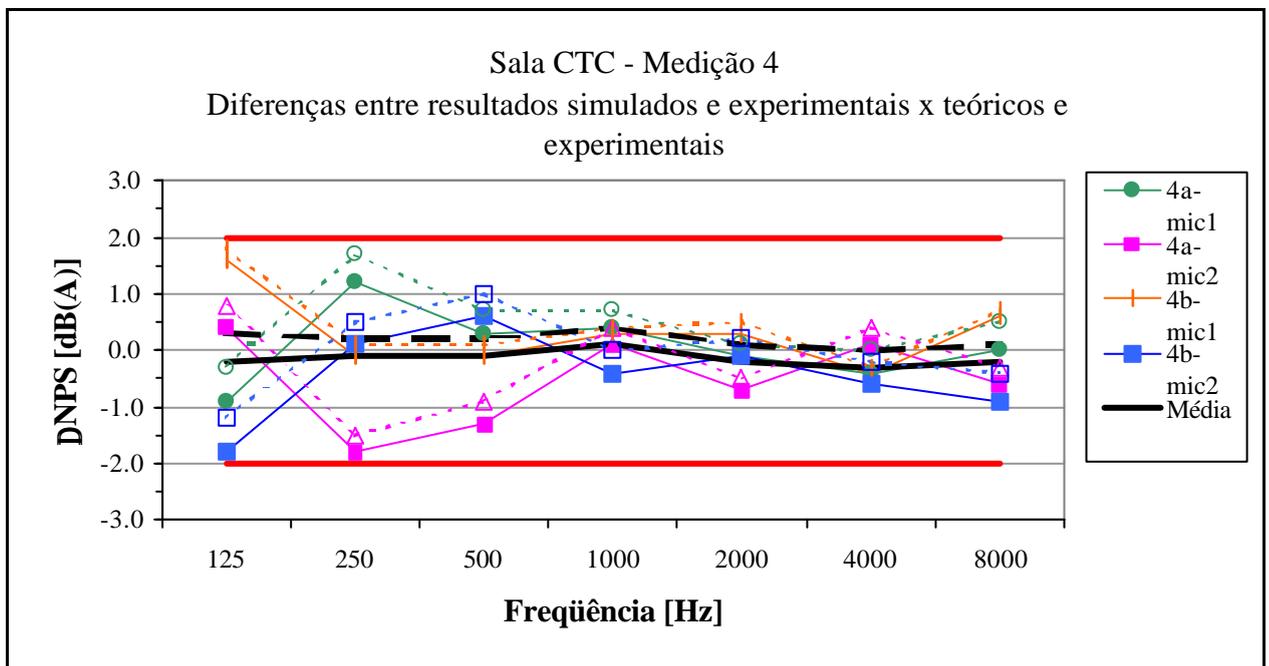


Figura 4.10 – Variações dos níveis de pressão sonora dos pares fonte/mic. das medições 4A e 4B (Figura 4.4), através das diferenças entre os resultados simulados e experimentais, e teóricos e experimentais.

Legenda:

Linha pontilhada - diferença entre os resultados teóricos e experimentais.

Linha cheia - diferença entre os resultados simulados e experimentais.

Pelos gráficos, nota-se que os resultados teóricos ficaram muito próximos dos resultados simulados. Entretanto, em alguns pontos há uma certa defasagem, mas tanto os pontos resultados dos métodos teóricos quanto das medições mostram que os métodos teóricos fornecem boas informações sobre o comportamento real. É importante ressaltar que na comparação entre dados de um trabalho experimental e dados teóricos, inevitavelmente haverá diferenças, muitas vezes decorrentes de simplificações adotadas no métodos teóricos. Além disso, deve-se mencionar a incerteza das medições causada tanto por limitações das próprias medições como por agentes externos.

O erros relacionados às bandas de 125 e 250 Hz observados paras as medições 1A e 1B podem ter três causas a saber :

- a) Difusividade do campo sonoro - A teoria de salas é baseada na difusividade da energia sonora pela sala. Isto será válido quando houver uma densidade modal razoavelmente elevada ou, ainda, quando os picos de ressonância estão mais próximos que a largura de banda associada a um pico [29]. Se a diferença entre picos é da ordem de aproximadamente 1/3 da largura da banda de ressonância, os picos de ressonância podem ser considerados como uma linha contínua suavizada. Como o espaçamento entre os picos diminui com o aumento da frequência, existe uma frequência (frequência de *Schroeder*) onde a largura de banda da ressonância é igual a 3 vezes o espaçamento dos modos; acima desta frequência a condição é atingida e abaixo desta não é.

Esta frequência é identificada pela equação 4.4.

$$f_{Sch} = \left( \frac{c^3}{4 \ln 10} \right)^{1/2} \left( \frac{T_{60}}{V} \right) = c \left( \frac{6}{A_s} \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

onde:

$c = 340$  m/s

$A_s =$  área de Sabine

$T =$  tempo de reverberação, s

$V =$  volume da sala,  $m^3$

Para a sala em questão, a frequência de Schroeder calculada é:

125 Hz, para as medições com material absorvente no piso;

138 Hz, para as medições sem material absorvente no piso.

b) Proximidade entre ponto de medição e fonte sonora - A comparação entre os valores dos raios de reverberação e a distância entre fonte e ponto de medição mostra que as medições 1A e 1B foram realizadas na predominância do campo direto, ou seja, a energia sonora irradiada diretamente da fonte sonora é superior à energia refletida pelas paredes e objetos dentro da sala. Isto leva à conclusão que a diferença encontrada está relacionada ao modo de irradiação da fonte sonora.

c) Idealização da fonte sonora - Tanto a teoria de salas quanto a simulação de acústica de raios tem por base a fonte sonora pontual ideal, ou seja, onidirecional e dimensão tendendo a zero. Nenhuma fonte real é exatamente pontual por possuir dimensões finitas. Portanto, em campos próximos da fonte, é importante a dimensão da fonte em relação à distância do ponto de medição e o comprimento de onda da frequência de interesse.

A fonte sonora utilizada tem a forma de um dodecaedro composto de pentágonos regulares. Sua dimensão aproxima-se de uma esfera com diâmetro de 25 cm. Em cada uma de suas faces há um alto falante de diâmetro aproximado de 8 cm. Apesar de assemelhar-se a uma esfera, esta configuração deve gerar campos próximos diferentes de uma fonte pontual ideal.

A relação entre comprimento de onda e dimensões físicas é de especial interesse na influência do campo sonoro próximo de uma fonte real. De fato, pode-se verificar que o erro diminui medida que a frequência cresce. Os comprimentos de onda são 2,72 m, 1,36 m e 0,68 m para 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz respectivamente. Isto corresponde a afirmar que a distância entre fonte e receptor é aproximadamente menor ou igual a  $\frac{1}{4}$  de comprimento de onda para as frequências 125 Hz e 250 Hz.

#### **4.5 – Conclusões**

A análise das curvas das simulações numéricas e das medições foi feita para cada uma das configurações. Os valores preditos pelo cálculo teórico também foram comparados com os valores simulados e demonstraram excelente concordância, não excedendo à 1,0 dB em nenhum ponto de espectro. Globalmente, pode-se afirmar, a partir da comparação das curvas, que há boa concordância entre os valores preditos, calculados e os valores medidos. Para alguns pontos em que houve uma certa defasagem, foram apresentadas hipóteses que levam a crer que as diferenças encontradas estão relacionadas à forma de irradiação da fonte sonora, em especial, ao campo próximo.

#### **4.6 – Sumário**

Este capítulo, referente aos testes preliminares de validação, iniciou com uma apresentação dos procedimentos experimentais. Foram descritos os equipamentos utilizados, a sala, as diferentes configurações de fonte sonora e receptores e as respostas obtidas nas medições.

Em um segundo momento, foram apresentadas as simulações numéricas preliminares realizadas. Para o início do processamento dos dados, parâmetros de entrada foram pré-estabelecidos e condições de contorno aplicadas. Além disso, um resumo sobre a teoria de salas e critério de convergência adotado é exposto, com o propósito de se obter subsídios para uma validação e comparação entre os resultados dos ensaios experimentais, simulações numéricas e cálculos teóricos.

Finalmente, uma análise destes resultados evidenciou uma correlação satisfatória entre os mesmos, de acordo com o critério de convergência adotado.

Atendendo ao objetivo proposto para esta etapa, as simulações preliminares forneceram uma boa base sobre o funcionamento do programa Raynoise®, permitindo maior confiança nos resultados simulados e a partir da experiência obtida, simulações mais complexas são implementadas.

## Capítulo 5

# ESCRITÓRIOS PANORÂMICOS REAIS

Neste capítulo são apresentados ensaios experimentais realizados em dois escritórios reais. Como primeiro passo, as dimensões físicas, a distribuição espacial do mobiliário e materiais de acabamento empregados na composição destes ambientes foram pesquisados. Concluída esta etapa, medições utilizando fonte sonora conhecida foram conduzidas nas duas salas. Tendo como referência os dados obtidos, estes escritórios foram simulados objetivando-se ajustar o modelo teórico aos valores medidos através da análise de sensibilidade dos coeficientes de absorção. O melhor conjunto destes valores foi determinado, analisando-se as diferenças entre valores medidos e simulados para 32 pontos distintos.

### 5.1 – Ensaio Experimentais

Os locais escolhidos para o estudo de ambientes panorâmicos reais foram dois escritórios da Empresa Brasileira de Compressores - Embraco S.A., localizada na cidade de Joinville - Santa Catarina. Estes escritórios possuem mobiliários idênticos, com distribuição espacial similar, diferenciando apenas na sua adaptação a cada espaço. Ambos possuem a mesma função, sendo utilizados para o desenvolvimento de projetos e, portanto, as mesmas fontes de ruído características desta tipologia de ambiente, tais como: ar condicionado, telefones, computadores, impressoras e pessoas conversando.

Previamente ao início dos ensaios experimentais, um levantamento das dimensões físicas dos espaços e do mobiliário, como cadeiras, mesas e divisórias foi realizado. Os escritórios possuem o mesmo tipo de acabamento: as paredes são pintadas, forro composto por placas absorventes, móveis em fórmica, divisórias e cadeiras forradas com tecido. A diferença entre os dois locais está no acabamento do piso, um carpetado (Escritório 1) e o outro revestido com paviflex (Escritório 2).

Os ensaios experimentais foram executados de maneira idêntica em cada um dos escritórios. Previamente às medições, os transdutores foram calibrados. O experimento constituiu-se de medições de níveis de pressão sonora em oito diferentes pontos e duas posições distintas de fonte sonora de cada ambiente. As medições representam a média temporal de 1 minuto e estão descritas em bandas de oitava de 125 Hz a 8000 Hz. Em função da estabilidade da fonte aerodinâmica sonora usada, considerou-se desnecessária a repetição das medições. As posições dos microfones foram escolhidas de forma aleatória, com variação da altura dos microfones, distância da fonte e proximidade do mobiliário, de modo que os resultados das medições dessem uma idéia geral do campo acústico gerado no ambiente. O nível do ruído de fundo também foi registrado.

Os equipamentos empregados nos ensaios experimentais são relacionados a seguir:

- 04 microfones ICP BK4189 com pré-amplificador 2671, 50 mv/Pa;
- 01 condicionador de sinais ICP, marca PCB, modelo 482A16;
- 01 fonte sonora de referência tipo aerodinâmica, Brüel & Kjaer; tipo 4208;
- 01 analisador Pulse portátil Brüel & Kjaer, de 4 canais;
- 01 calibrador Brüel & Kjaer 4230, 1000 Hz, 94 dB;
- 04 tripés de apoio para microfone.

Os resultados das medições são apresentados nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1 - Níveis de pressão sonora [dB(A)] em um escritório panorâmico real.

frequência [Hz]	medições escritório 1 - fonte posição 1							
	mic1	mic2	mic3	mic4	mic5	mic6	mic7	mic8
125	52,9	46,0	45,3	44,4	51,3	50,8	45,9	45,7
250	63,1	53,9	55,4	51,3	60,9	54,2	55,0	53,2
500	69,1	60,2	60,9	56,6	66,0	61,9	60,8	57,8
1000	73,1	67,6	67,2	64,8	71,6	68,8	67,8	65,9
2000	77,4	69,2	69,3	66,3	75,3	71,1	69,8	67,9
4000	72,4	65,1	65,0	62,9	70,2	65,8	67,0	64,3
8000	68,3	58,3	57,8	55,7	65,2	59,5	60,4	56,5
<b>dB(A)</b>	80,4	72,9	72,8	70,1	78,3	74,3	73,6	71,5

Tabela 5.2 - Níveis de pressão sonora [dB(A)] em um escritório panorâmico real.

frequência [Hz]	medições escritório 1 - fonte posição 2							
	mic1	mic2	mic3	mic4	mic5	mic6	mic7	mic8
125	50,3	47,3	47,2	47,2	47,8	47,1	45,3	45,0
250	55,9	57,2	57,2	54,1	55,4	56,3	56,4	55,2
500	61,4	62,5	62,3	59,8	60,6	61,0	61,1	61,0
1000	68,4	68,7	69,3	67,2	67,8	69,1	68,3	66,0
2000	69,4	70,4	70,9	68,7	68,9	70,8	69,2	66,8
4000	65,4	67,6	67,0	64,4	64,0	66,4	65,3	62,8
8000	59,1	60,6	59,6	57,8	57,7	59,6	57,9	56,4
<b>dB(A)</b>	73,4	74,4	74,6	72,4	72,7	74,3	73,2	71,1

Tabela 5.3 - Níveis de pressão sonora [dB(A)] em um escritório panorâmico real.

frequência [Hz]	medições escritório 2 - fonte posição 1							
	mic1	mic2	mic3	mic4	mic5	mic6	mic7	mic8
125	54,7	46,1	47,2	43,5	51,0	44,3	46,1	44,6
250	63,4	56,6	55,6	55,6	61,7	56,4	54,2	55,0
500	69,2	60,1	60,7	60,6	65,8	64,1	60,9	61,5
1000	74,2	69,7	68,2	69,2	73,7	70,3	69,9	70,7
2000	76,0	72,1	70,0	71,1	76,4	72,2	72,3	71,3
4000	73,1	68,7	66,6	68,1	73,3	68,9	69,4	67,8
8000	69,2	62,0	58,6	60,3	68,1	62,7	62,6	60,2
<b>dB(A)</b>	80,2	75,6	73,7	74,8	80,0	76,0	75,9	75,3

Tabela 5.4 - Níveis de pressão sonora [dB(A)] em um escritório panorâmico real.

frequência [Hz]	medições escritório 2 - fonte posição 2							
	mic1	mic2	mic3	mic4	mic5	mic6	mic7	mic8
125	51,1	44,1	53,7	49,0	47,0	46,9	48,0	46,8
250	55,9	56,8	63,7	55,8	56,2	58,5	58,4	54,3
500	60,4	61,5	70,3	60,9	60,6	62,8	63,1	61,9
1000	69,1	70,1	77,0	68,9	68,6	69,8	72,1	69,7
2000	70,4	72,4	79,4	71,0	70,4	72,5	74,4	71,3
4000	66,4	68,7	75,7	66,8	66,3	68,5	70,5	67,7
8000	59,5	61,9	69,3	59,7	59,2	61,7	63,3	60,5
<b>dB(A)</b>	74,2	75,9	82,9	74,4	74,0	75,9	77,8	75,0

## 5.2 - Ensaio Simulado

De posse dos resultados dos levantamentos e medições, uma malha de elementos representando os escritórios panorâmicos reais foi construída através do pré-processador do programa Ansys®. Com os modelos numéricos concluídos, as condições de contorno foram implantadas no programa Raynoise® e os dados de entrada pré- estabelecidos. Estes modelos com o posicionamento das fontes sonoras e dos pontos de recepção são apresentados nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

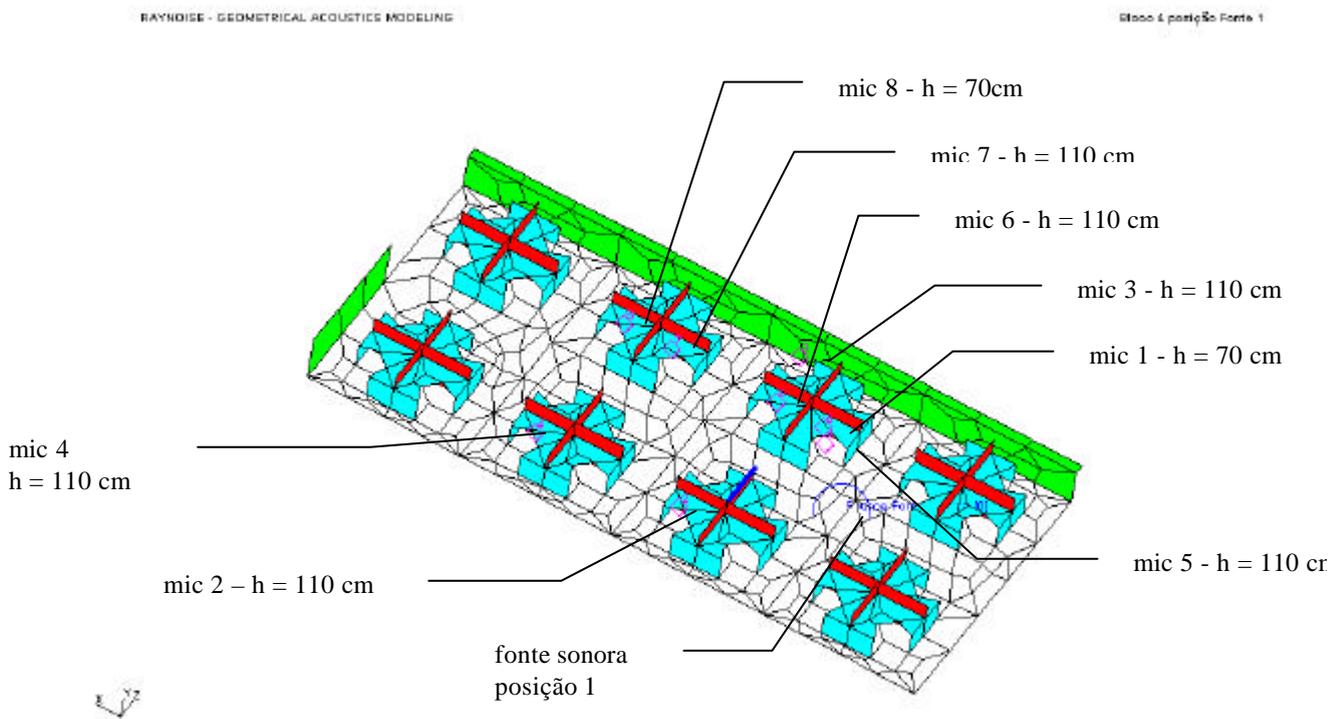


Figura 5.1 – Modelo construído através do programa Raynoise® - Escritório panorâmico 1 - fonte posição 1

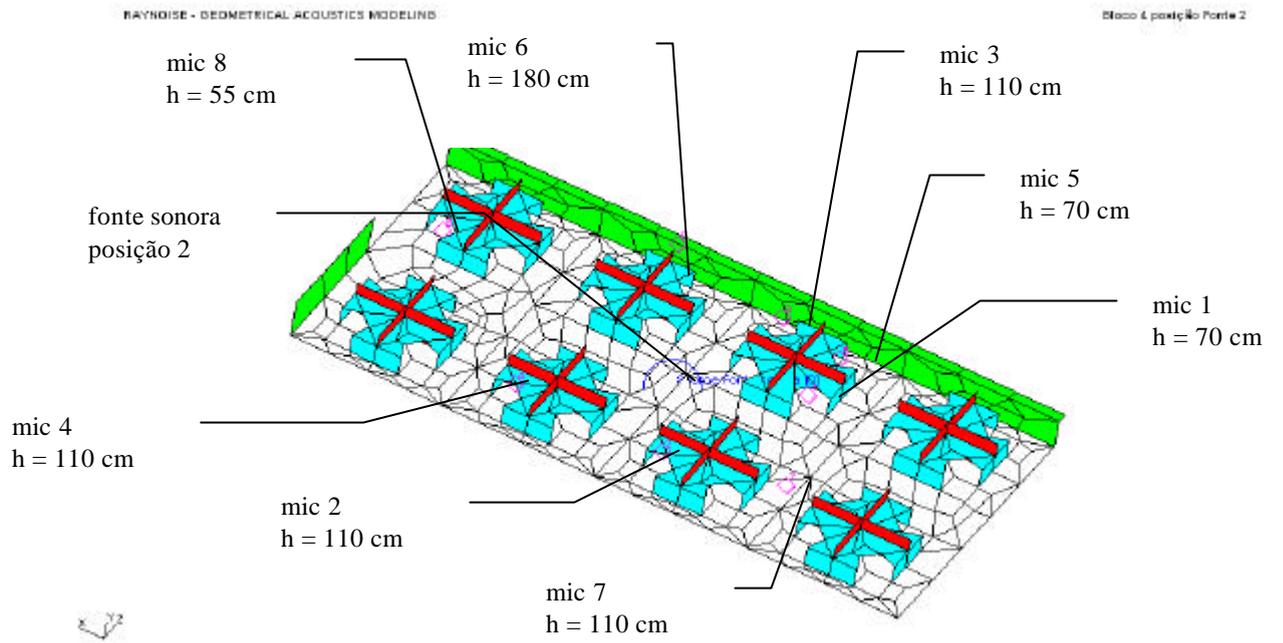


Figura 5.2 – Modelo construído através do programa Raynoise® - Escritório panorâmico 1 - fonte posição 2.

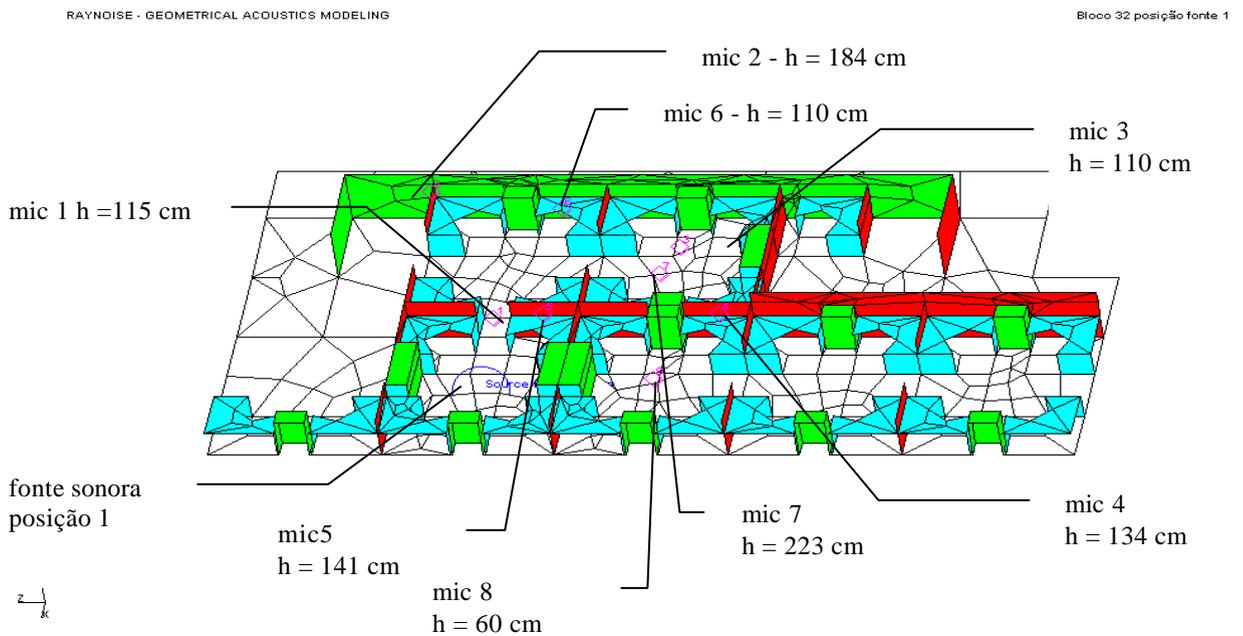


Figura 5.3 – Modelo construído através do programa Raynoise® - Escritório panorâmico 2 - fonte posição 1.

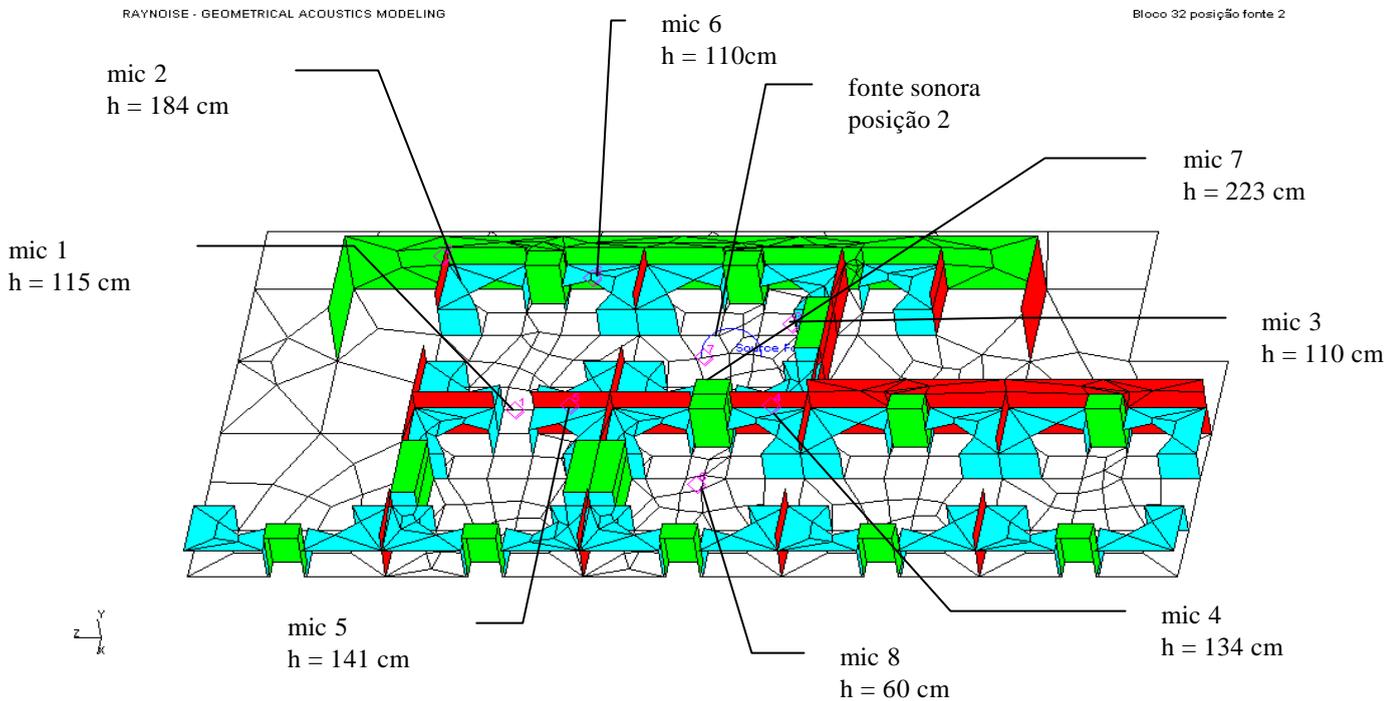


Figura 5.4 – Modelo construído através do programa Raynoise® - Escritório panorâmico 2 - fonte posição 2.

De forma similar ao procedimento realizado para a definição dos dados de entrada das simulações dos testes preliminares, como apresentado na seção 4.2, os valores dos coeficientes de absorção dos materiais presentes na sala e os parâmetros de simulação ordem de reflexão (R) e número de raios (N) foram definidos para os dois escritórios panorâmicos de referência. Primeiramente, os ambientes foram estudados para que valores de absorção aproximados dos materiais de acabamento fossem estabelecidos. Para isto, os valores-padrão (*default* do programa Raynoise®) do número de raios e número de reflexões foram adotados. Ao atingir-se uma aproximação satisfatória com os valores dos níveis de pressão sonora medidos, iniciou-se a determinação dos valores de N e R. Variações do número de raios foram testadas enquanto mantido fixo o número de reflexões. Em seguida, o número de reflexões foi mantido fixo e o número de raios alterado. Ao observar-se que os níveis de pressão sonora não se alteravam em valores acima de 0,1 dB com acréscimos de R e N, a convergência foi atingida. Definidos os valores de R e N, novas simulações foram realizadas alterando-se os valores de absorção dos materiais. Um novo ajuste foi necessário para minimizar os erros entre medições experimentais e valores simulados em toda a faixa de frequência de interesse.

**Dados de entrada:**

- Número de raios →  $R = 20000$
- Ordem de reflexão →  $N = 40$
- Potência da fonte sonora

Seu valor foi previamente medido na câmara reverberante da Embraco S. A

<b>freqüência [HZ]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
<b>Potência [dB(A)]</b>	67,8	76,2	81,3	88,5	90,4	87,9	82,7

- Diretividade e posição da fonte aerodinâmica.

Onidirecional ( $Q=2$ )

Fonte posicionada no piso

- Faixa de freqüência das medições → 125 a 8000 Hz, em bandas de oitava.

- Nível do ruído de fundo → O ruído de fundo foi medido nos dois escritórios, no período da noite, sem atividades. Os valores foram registrados em RMS, média temporal de 1 minuto, em 4 pontos distintos.

<b>freqüência [Hz]</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
<b>NPS [dB(A)]</b>	45,4	43,1	37,6	36,8	29,1	24,6	22,8

- Coeficientes de absorção → Valores de  $\alpha$  obtidos na validação dos ambientes reais e utilizados como referência nas simulações. Os valores finais de  $\alpha$  são apresentados na Tabela 5.5.

- perda de transmissão→ Não foi considerada pois durante os ajustes não houveram variações significativas nos resultados, em função de alterações nos valores da perda de transmissão.

Tabela 5.5 - Valores dos coeficientes de absorção ( $\alpha$ ) dos materiais presentes nos escritórios.

Acabamentos	a - coeficiente de absorção						
	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]	8000 [Hz]
carpete	0,57	0,50	0,50	0,56	0,55	0,65	0,75
forro	0,57	0,72	0,70	0,56	0,55	0,65	0,83
barreiras	0,09	0,25	0,15	0,29	0,30	0,35	0,35
formica	0,18	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
paviflex	0,18	0,19	0,28	0,30	0,25	0,30	0,18
vidro	0,43	0,18	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
alvenaria	0,13	0,06	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04

- Temperatura e umidade relativa→ 20°C; 50%



Figura 5.5 - Foto do Escritório panorâmico 2 de referência

### 5.2.1 - Resultados das simulações

Tabela 5.6 - Resultados das simulações em níveis de pressão sonora [dB(A)].

frequência [Hz]	ensaios escritório 1 - fonte posição 1							
	mic1	mic2	mic3	mic4	mic5	mic6	mic7	mic8
125	55,2	45,4	44,6	41,8	52,5	47,2	47,1	42,5
250	63,2	53,0	52,5	49,8	60,8	55,0	55,1	50,4
500	69,2	59,3	59,1	56,3	66,4	60,9	61,1	56,9
1000	75,4	66,9	66,9	63,7	73,3	68,0	68,2	64,5
2000	77,3	68,8	68,9	65,6	75,3	69,8	70,2	66,5
4000	74,0	64,5	64,6	61,4	72,0	65,4	66,4	62,3
8000	68,2	56,0	56,0	53,3	66,0	57,2	59,6	54,3

Tabela 5.7 - Resultados das simulações em níveis de pressão sonora [dB(A)].

frequência [Hz]	ensaios escritório 1 - fonte posição 2							
	mic1	mic2	mic3	mic4	mic5	mic6	mic7	mic8
125	45,3	49,1	48,1	44,7	43,2	47,7	45,4	42,5
250	52,8	57,3	56,3	52,3	51,0	56,0	53,3	50,7
500	58,5	63,2	62,6	58,8	57,5	62,4	60,0	56,4
1000	65,6	69,9	69,6	66,8	65,0	69,6	67,0	63,5
2000	67,4	71,6	71,6	68,8	67,0	71,6	68,9	65,3
4000	63,1	67,5	67,9	64,6	62,6	67,5	64,6	61,0
8000	54,8	60,3	61,3	56,2	54,0	60,0	56,6	53,7

Tabela 5.8 - Resultados das simulações em níveis de pressão sonora [dB(A)].

frequência [Hz]	Ensaio escritório 2 - fonte posição 1							
	mic1	mic2	mic3	mic4	mic5	mic6	mic7	mic8
125	54,2	47,0	45,8	48,3	55,6	48,9	49,5	45,9
250	62,9	55,2	53,6	55,6	63,8	57,0	57,6	52,8
500	68,4	61,3	59,4	61,2	69,4	62,5	63,2	58,4
1000	75,4	68,9	67,0	69,0	76,2	70,0	70,9	67,2
2000	77,6	71,1	69,1	71,1	78,3	72,1	73,0	69,5
4000	74,5	67,0	64,8	66,9	75,2	68,2	69,4	65,2
8000	69,3	60,2	57,3	59,1	70,0	61,6	63,2	56,9

Tabela 5.9 - Resultados das simulações em níveis de pressão sonora [dB(A)].

frequência [Hz]	ensaios escritório 2 - fonte posição 2							
	mic1	mic2	mic3	mic4	mic5	mic6	mic7	mic8
125	46.9	50.3	58.4	47.1	48.3	49.6	52.6	48.7
250	54.7	58.6	66.9	55.4	56.2	57.7	60.8	58.4
500	60.7	64.1	72.1	61.7	62.4	63.8	66.1	64.0
1000	68.1	71.5	79.1	69.1	69.6	70.7	73.5	71.5
2000	70.4	73.7	81.2	71.3	71.8	72.9	75.6	73.8
4000	66.3	70.3	78.3	67.6	68.0	69.3	72.5	70.7
8000	59.6	64.6	73.3	61.1	61.5	63.4	66.9	65.2

### 5.2.2 – Análise dos resultados

Os gráficos das Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam a diferença em nível de pressão sonora entre os resultados simulados através do programa Raynoise® e os experimentais.

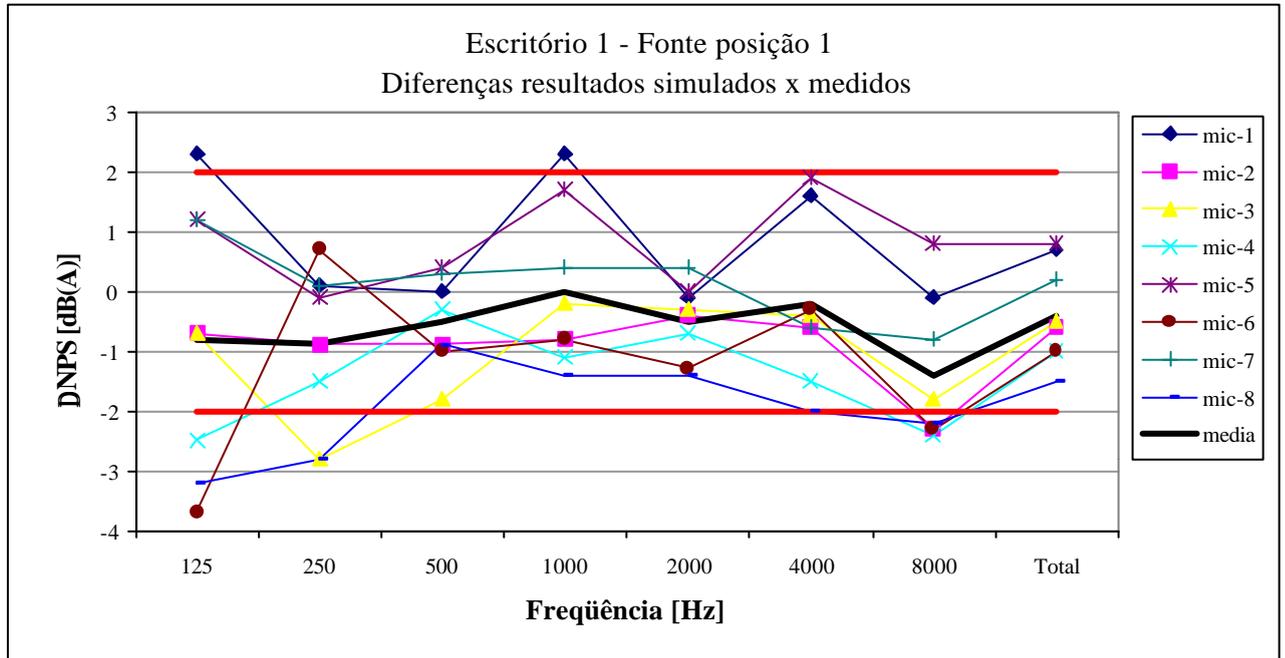


Figura 5.6 – Diferenças dos níveis de pressão sonora entre os resultados simulados e medidos [dB(A)].

Escritório 1 - fonte posição 1.

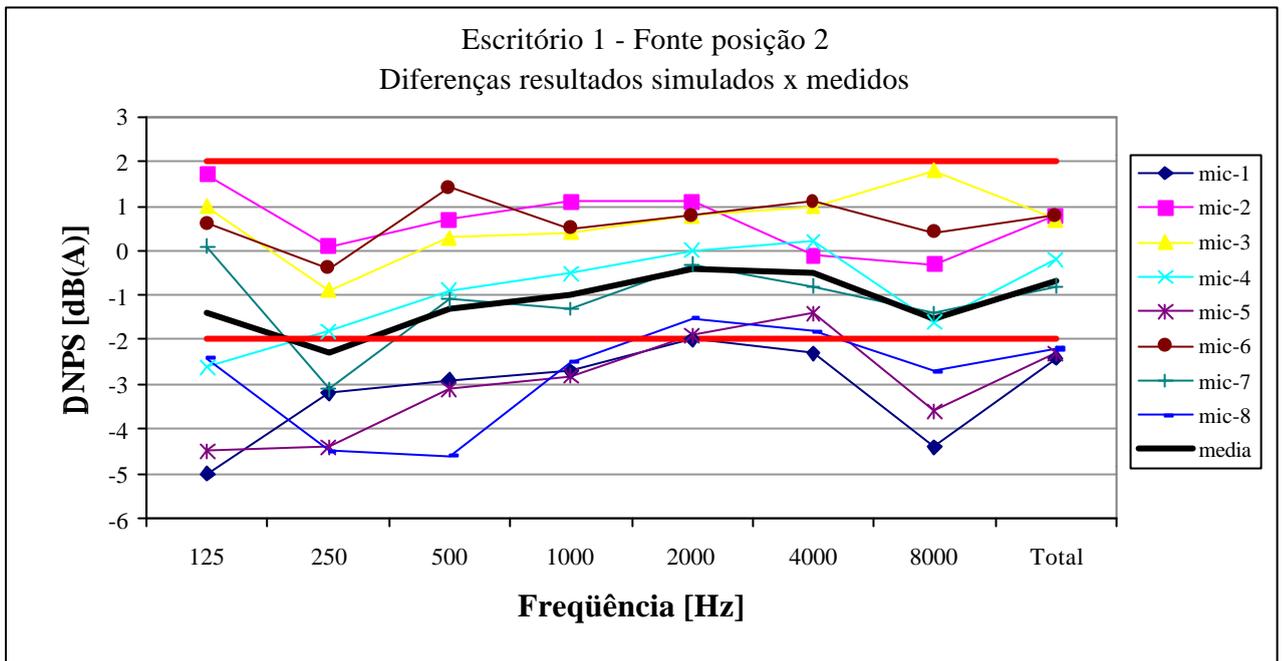


Figura 5.7 - Diferenças dos níveis de pressão sonora entre os resultados simulados e medidos [dB(A)].  
Escritório 1 - fonte posição 2.

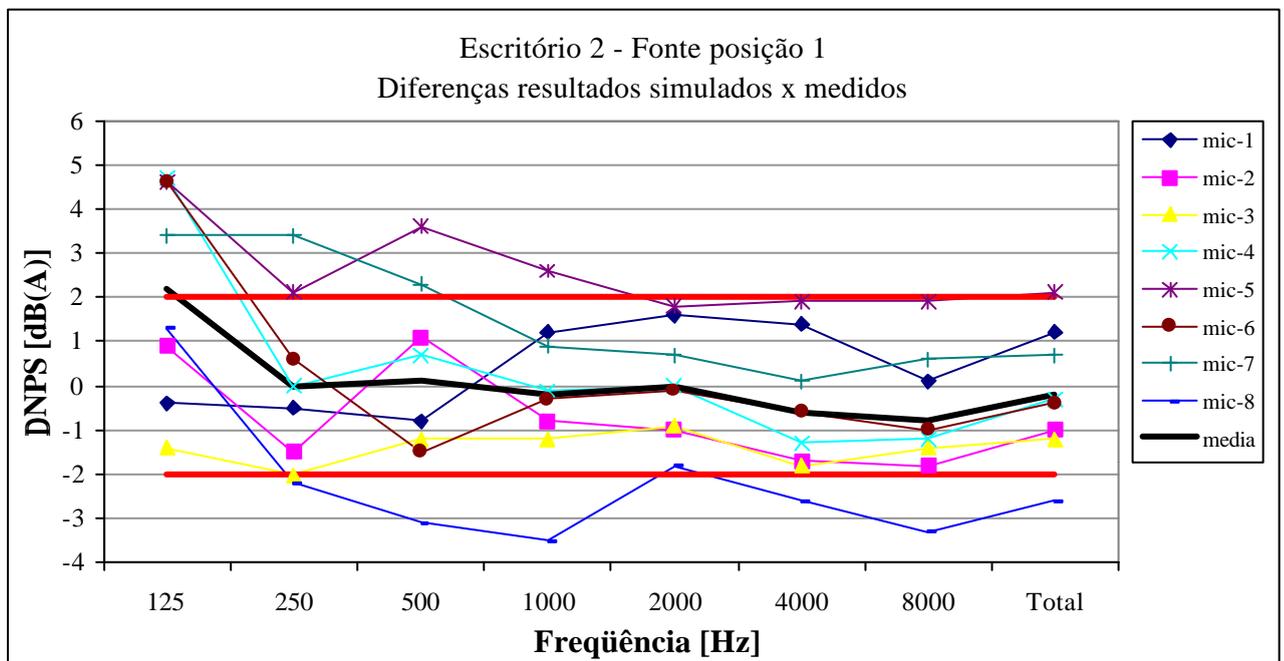


Figura 5.8 - Diferenças dos níveis de pressão sonora entre os resultados simulados e medidos [dB(A)].  
Escritório 2 - fonte posição 1.

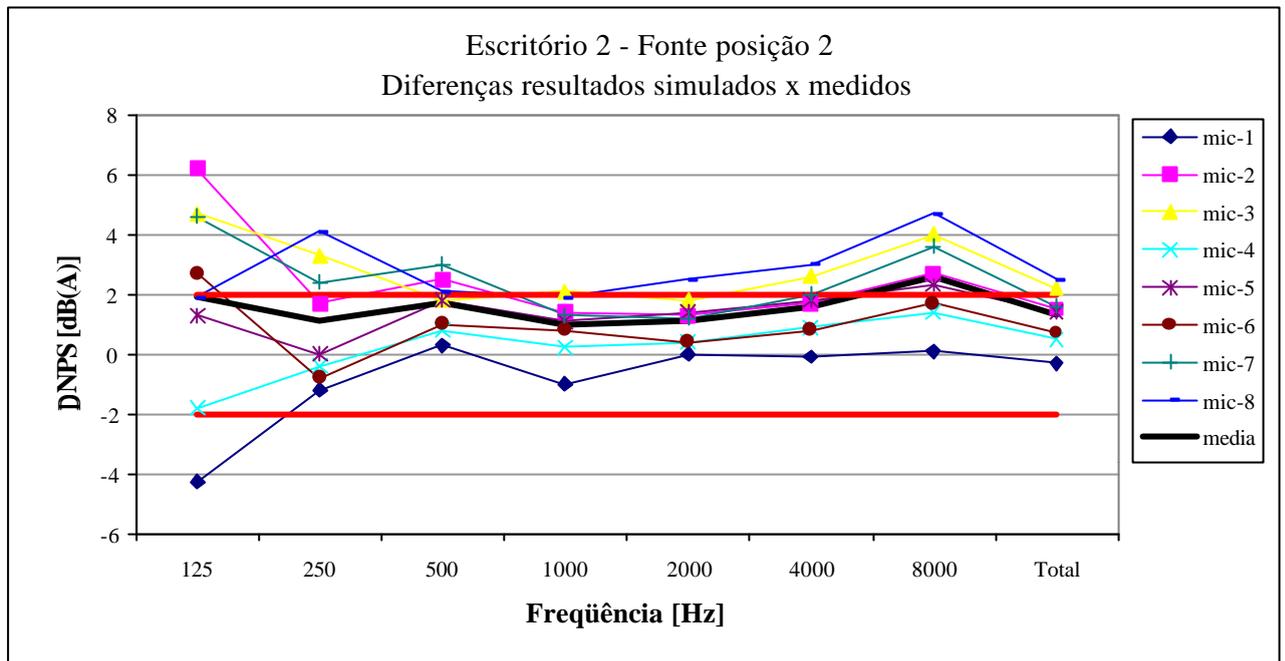


Figura 5.9 - Diferenças dos níveis de pressão sonora entre os resultados simulados e medidos [dB(A)].

Escritório 2 - fonte posição 2.

Nesta etapa, procurou-se adotar o mesmo critério de convergência usado para a análise dos resultados dos testes preliminares. Este critério estipula que a diferença entre os valores simulados e experimentais devem ficar na média na faixa de  $\pm 1$ dB e nenhum ponto deve ficar fora da faixa de  $\pm 2$  dB. Porém, como os valores dos coeficientes de absorção dos materiais foram mantidos iguais para os dois ambientes, o melhor ajuste obtido mostra erros superiores a 4 dB em alguns pontos de medição para frequências de 125 Hz e 8000 Hz.

Entretanto, decidiu-se por este ajuste pois os valores adotados para absorção dos materiais estavam de acordo com a literatura disponível. Outro fator preponderante é o fato que, na faixa de frequência da influência da fala, entre 250 a 4000 Hz, pode-se notar que os erros são minimizados. Exceto em alguns pontos do escritório 2, o critério adotado de variações médias inferiores a 1 dB, em valor absoluto, pode ser considerado com o atingido.

### **5.3 – Conclusões**

No que diz respeito a comparação entre os resultados experimentais e simulados, pode-se dizer que há uma concordância satisfatória dos valores, considerando o critério de variações médias inferiores a 1dB, em valor absoluto, para a faixa de frequência de 250 a 4000 Hz.

Apesar da diferença de alguns pontos apresentarem valores acentuados em certas posições, estas diferenças ocorreram de forma aleatória, não caracterizando nenhuma faixa de frequência específica. Deste modo, os valores finais dos coeficientes de absorção para os 32 pontos analisados serão considerados como referência para a análise paramétrica apresentada no capítulo 6.

### **5.4 – Sumário**

Este capítulo apresentou o estudo de ambientes panorâmicos reais, para o qual dois escritórios da Empresa Brasileira de Compressores - Embraco S.A foram escolhidos como ambientes de referência, com o propósito de obterem-se valores dos coeficientes de absorção que compõem um escritório típico.

Os ensaios experimentais tiveram início com o levantamento das dimensões físicas dos espaços e dos mobiliários, assim como dos materiais de acabamento. De posse destes dados, simulações numéricas foram implementadas sendo, primeiramente, definidos os dados de entrada e aplicadas as condições de contorno.

Por último, na análise dos resultados, de acordo com o critério de convergência adotado, constatou-se que uma boa concordância dos valores dos coeficientes de absorção dos modelos simulados e experimentais foi atingida para a grande maioria dos pontos.

## Capítulo 6

# ANÁLISE PARAMÉTRICA COMPUTACIONAL

O presente capítulo apresenta simulações numéricas de um escritório panorâmico idealizado, composto por 64 estações de trabalho distribuídas de forma simétrica em um ambiente sem paredes.

Uma fonte sonora foi posicionada na estação central das 64 estações permitindo que análises comparativas entre esta estação e demais estações de trabalho em diversas posições fossem implementadas. Assumindo-se a fala como principal fonte sonora nestes ambientes, para cada estação receptora foram avaliadas sua influência e de nove outros parâmetros de projeto de escritórios panorâmicos.

Por fim, são discutidos os resultados das análises.

### 6.1 – Objetivo

Via de regra, os ambientes panorâmicos são compostos de várias unidades modulares, ou seja, o ambiente pode ser dividido em diversos módulos idênticos, dispostos de forma simétrica. Cada um destes módulos representa uma estação de trabalho com iguais características acústicas. Entretanto, a simulação da distribuição do campo acústico em grandes escritórios apresentada pela bibliografia pesquisada relata apenas simulações de estações adjacentes separadas por barreiras de meia altura. Estas simulações podem ser descritas basicamente como uma ou mais fontes situadas em uma estação. São calculados índices de avaliação de privacidade e inteligibilidade, tais como STI, AI, nível de pressão sonora, entre outros, na altura do ouvinte posicionado numa estação adjacente. São relatados casos de barreiras, que podem ser inteiriças ou parciais, e também estações próximas a planos refletores, tais como paredes ou janelas. Porém, não há relatos da contribuição de estações mais afastadas, ou mesmo de estações de trabalho adjacentes onde não há separação por barreiras. Esta lacuna é crítica, pois atualmente é comum observar ambientes onde as barreiras só delimitam um ou dois lados da estação de trabalho, permitindo exposição direta entre as estações.

De acordo com o estudo bibliográfico, são diversos os parâmetros de projeto que influenciam a acústica de um ambiente panorâmico, tais como, absorção e disposição dos materiais de acabamento, posicionamento das estações de trabalho, e outros.

Com base nestas observações, o objetivo deste trabalho é estender a análise, agregando a influência de estações mais afastadas e verificando a intrusão da fala em estações adjacentes onde não há separação por barreiras.

Para conclusão da proposta, um escritório panorâmico composto por 64 estações de trabalho foi idealizado. Uma fonte sonora, a fala, localizada em uma estação central deste ambiente e a adoção de diferentes variáveis de projeto, apontados como relevantes pelo estudo bibliográfico, foram tomados como parâmetros para este estudo. Análises comparativas entre a estação central e estações em diferentes posições, permitiram analisar a relevância da influência da fala e de cada parâmetro de projeto na inteligibilidade e privacidade de estações contíguas e afastadas, proporcionando uma visão ampla de um ambiente panorâmico.

## **6.2 – Descrição da Sala e Parâmetros Simulados**

De forma a representar a propagação da energia sonora entre estações de trabalho, as simulações foram feitas para um escritório idealizado, com 64 estações de trabalho distribuídas de forma simétrica. Conforme descrito no item 5.1, a definição das dimensões, espaçamento e distribuição do mobiliário e material de acabamento de todo o ambiente foram feitas com base no levantamento de escritórios panorâmicos reais. Assim, o escritório idealizado tem como referência os mesmos valores dos coeficientes de absorção, perda de transmissão e móveis distribuídos iguais aos encontrados nos escritórios reais medidos. A partir deste conjunto de variáveis, alterações eram introduzidas, produzindo os resultados para a análise da influência dos diversos parâmetros.

De modo semelhante ao processo utilizado para a construção de modelos anteriores, uma malha de elementos foi construída através do pré-processador do programa Ansys® e transferida para o programa Raynoise®. Estabelecidas as condições de contorno, os dados de entrada, o posicionamento da fonte sonora e dos pontos receptores, o modelo representando este escritório foi concluído e pode ser visualizado na Figura 6.1.

RAYNOISE - GEOMETRICAL ACOUSTICS MODELING

Modelo Normal

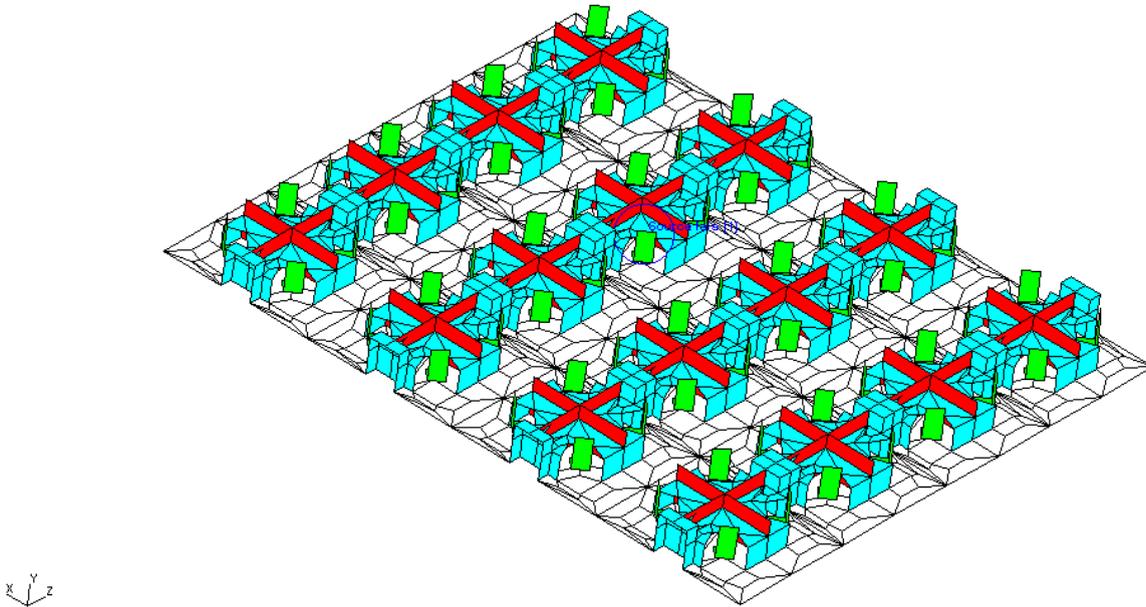


Figura 6.1 - Modelo construído através do programa Raynoise® para um escritório idealizado com 64 estações de trabalho.

Legenda: cor vermelha: divisórias  
cor azul : mesas e móveis  
cor verde : cadeiras

Escolheu-se a fala como principal fonte sonora, uma vez que é considerada como a mais importante fonte de ruído dentro de um escritório panorâmico e principal responsável pela falta de privacidade e inteligibilidade entre as estações. A localização da fonte sonora, posicionada na estação central das 64 estações de trabalho, foi determinada de modo que análises comparativas pudessem ser feitas com estações de trabalho em diferentes posições, considerando-se estações próximas e afastadas, frontais e posteriores, adjacentes ou não.

Devido à natureza direcional da fala, a fonte sonora foi simulada como uma fonte semi-esférica, orientada de acordo com o orador sentado com a face voltada para dentro da estação. O posicionamento da fonte em relação à estação de trabalho corresponde à altura de uma pessoa sentada trabalhando à mesa, ou seja, 110 cm em relação ao piso e equidistante das barreiras que compõe sua estação, como mostra a Figura 6.2.

De modo semelhante ao orador, o ouvinte foi considerado como uma pessoa sentada, a 110 cm do piso, e em posição equidistante das barreiras que compõem sua estação de trabalho.

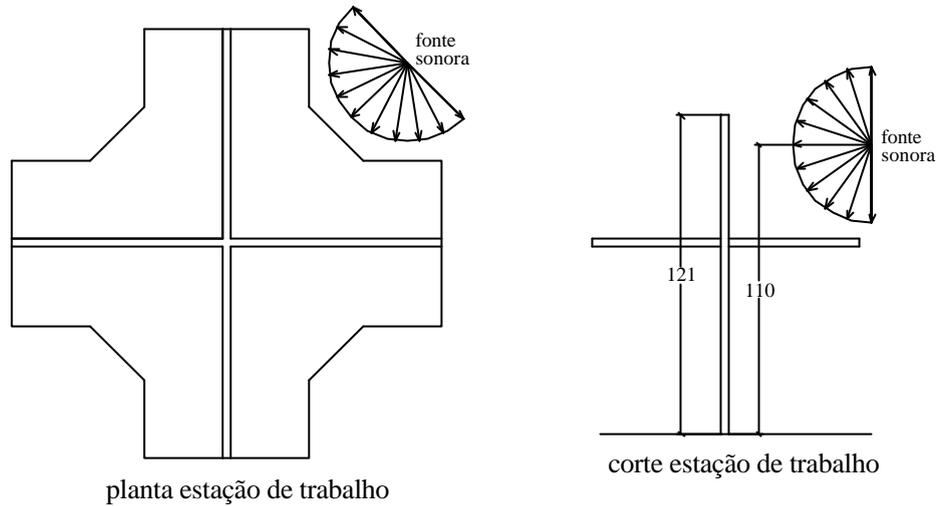


Figura 6.2 - Posição e direção da fonte sonora em relação à estação de trabalho para o escritório idealizado.

Tabela 6.1 - Espectro de potência sonora da fala [31].

freqüência [HZ]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
potência	62	64	64	60	55	35	2

O contorno do espaço foi deixado em aberto de forma a desconsiderar a influência das reflexões das paredes. Com isto, procurou-se minimizar o efeito do tamanho do escritório, já que o objetivo do estudo é a contribuição entre estações, favorecendo também a generalidade da análise, podendo esta ser adequada a escritórios panorâmicos bem maiores que o proposto pela simulação.

O escritório padrão foi determinado com base nos materiais e disposição do mobiliário encontrado em escritórios reais. Como estes escritórios reais já empregam certas soluções acústicas, tais como forro e barreiras com absorção, algumas variáveis foram resgatadas da bibliografia disponível. Assim, o escritório-padrão tem forro e barreiras com absorção bem menores que os medidos, porém, os demais aspectos, tais como perda de transmissão, espaçamento entre estações,

acabamento do piso e materiais que compõe o mobiliário são idênticos aos dos escritórios reais. Outra diferença entre o modelo de 64 estações e os modelos utilizados no capítulo 5, é a introdução de absorção relativa à presença de pessoas na sala. As pessoas foram representadas como sentadas em cada estação de trabalho através da construção de duas áreas num total de 1,5 metros quadrados. A essas áreas foram atribuídos coeficientes de absorção de modo que o produto entre o coeficiente de absorção e a área fosse equivalente aos valores encontrados na literatura. Para este estudo foram escolhidos nove parâmetros de projeto, considerados relevantes na composição de um espaço panorâmico. Os nove parâmetros são agrupados em três conjuntos, a saber:

### 1) Barreiras:

Todas as alterações nas dimensões e acabamento das barreiras foram feitas em relação às dimensões padrão, originando novos valores de altura e de absorção. A Figura 6.3 ilustra estes parâmetros.

- a altura entre a mesa e o final da barreira foi duplicado → barreira alta
- a altura entre a mesa e o final da barreira foi reduzido pela metade → barreira baixa
- a altura entre o piso e a mesa foi reduzido pela metade → semi-barreira
- altura da barreira padrão e o acabamento foram mantidos os mesmos, com a aplicação de uma faixa de 15 cm de material muito absorvente na parte superior → barreira com faixa absorvente

### 2) Absorção:

Três situações relacionadas à absorção dos materiais de acabamento encontrados nos escritórios reais medidos foram consideradas:

- piso carpetado → piso com absorção
- forro com material absorvedor → forro com absorção
- barreira revestida com material de maior absorção → barreira com absorção

### 3) Espaçamento:

Do mesmo modo, as alterações nos espaçamentos entre as estações de trabalho foram feitas em relação ao escritório padrão, originando novos padrões de estações. Foram considerados dois aspectos relacionados ao espaçamento do mobiliário:

- o espaço livre entre as estações foi duplicado → estações afastadas
- o espaço livre entre as estações foi reduzido ao mínimo possível → estações próximas

A Figura 6.4 ilustra estes parâmetros.

Nas duas situações o mobiliário foi mantido o mesmo, tanto o número e disposição de armários e cadeiras, quanto as dimensões das mesas e barreiras.

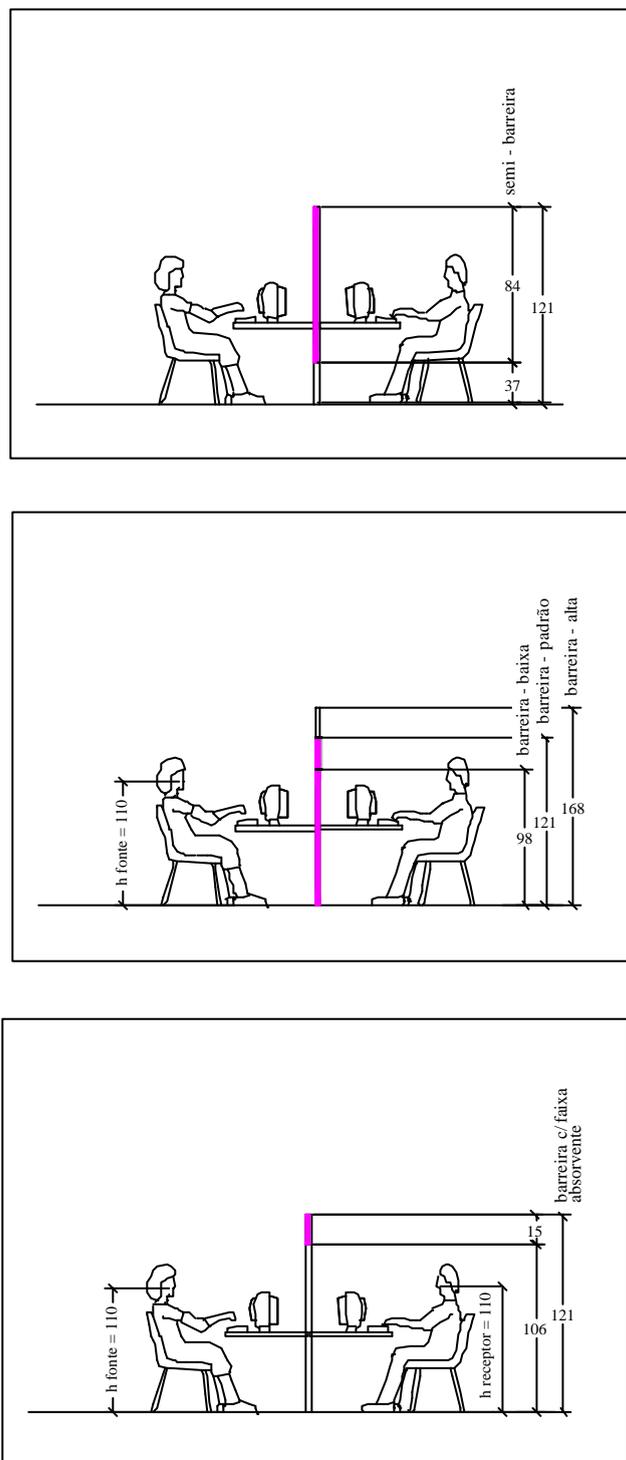


Figura 6.3 – Variações nas dimensões da barreira padrão.

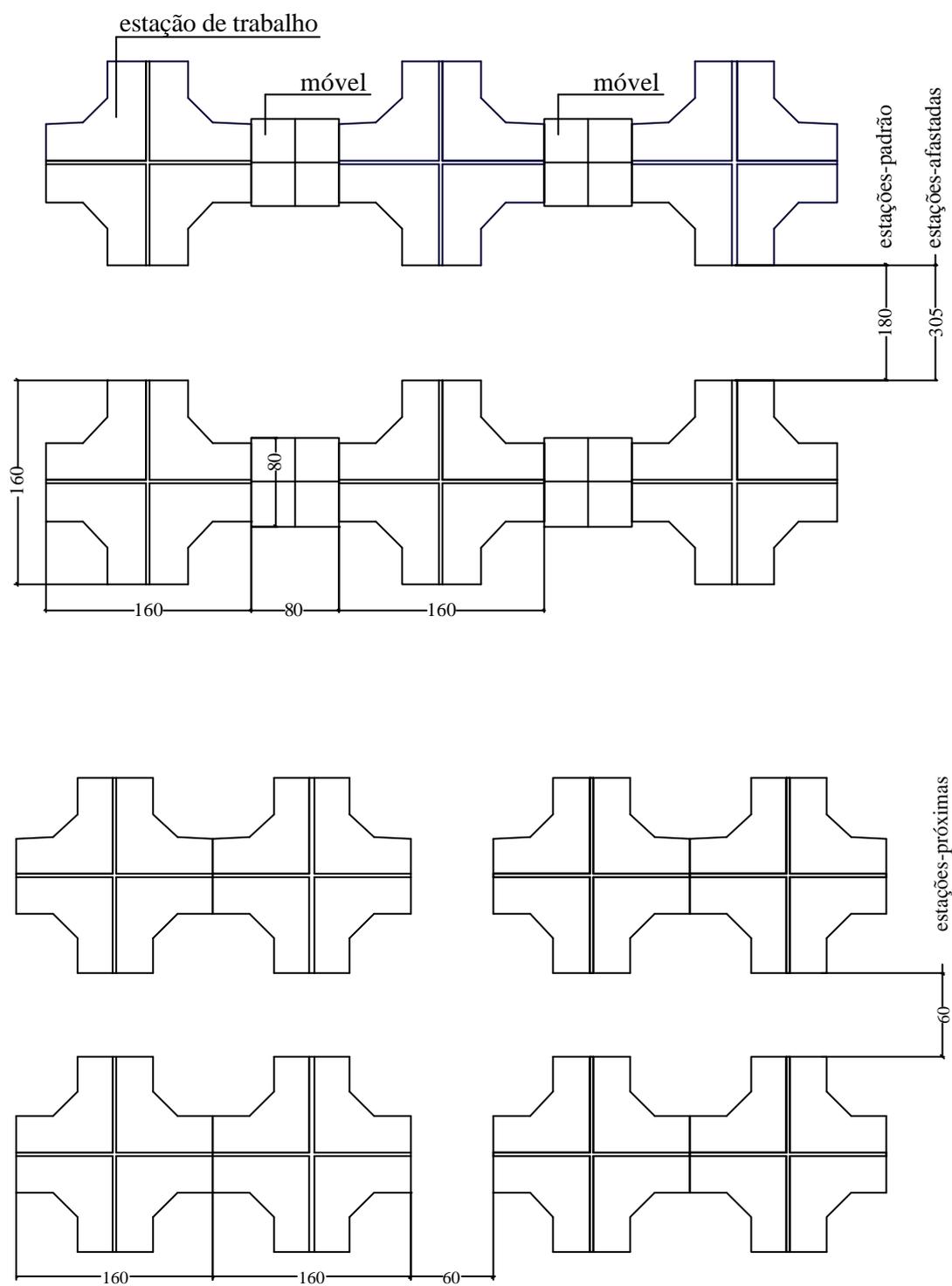


Figura 6.4 – Variações nos espaçamentos entre as estações de trabalho.

Alguns autores mencionam a influência da perda de transmissão das barreiras como fator importante a um bom desempenho acústico de escritórios panorâmicos [26], enquanto outros afirmam que seu papel é super valorizado [4,19,24]. Durante o estudo dos escritórios reais, percebeu-se que os valores de perda de transmissão das barreiras não são influentes na determinação do campo acústico gerado por uma fonte aerodinâmica, a menos que se usem valores atípicos, próximos de zero. As simulações preliminares no escritório idealizado confirmam a mesma tendência, ou seja, mesmo alterando-se estes valores de maneira significativa, sua contribuição às diferenças encontradas nas respostas calculadas eram marginais. Por este motivo, a perda de transmissão das barreiras não foi estudada, adotando-se para todos os modelos os valores encontrados no escritório padrão.

A análise das simulações para as diversas estações de trabalho foram feitas em bandas de oitava, para as frequências centrais de 125 a 4000 Hz, que correspondem à faixa de frequência da fala.

Os valores dos coeficientes de absorção do escritório padrão e dos parâmetros de projeto determinados para a análise paramétrica são apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3.

Tabela 6.2 - Valores dos coeficientes de absorção ( $\alpha$ ) utilizados para situação padrão.

Acabamentos	<b>a - coeficiente de absorção</b>					
	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
Piso - paviflex	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Forro - gesso	0,25	0,10	0,06	0,05	0,04	0,4
Móveis - fórmica	0,18	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04
Cadeiras (inclui pessoas)	0,06	0,13	0,15	0,15	0,18	0,15
Barreiras - fórmica	0,18	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04

Tabela 6.3 - Valores dos coeficientes de absorção ( $\alpha$ ) utilizados para diferentes simulações.

Acabamentos	<b>a - coeficiente de absorção</b>					
	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
Piso - carpete	0,15	0,25	0,50	0,56	0,55	0,65
Forro absorvente (valores iguais a Tabela 6.2)	0,57	0,72	0,70	0,56	0,55	0,65
Móveis – fórmica (valores iguais a Tabela 6.2)	0,18	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04
Cadeiras	0,06	0,13	0,15	0,15	0,18	0,15
Barreiras - mais absorção	0,25	0,25	0,15	0,29	0,30	0,35
Barreiras - topo absorvente	0,11	0,21	0,48	0,71	0,86	0,94
- restante barreira	0,18	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04

A seguir, os resultados são apresentados

### 6.3 – Resultados das Simulações em NPS

Os resultados das simulações são apresentados em forma de curvas que representam os diversos parâmetros e são mostradas em comparação com a situação-padrão. Procurou-se agrupar as estações de trabalho receptoras e os respectivos gráficos conforme mostrado na Figura 6.5, considerando-se a distância e posicionamento destas estações em relação à estação central, onde está localizada a fonte sonora. Desta forma, evita-se a repetição de comentários e facilita-se uma análise global.

A cada estação receptora, na posição de um ouvinte sentado, foi calculada a resposta ao campo gerado pela fonte. As respostas foram calculadas em níveis de pressão sonora (NPS) e em índice de transmissão sonora (STI) (ver apêndice III). As difrações nas barreiras que circundam a fonte foram consideradas, bem como a perda de transmissão de todas as barreiras.

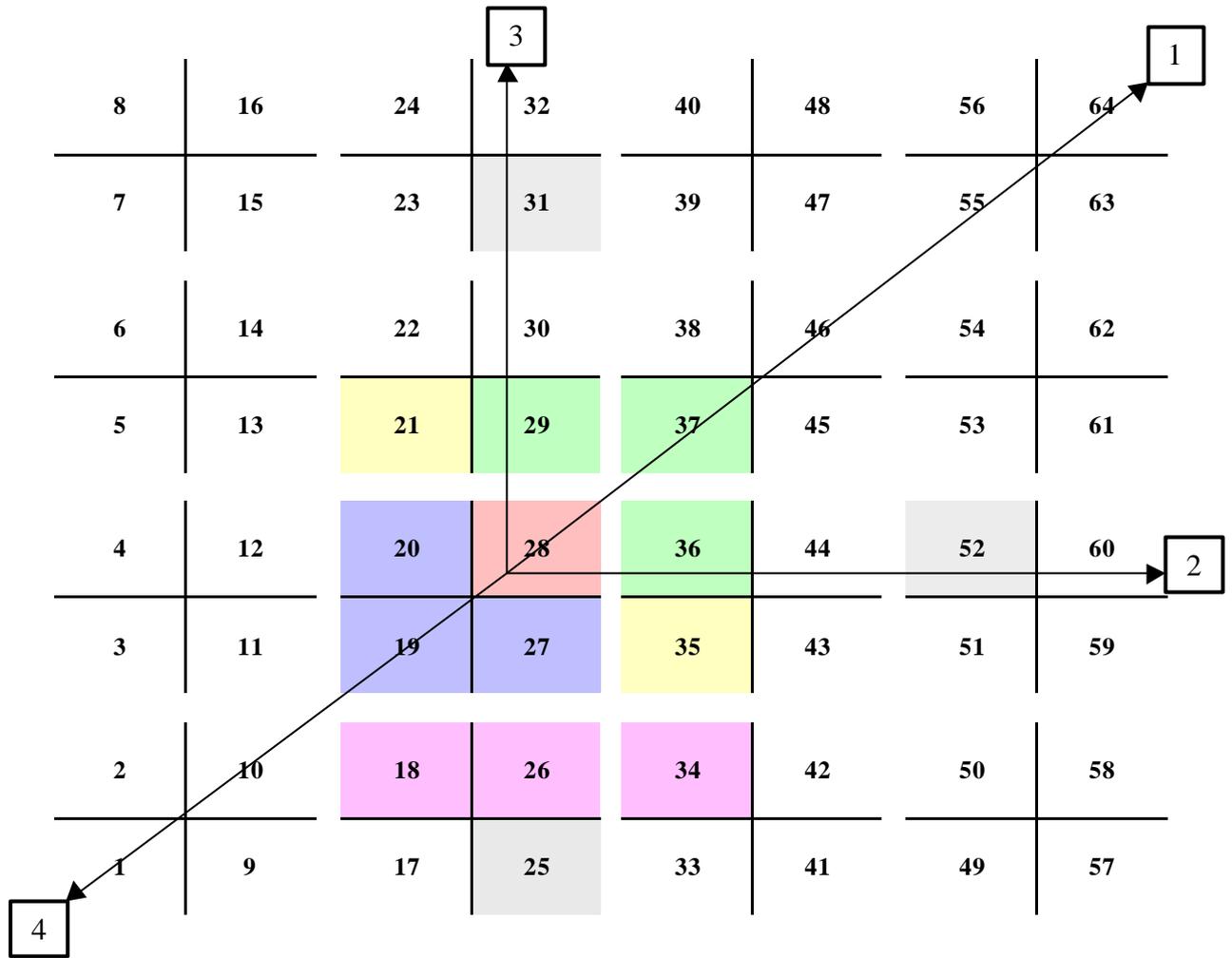


Figura 6.5 – Planta esquemática escritório panorâmico com 64 estações.

- Estação central (fonte sonora)
- Grupo 1 – exposição visual direta → estações 29,36,37.
- Grupo 2 – estações adjacentes frontais delimitadas por barreiras em comum → estações 19, 20, 27.
- Grupo 3 – estações adjacentes com exposição semi-direta → estações 21, 35.
- Grupo 4 – estações frontais → estações 18, 26, 34.
- Grupo 5 – estações afastadas → estações 25, 31, 52.

→ Linhas de decaimento sonoro.

**Grupo 1 – Estações 29, 36, 37 – [NPS]**

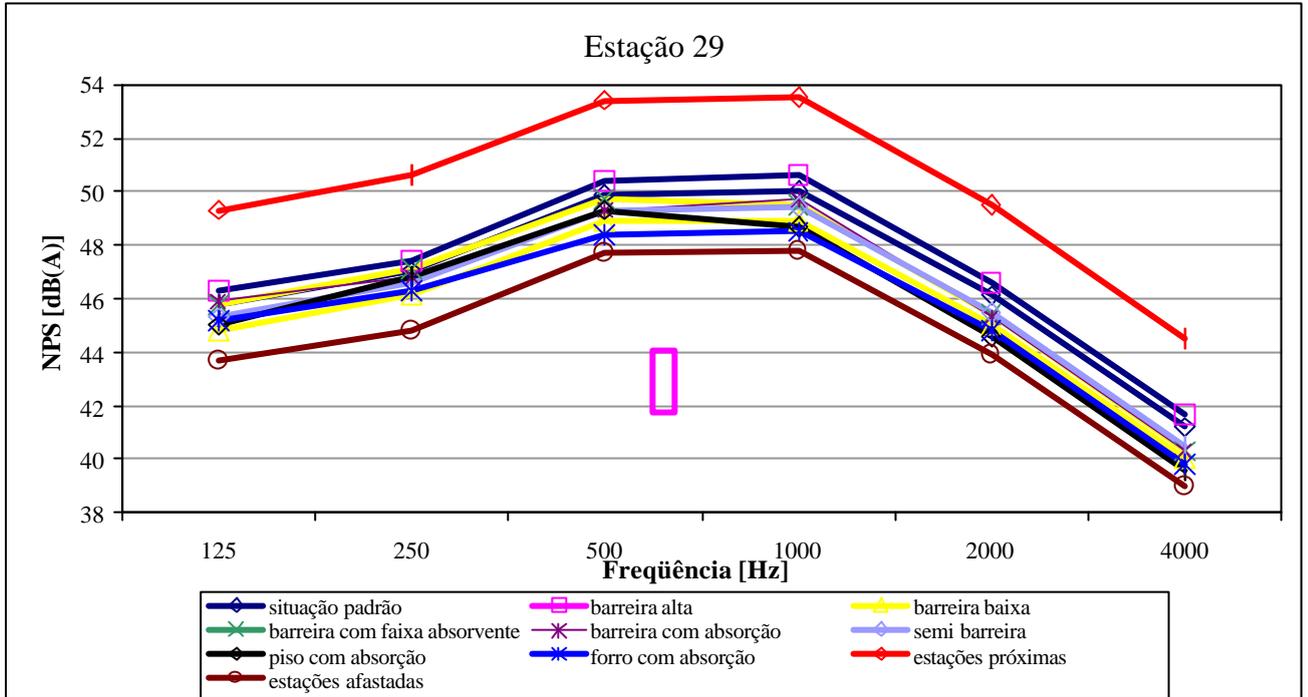


Figura 6.6 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 29.

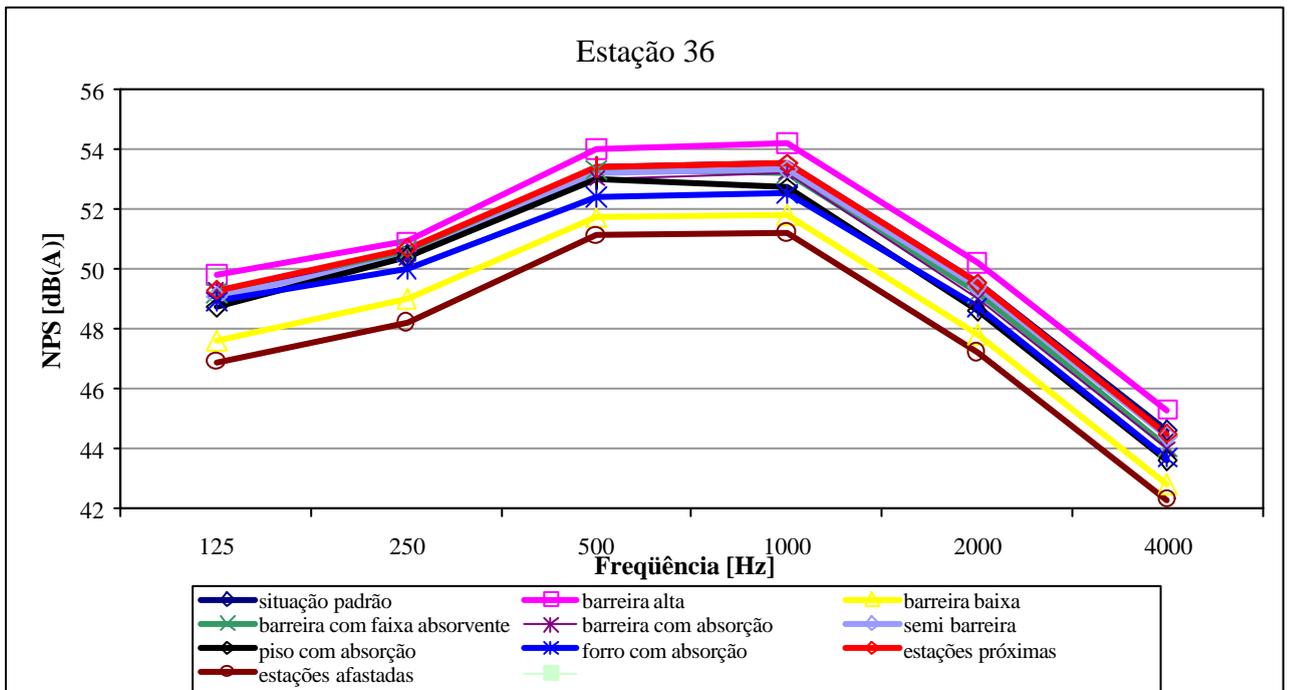


Figura 6.7 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 36.

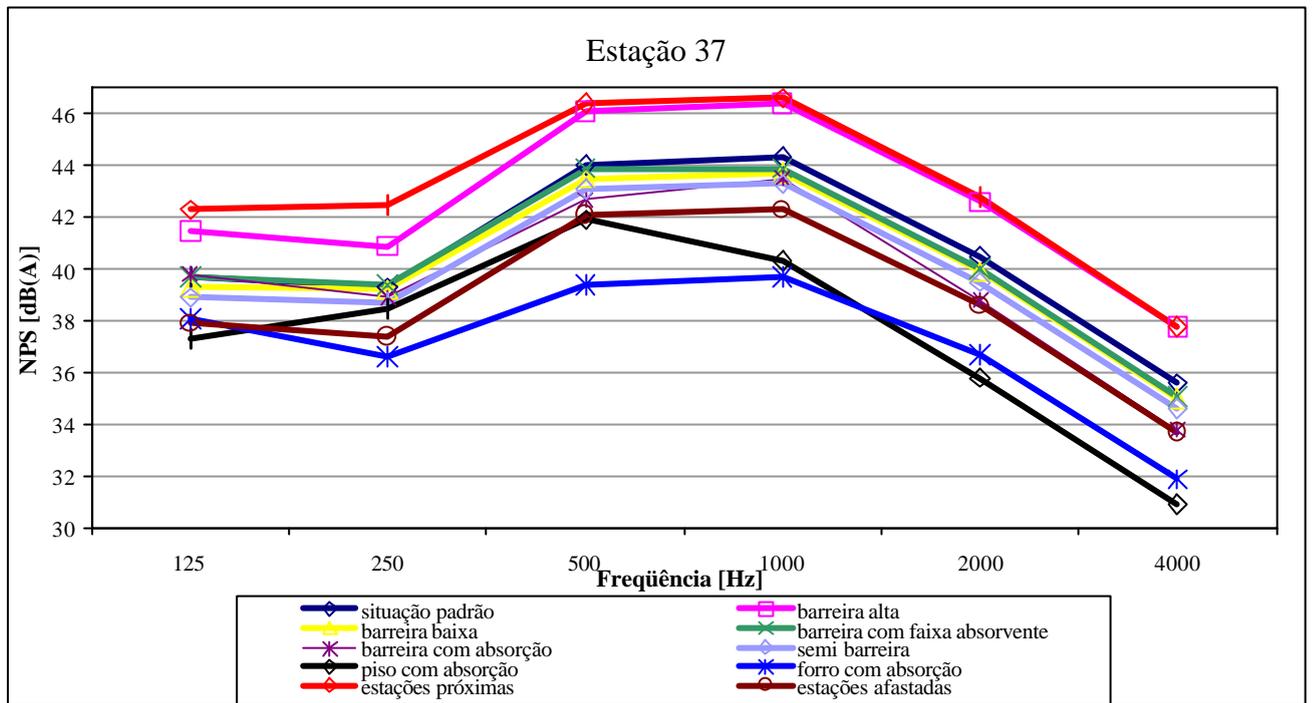


Figura 6.8 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 37.

**Grupo 2 – Estações 19, 20, 27 – [NPS]**

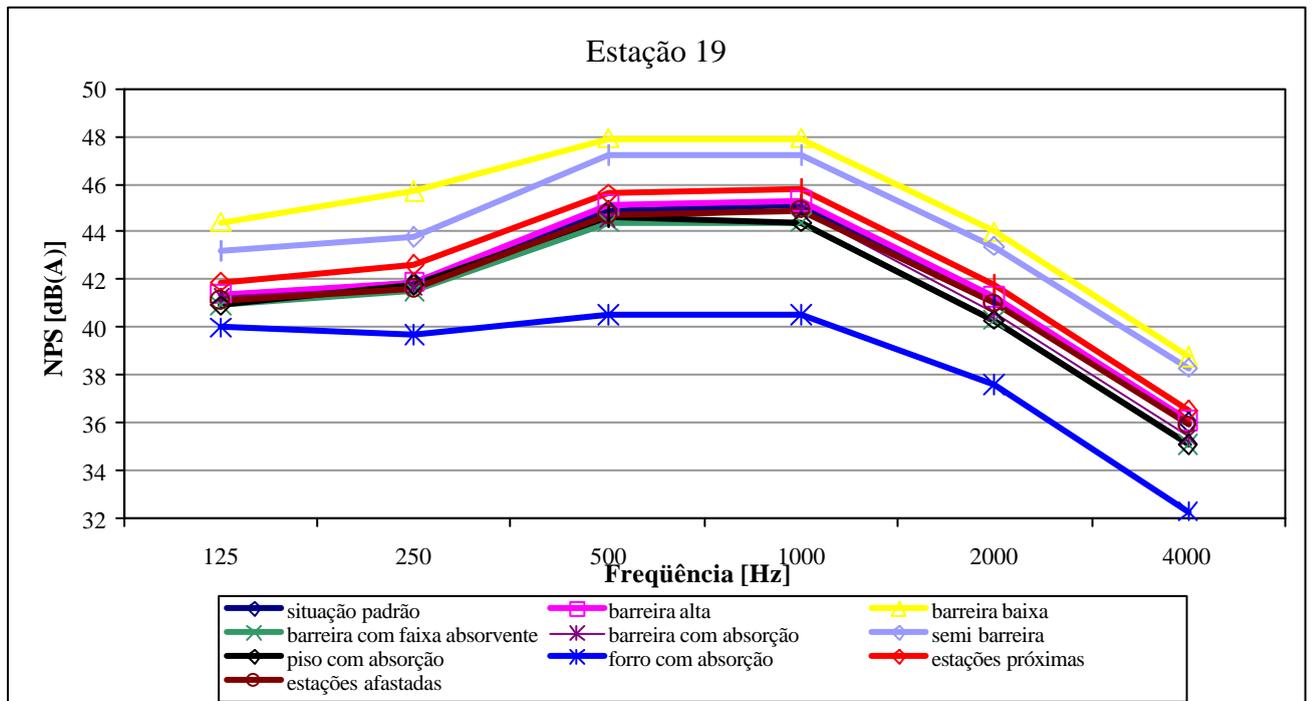


Figura 6.9 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 19.

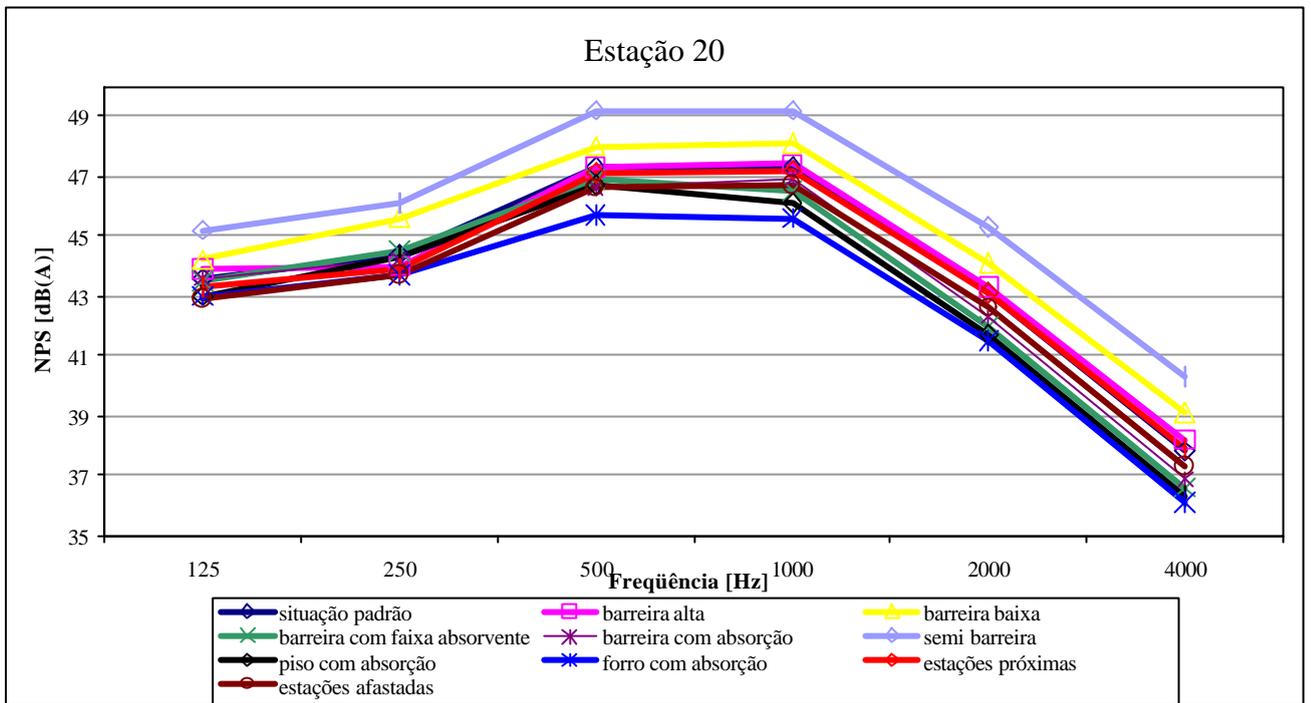


Figura 6.10 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 20.

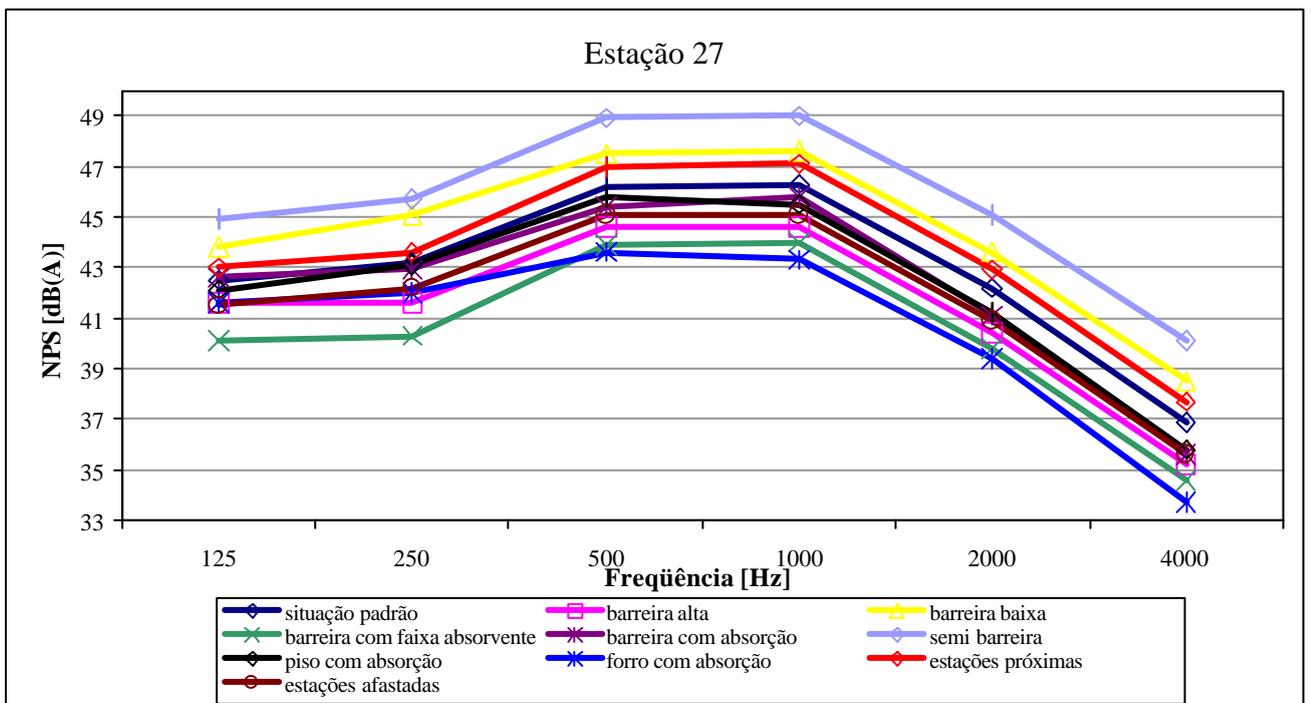


Figura 6.11 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 27.

**Grupo 3 – Estações 21, 35 – [NPS]**

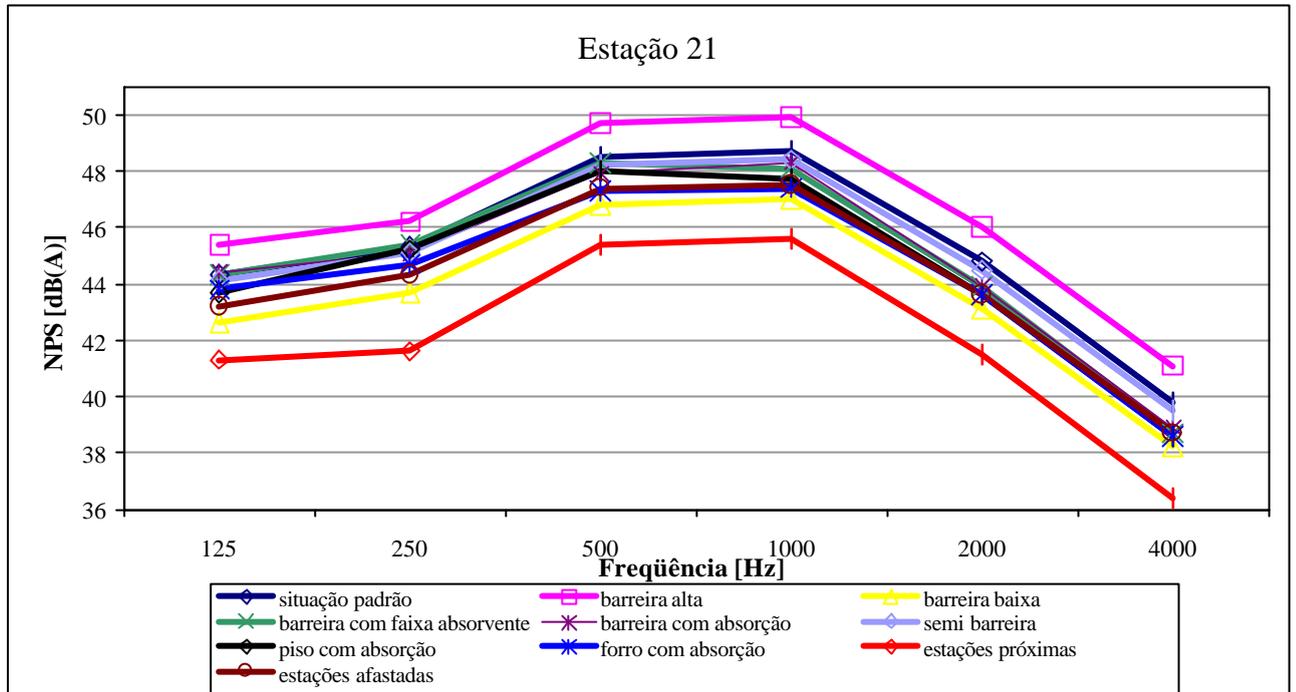


Figura 6.12 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 21.

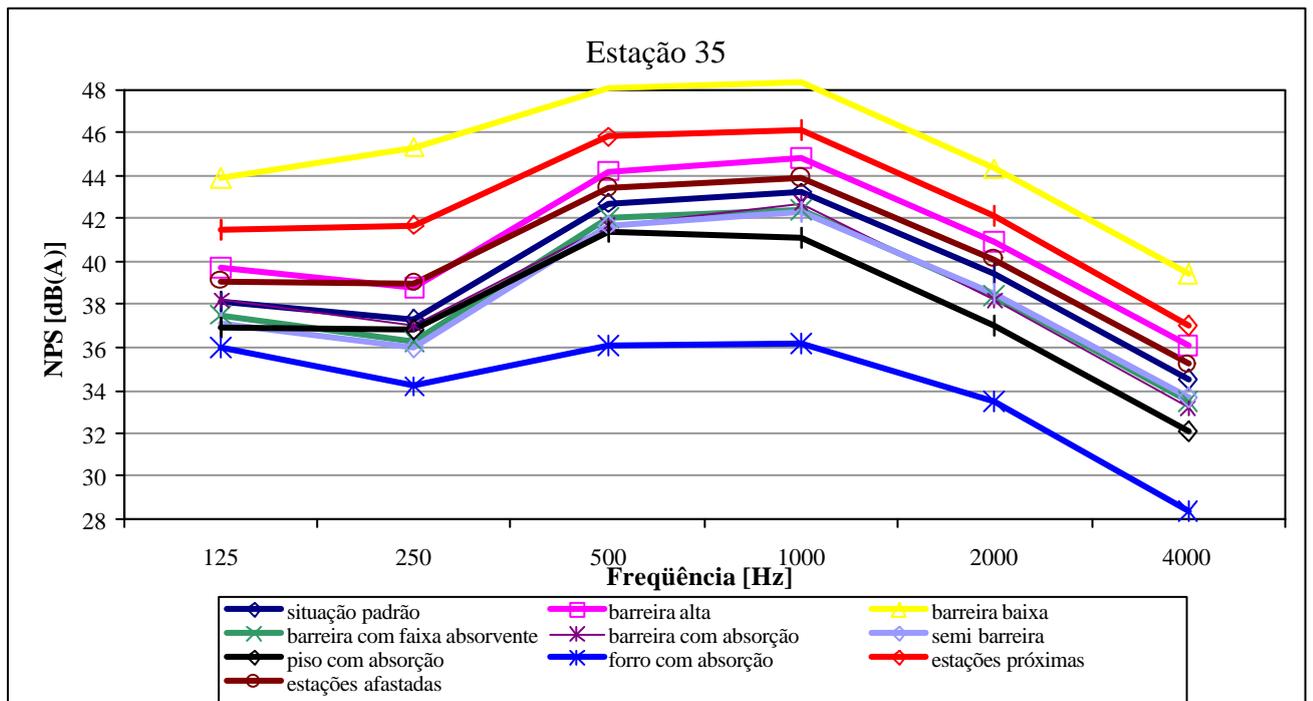


Figura 6.13 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 35.

**Grupo 4 – Estações 18, 26, 34 – [NPS]**

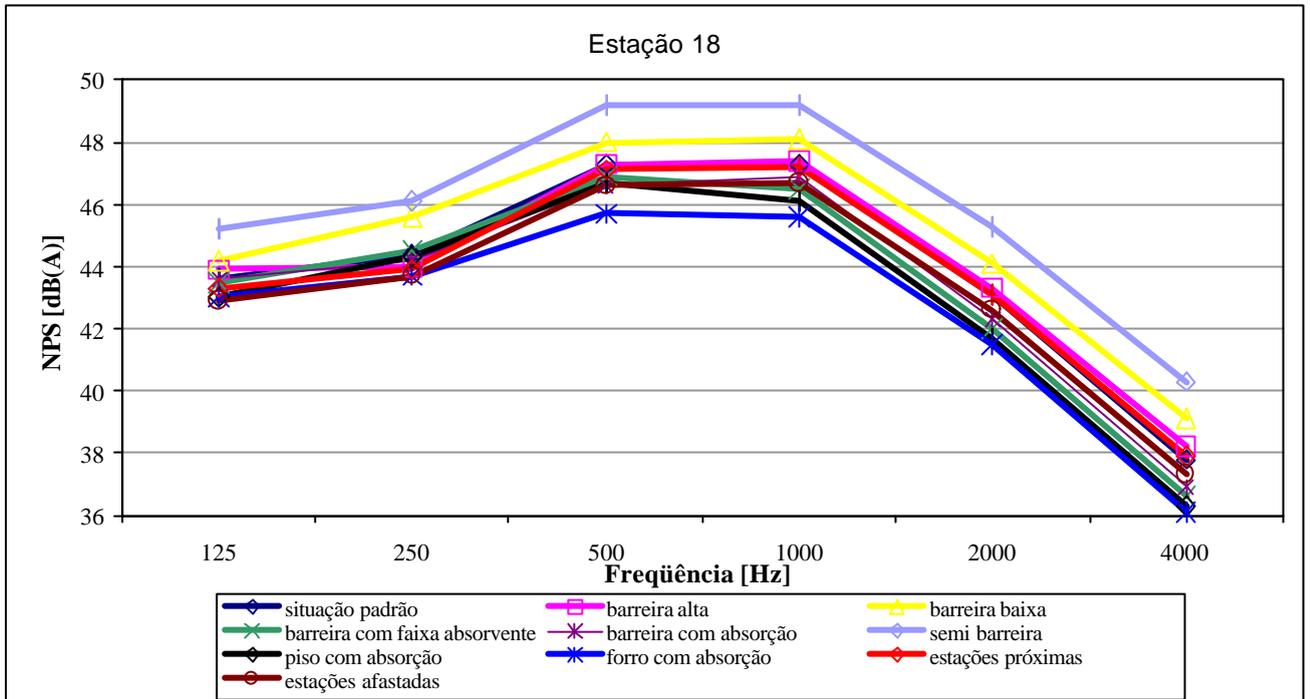


Figura 6.14 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 18.

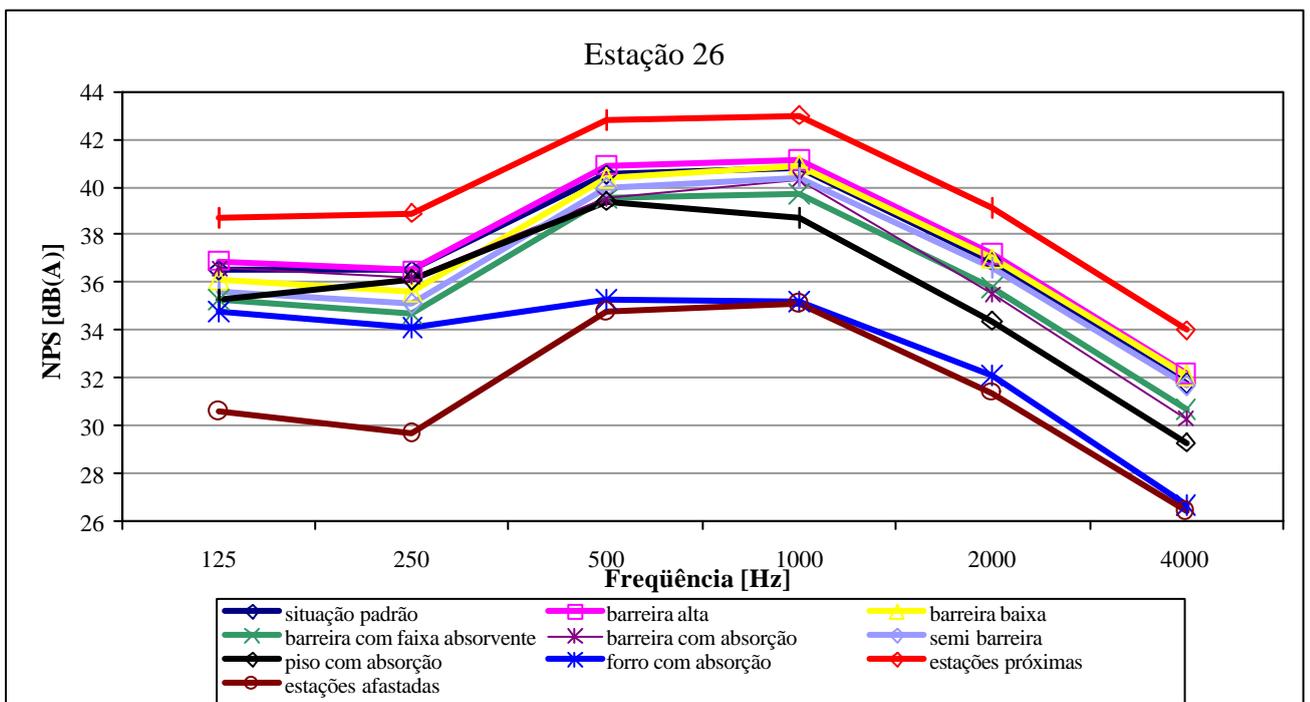


Figura 6.15 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 26.

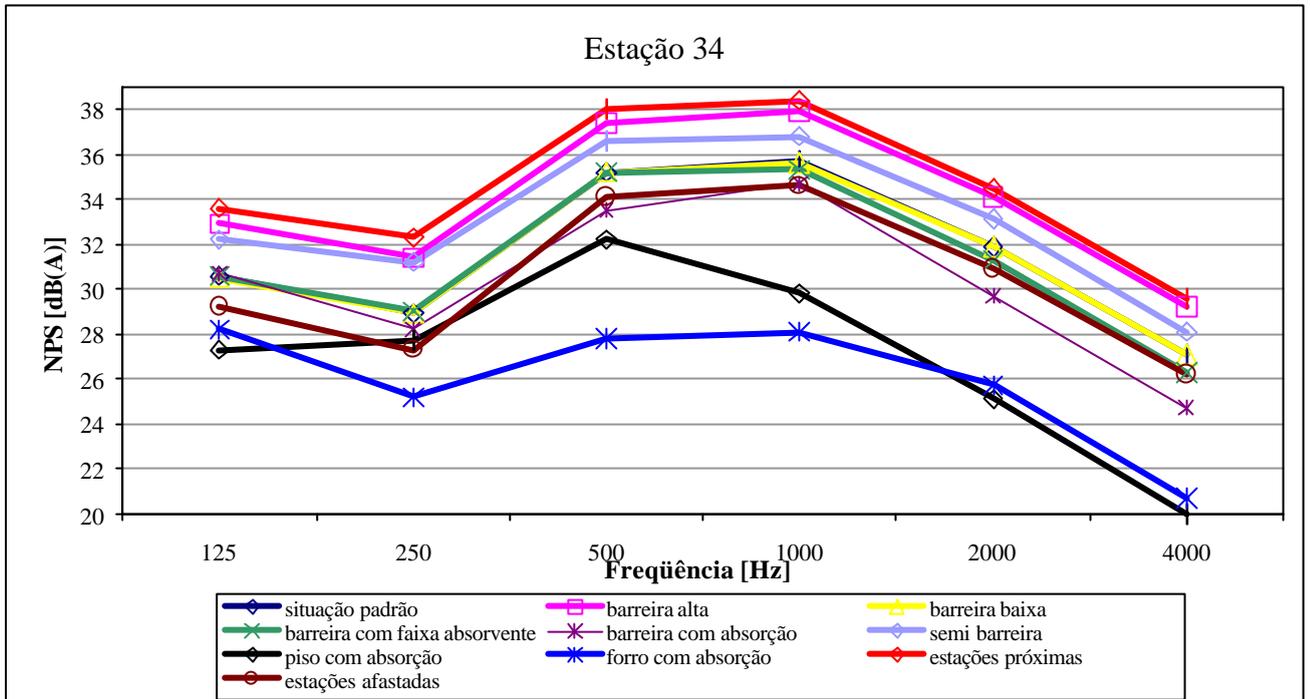


Figura 6.16 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 34.

**Grupo 5 – Estações 25, 31, 52 – [NPS]**

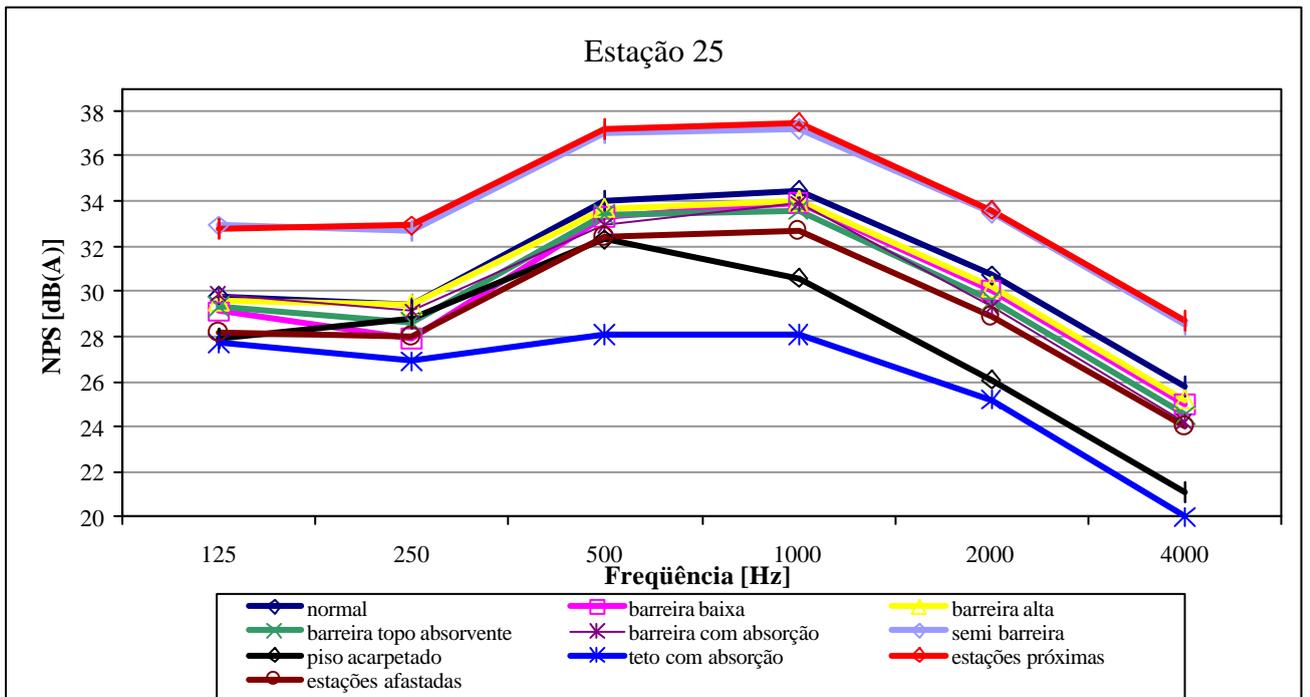


Figura 6.17 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 25.

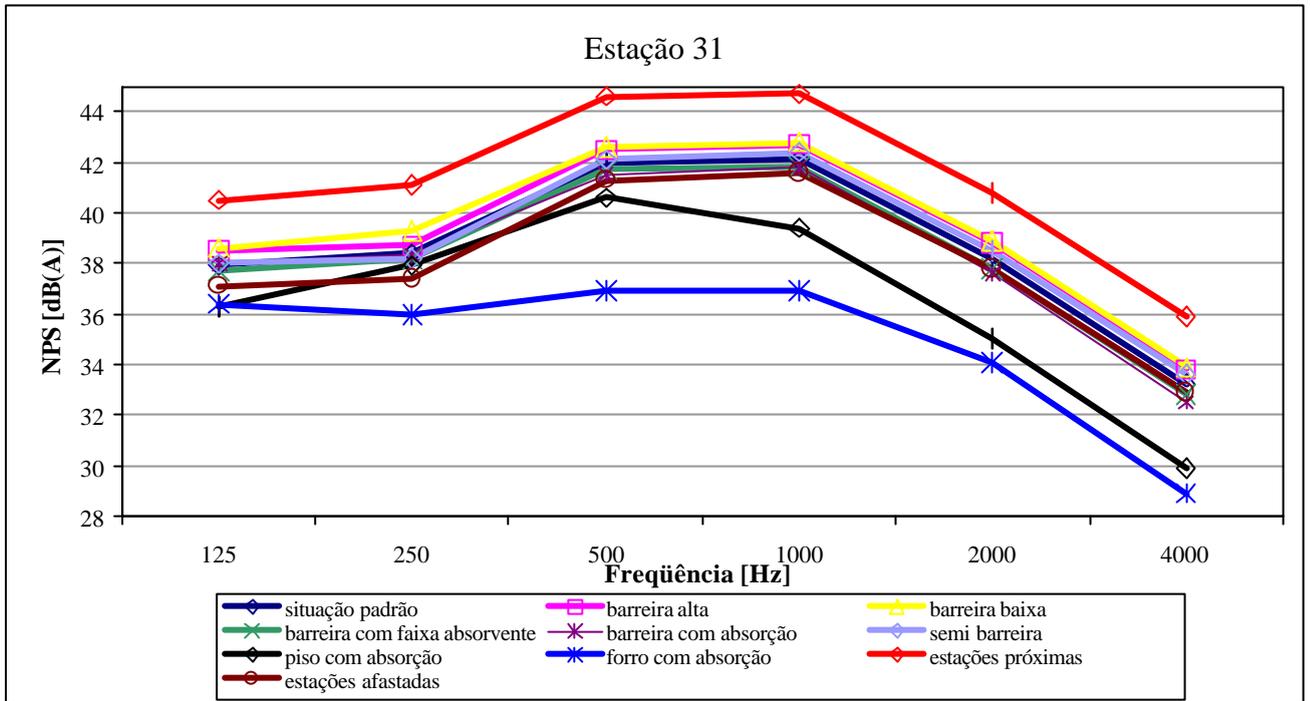


Figura 6.18 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 31.

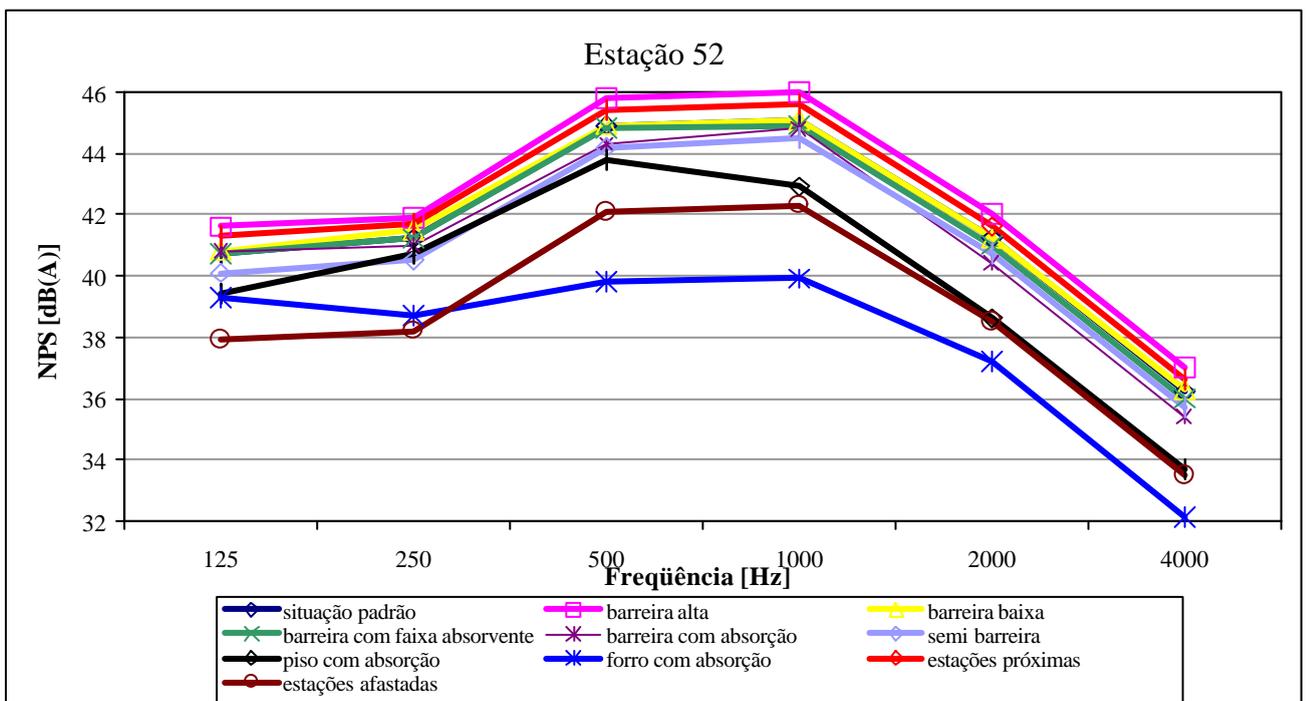


Figura 6.19 – Resultados dos ensaios simulados em NPS para a estação 52.

Tabela 6.4 - Níveis globais de níveis de pressão sonora [NPS] para cada estação de trabalho analisada.

estação	situação padrão	barreira alta	barreira baixa	barreira com absorção	semi-barreira	piso com absorção	forro com absorção	estações próximas	estações afastadas	barreira com faixa absorvente
21	53.9	55	52.2	53.5	53.6	53.2	52.9	50.7	52.8	53.5
31	47.3	47.8	48	47	47.5	45.4	43.3	49.9	46.7	47
26	45.9	46.2	45.8	45.2	45.3	44.4	41.6	48.1	40.1	44.7
25	39.4	38.7	39.1	38.6	42.3	36.8	34.5	42.5	37.7	38.6
35	48	49.5	53.6	47.3	47	46.4	42.5	51.1	48.8	47.2
34	40.4	42.6	40.4	39.2	41.8	36.2	34.4	43.2	39.3	40.2
18	47.7	48	48.3	47.2	46.6	46.4	44.1	48.3	45.8	47.1
37	49.3	51.3	48.8	48.3	48.4	46.4	45.5	51.8	47.3	49.1
52	50.2	51.1	50.3	49.8	49.6	48.7	46.2	50.7	47.4	50.1
29	55.3	55.8	54.3	54.9	54.8	54.4	54.1	58.8	53.1	55
27	51.6	50	53	51.1	54.3	51.1	49.3	52.3	50.5	49.2
20	52.6	52.7	53.5	52.2	54.5	51.8	51.3	52.5	52	52.2
36	58.8	59.4	57.1	58.5	58.6	58.2	58	58.8	56.5	58.6
19	50.4	50.5	53.5	50.1	52.5	49.9	46.9	51.1	50.2	49.8

#### 6.4 – Análise dos Resultados

A análise dos resultados é apresentada por grupo de estações de trabalho receptoras, conforme ilustrado na Figura 6.5.

Para a análise, dois índices de avaliação foram estipulados: o nível de pressão sonora (NPS) e o índice de transmissão da fala (STI):

- O STI foi escolhido por ser um índice consagrado para a avaliação da inteligibilidade da fala. Outro motivo é devido ao Raynoise® calcular diretamente este valor, não sendo necessários cálculos adicionais ao usuário.

- O NPS é uma quantidade física comumente usada para descrever o campo sonoro quantitativamente, sendo um parâmetro fácil de ser medido e diretamente associado a qualidades acústicas de um ambiente.

Em relação aos valores do nível de pressão sonora, estes quantificam a intrusão da fala, originada na estação central, nas outras estações. Ou seja, o campo sonoro gerado por uma única fonte na ausência de demais fontes de ruído. Portanto, o valor relativo entre sinal e ruído de fundo não foi levado em consideração. Posteriormente, quando da apresentação dos resultados avaliados pelo STI, os valores são apresentados em função da variável ruído de fundo.

#### 6.4.1 – Análise dos Resultados em NPS

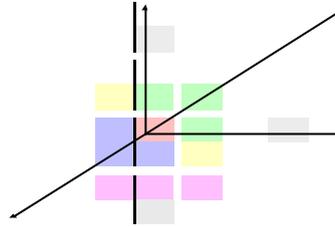
Em geral, busca-se uma redução no nível de pressão sonora resultante da intrusão da fala em estações adjacentes, a fim de garantir-se a privacidade e a capacidade de concentração em um ambiente de trabalho.

Para a avaliação dos resultados das simulações em NPS, foram adotados intervalos no nível de pressão sonora como critério de julgamento[33]. São valores subjetivos que referem-se à capacidade de percepção de um ouvinte à mudança do nível de pressão sonora, descritos na Tabela 6.5, de acordo com referências extraídas da bibliografia.

Tabela 6.5 - Critério de avaliação dos resultados em níveis de pressão sonora [NPS].

<b>Mudança</b>	<b>Critério</b>
mudança imperceptível	0 - 1 dB
mudança perceptível	1 - 3 dB
mudança significativa	$\geq 3$ dB

**1) Análise Grupo 1 - Estações 29, 36 e 37 - grupo verde - (estações com exposição visual direta)**



Analisando-se as estações 29, 36 e 37, nota-se que o fator de maior influência na redução do nível de ruído total é maior afastamento entre as estações de trabalho. Esta redução leva a uma condição acústica mais adequada a um ambiente de trabalho, tal como um escritório panorâmico. A diminuição total situa-se entre 2 e 2,3 dB, considerada uma mudança perceptível. A redução ocorre em função de um maior decaimento sonoro promovido por um aumento no trajeto dos raios diretos ou refletidos. Esta melhoria ocorre de forma constante em toda a faixa de frequência analisada (125 a 4000 Hz).

O uso de forro mais absorvente também implicou em uma diminuição no NPS total, porém, de forma diferenciada para as três estações. Na estação 37, esse parâmetro destacou-se proporcionando uma redução de 3,8 dB, ou seja, uma mudança bastante significativa. Já para as estações 29 e 36, este parâmetro não foi tão representativo, promovendo uma redução de 0,8 dB e de 1,2 dB, respectivamente.

Na estação 37, também, há uma redução significativa em função do uso de piso com maior absorção, com uma redução de 2,9 dB no nível total. Para as demais estações, esta redução foi menor. Nesta estação a redução significativa no nível sonoro total causada pelos parâmetros forro e piso com maior absorção pode ser explicada em função de sua posição em relação à fonte sonora. Por estar diagonalmente oposta à estação central, a influência dos raios refletidos pelas divisórias é menor. Também, o caminho percorrido pelos raios é maior e com maior número de reflexões. Os níveis das bandas de frequências entre 500 e 4000 Hz tiveram maiores reduções.

Barreiras mais baixas também reduziram de modo representativo o nível de pressão sonora total em 1,7 dB na estação 36 e 1,2 dB na estação 29. A redução na altura da divisória faz com que maior parcela da energia irradiada pela fonte atravesse o espaço entre o topo da barreira e o teto. Com isto, menos energia é refletida pelas barreiras que circundam a fonte na direção destas estações.

Este fenômeno pode ser visualizado na Figura 6.20. A diferença de valores entre as duas estações pode ser atribuída à presença de um móvel localizado entre as estações 28 e 36 e ao espaço livre entre as divisórias 28 e 29, que permite que parte da energia refletida passe por este caminho. A distribuição do mobiliário pode ser vista na Figura 6.1.

Como ponto comum entre as três estações, duas condições mostram-se desfavoráveis quando se quer reduzir o nível de pressão sonora total. A primeira delas é uma maior proximidade das estações. Quanto mais próximas as estações, menor o decaimento sonoro. A diminuição da distância entre as estações tem grande influência nas estações 29 e 37, causando um acréscimo de 3,5 e 2,5 dB, respectivamente. A segunda, o aumento na altura da barreira. Este aumento promove mudanças mais perceptíveis na estação 37, com um acréscimo de 2dB no nível total; para as demais estações este valor foi um pouco menor. Ao contrário do ocorrido com o uso de barreiras mais baixas, o aumento na altura da divisória faz com que um maior número de raios seja refletido para as estações posteriores.

Para este grupo de estações, os demais parâmetros não apresentaram mudanças significativas no nível total de pressão sonora.

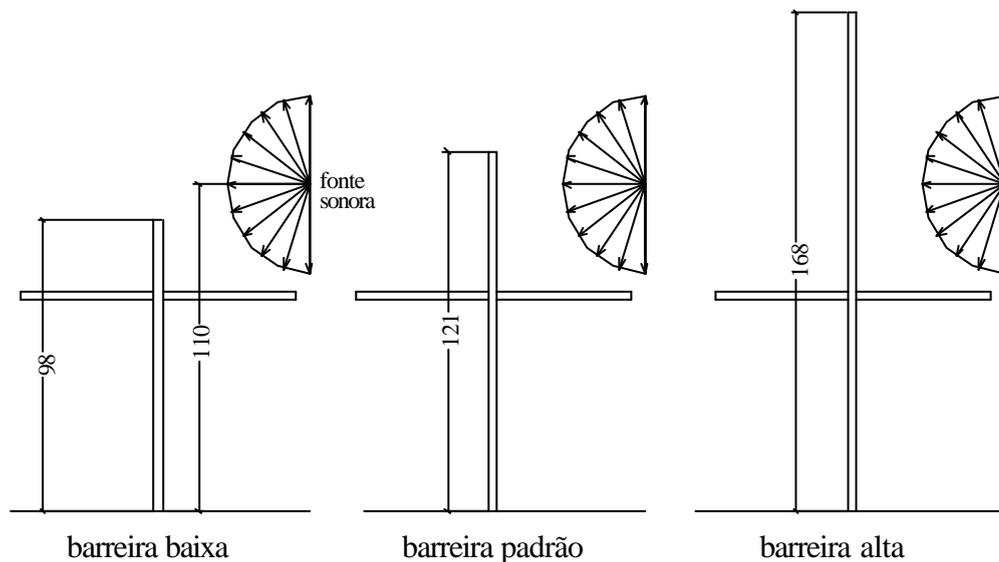
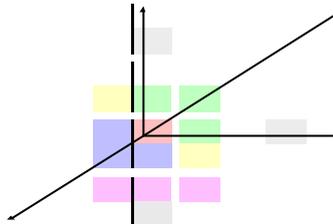


Figura 6.20 – Influência dos raios sonoros para diferentes alturas de barreiras.

**2) Análise Grupo 2** - Estações 19, 20 e 27 - grupo azul (estações adjacentes frontais delimitadas por barreiras em comum)



Para estas estações, o uso de forro mais absorvente promove uma redução no nível de pressão sonora total de maneira significativa na estação 19, com uma redução de 3,5 dB, e de modo perceptível nas estações 20 e 27, com 1,3 e 2,3 dB, respectivamente. Esta diferença pode ser explicada pela maior distância entre o ponto receptor da estação 19 em relação a fonte.

Para a estação 27, uma barreira com a faixa mais absorvente também leva a alteração perceptível para toda a faixa de frequência analisada, com redução de 2,4 dB no nível global. Para a estação 20 a influência deste parâmetro foi menor, promovendo diminuições perceptíveis apenas para as frequências de 1000, 2000 e 4000 Hz, com valores entre 1,0 e 1,2 dB. Este fato é consequência da influência do móvel situado ao lado da estação 28 (posição da fonte sonora) sobre o número de raios refletidos em direção à borda absorvente. O mesmo não ocorre com a estação 20, já que esta estação possui um espaço aberto em sua lateral, comum à estação 28. Para as estações 19 e 20, estas mudanças no nível global foram imperceptíveis.

Para todas as estações, uma barreira mais baixa do que a barreira padrão provoca aumento no nível de pressão sonora total. Em acordo com o verificado para o grupo 1, o uso de barreiras mais baixas permite que uma maior parcela de energia sonora atravessasse a área compreendida entre o topo da barreira e o teto, alcançando o receptor diretamente ou após reflexões de primeira ordem, já que a altura da barreira é menor que a fonte.

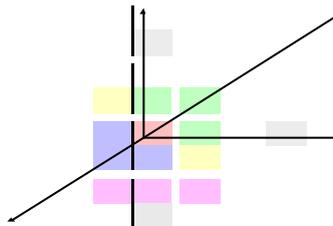
Vale ressaltar que as contribuições de barreiras mais altas ou mais baixas são antagônicas, ou seja, para uma determinada estação, se o uso de barreiras mais altas é benéfico, a utilização de barreiras mais baixas resulta em diminuição do isolamento acústico.

Para as estações 20 e 27, a semi-barreira provocou um aumento no nível total de 1,9 e 2,7 dB respectivamente. De modo semelhante à influência do topo da barreira, os raios que alcançam a

borda inferior da barreira atingem os receptores por difração. A diferença dos valores promovidos por este parâmetro para as estações 20 e 27 deve-se à localização do móvel situado ao lado da estação 27, que faz com que mais raios sejam redirecionados da estação 28 (fonte sonora) para esta posição.

As curvas correspondentes aos demais parâmetros apresentam-se muito próximas da curva referente à situação padrão.

### 3) Análise Grupo 3 - Estações 21 e 35 - grupo amarelo (estações adjacentes com exposição semi-direta)



Por estarem em posições contrárias à fonte, os parâmetros que influenciam o nível de pressão sonora total nas estações 21 e 35, não são os mesmos.

Para a estação de trabalho 21, uma diminuição na altura da barreira e de modo mais significativo, uma aproximação entre as estações de trabalho, promovem uma redução sonora de 1,7 dB e de 3,2 dB, respectivamente.

Considerando o exposto para o grupos anteriores, barreiras baixas não evitam linhas diretas de visão entre orador e ouvinte, podendo a energia sonora atravessar mais facilmente ao longo deste caminho, sendo o receptor alcançado por maior parcela de energia. Assim, menor fluxo de energia é refletido para estações posteriores à orientação da fonte, como acontece com a estação 21. Já uma aproximação entre as estações de trabalho é benéfica para a estação 21 em função da redução do espaço livre entre as estações 28 e 29. Este estreitamento faz com que menos raios diretos atinjam esta estação, já que redirecionados para a estação 29.

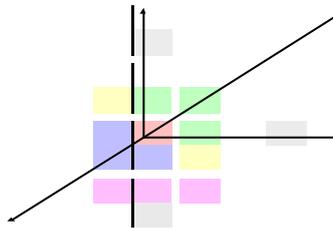
De modo contrário, um aumento na altura da barreira promove um aumento no nível do ruído total. Esta alteração faz com que maior parcela de energia sonora seja refletida, atingindo de

modo mais significativo as estações de trabalho posteriores à fonte. Deste modo, maior fluxo sonoro passa através do caminho livre entre as estações 28 e 29.

Para a estação 35, barreiras baixas geram um aumento bastante significativo, de 5,6 dB no nível do ruído total. A diminuição na altura permite que esta estação receba mais raios diretos da fonte sonora. De modo menos representativo, uma maior proximidade das barreiras também promove uma variação no NPS total, com aumento deste valor, uma vez que o decaimento sonoro é maior em função de menor distância entre fonte e receptor.

Para estas estações, os demais parâmetros não geraram mudanças significativas no nível do ruído total.

#### 4) Análise Grupo 4 - Estações 18, 26 e 34 - grupo rosa (estações frontais)



Para as estações 18, 26 e 34, o uso de forro mais absorvente estabelece reduções significativas no nível total, com valores de 3,6, 4,3 e 6 dB respectivamente. Um grande número de reflexões atinge o forro, que por ser absorvente, reduz grande parte da energia incidente, refletindo uma parcela pequena desta energia.

Dois outros parâmetros promovem uma redução sonora de forma semelhante para estas estações, sendo o primeiro deles, um maior afastamento entre as estações, e o segundo, um piso mais absorvente. A curva representada pelo primeiro parâmetro tem maior destaque para a estação 26, promovendo uma redução de 5,8 dB. Para as estações 18 e 34 estas reduções foram menores, com valores de 1,9 e 1,1 dB, ou seja, de acordo com o critério de avaliação, apenas perceptíveis. Reafirmando conceitos anteriores, áreas de plano aberto que requerem maior grau de privacidade devem ter a maior separação possível entre as estações de trabalho, uma vez que quanto maior a distância entre fonte e receptor, maior o decaimento sonoro. Para as frequências mais baixas (125 e

250 Hz), estas são mais afetadas por este parâmetro uma vez que, em geral, a absorção sonora em baixas frequências tende a valores menores que os de frequências mais altas, diminuindo a influência relativa da absorção sonora promovida pelos diversos materiais que compõem a sala.

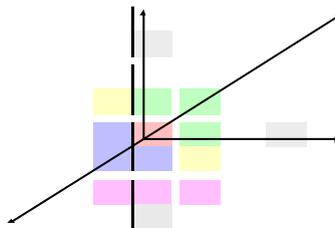
O piso mais absorvente causa reduções menores para este grupo de estações, com valores entre 1,3 e 1,6 dB.

As diferenças entre os valores dos níveis de pressão sonora para estas estações causados por uma maior ou menor distância entre as estações e piso absorvente são explicadas em função da posição e forma semi-esférica da fonte sonora, que faz com que os raios emitidos atinjam de forma diferente os pontos receptores, atingindo de maneira mais representativa as estações 26 e 34. O móvel situado entre as estações 26 e 34 também tem influência nestas diferenças devido a reflexões de raios incidentes no mesmo.

De modo contrário, uma maior proximidade entre as estações gera um aumento no nível total da pressão sonora, de maneira mais significativa para as estações 26 e 34, com valores entre 2,1 e 2,9 dB, respectivamente. Para a estação 18, esta redução foi de menor magnitude. O fato governante parece ser a lei do decaimento sonoro com a distância, ou seja, quanto mais próximas à fonte, menor o caminho percorrido pelos raios, menor o espalhamento, maior o nível de ruído resultante. Também, a utilização de semi-barreiras tiveram influência no aumento do nível de pressão sonora nas estações 18 e 34 de modo representativo.

Os demais parâmetros avaliados são menos importantes na modificação do nível de pressão sonora percebido em relação a situação padrão.

##### 5) Análise Grupo 5 - Estações 25, 52 e 31 - grupo cinza (estações afastadas)



Mesmo estando em posições dispersas em relação à fonte, mas a uma mesma distância, as estações 25, 52 e 31 apresentam como ponto comum uma redução significativa no nível total de pressão sonora em função do uso de um forro mais absorvente, com valores de 4,9, 4 e 4 dB, respectivamente.

O piso absorvente também promove mudanças perceptíveis no nível total. A influência do piso é menor que a do forro já que grande parte desta área é coberta por outras superfícies, que diminuem sua área livre, redirecionando e atenuando os raios sonoros que a alcançam.

Uma redução sonora também é causada por um maior afastamento entre as estações, de modo significativo para as estações 25 e 52, e de modo menos significativo para a estação 31. Este fato pode ser explicado pelas posições frontal e lateral das estações 25 e 52 em relação à fonte sonora, pois recebem maior influência dos raios emitidos pela fonte. Concordante aos grupos anteriores, quanto maior a distância entre orador e ouvinte, maior o grau de privacidade nas estações receptoras, isto é, menor nível de pressão sonora, melhor condição para um ambiente de trabalho.

Uma aproximação entre as estações provoca um aumento no NPS total, condizente com o já observado para as demais estações analisadas. De modo similar à influência do maior afastamento, este parâmetro é mais notado nas estações 25 e 31, e de modo pouco significativo na estação 52. Para a estação 25, a semi-barreira é tão importante quanto o afastamento.

Os demais parâmetros não promoveram alterações representativas no nível de pressão sonora total, quando comparados com a situação padrão.

Uma tabela sinóptica com todos os resultados em NPS é apresentada.

Tabela 6.6 - Resultados das simulações em NPS.

VARIÁVEL		GRUPO 1 exposição visual direta			GRUPO 2 adjac. frontais com barreiras comuns			GRUPO 3 adjac. com exposição semi- direta		GRUPO 4 estações frontais			GRUPO 5 estações afastadas		
		29	36	37	19	20	27	21	35	18	26	34	25	31	52
BARREIRAS	Barreira alta														
	Barreira baixa														
	Semi- barreira														
	Barreira com faixa absorvente														
ABSORÇÃO	Barreira absorvente														
	Piso absorvente														
	Forro absorvente														
ESPAÇO	Estações afastadas														
	Estações próximas														

Legenda:

- piora acentuada

- ligeira melhora

- ligeira piora

- melhora acentuada

- sem alteração significativa

### 6.5 - Resultados das Simulações - STI

Analogamente à análise feita para o nível de pressão sonora, análises considerando agora o STI como índice de avaliação foram implementadas para os mesmos grupo de estações.

**Grupo 1 – Estações 29, 36, 37 - [STI]**

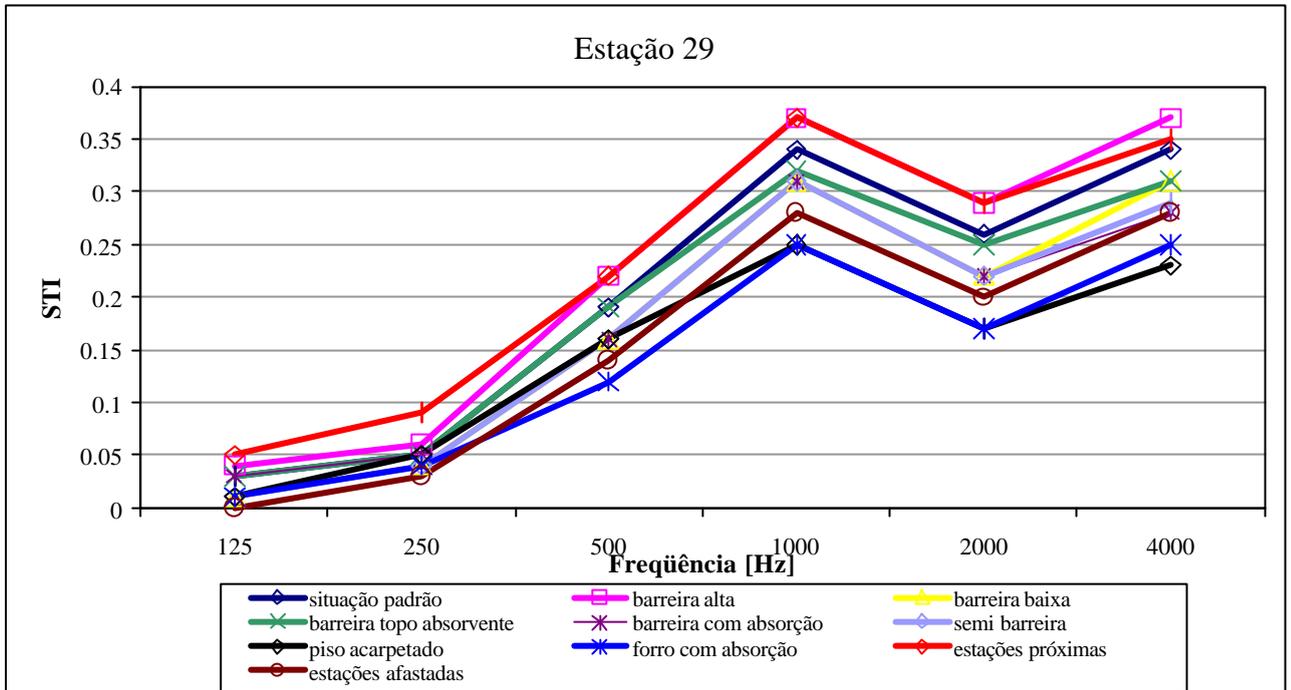


Figura 21 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 29.

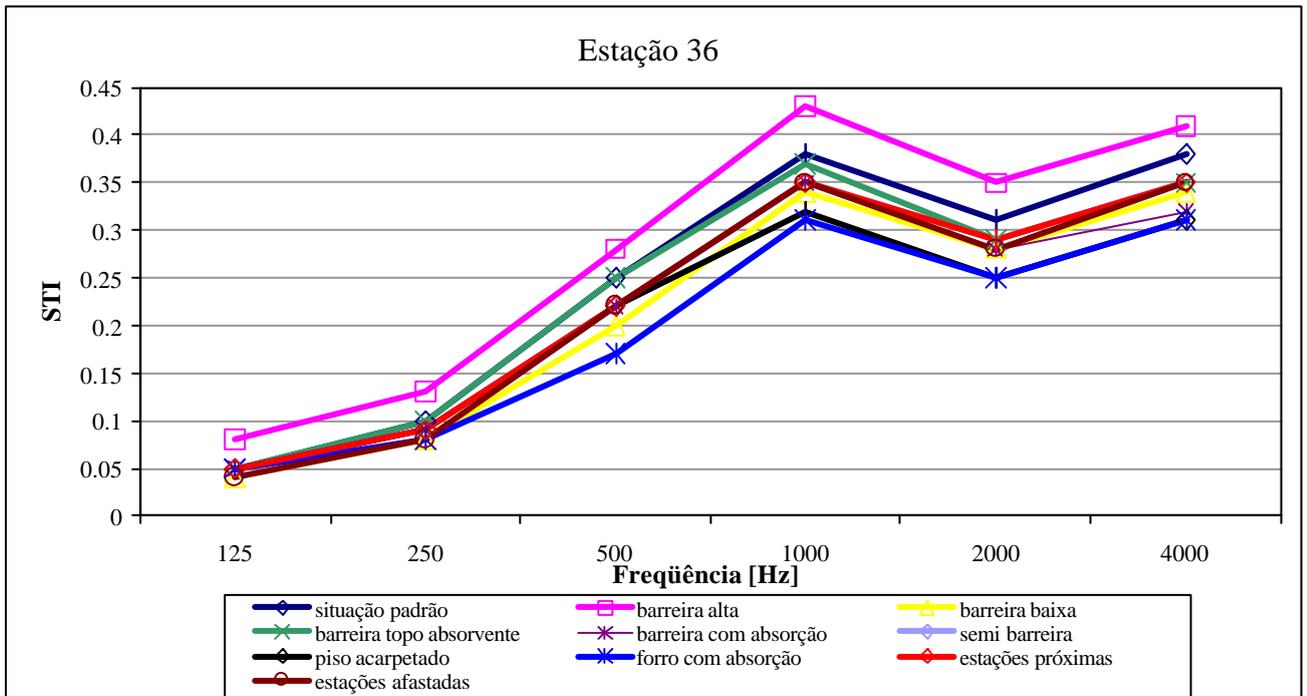


Figura 22 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 36.

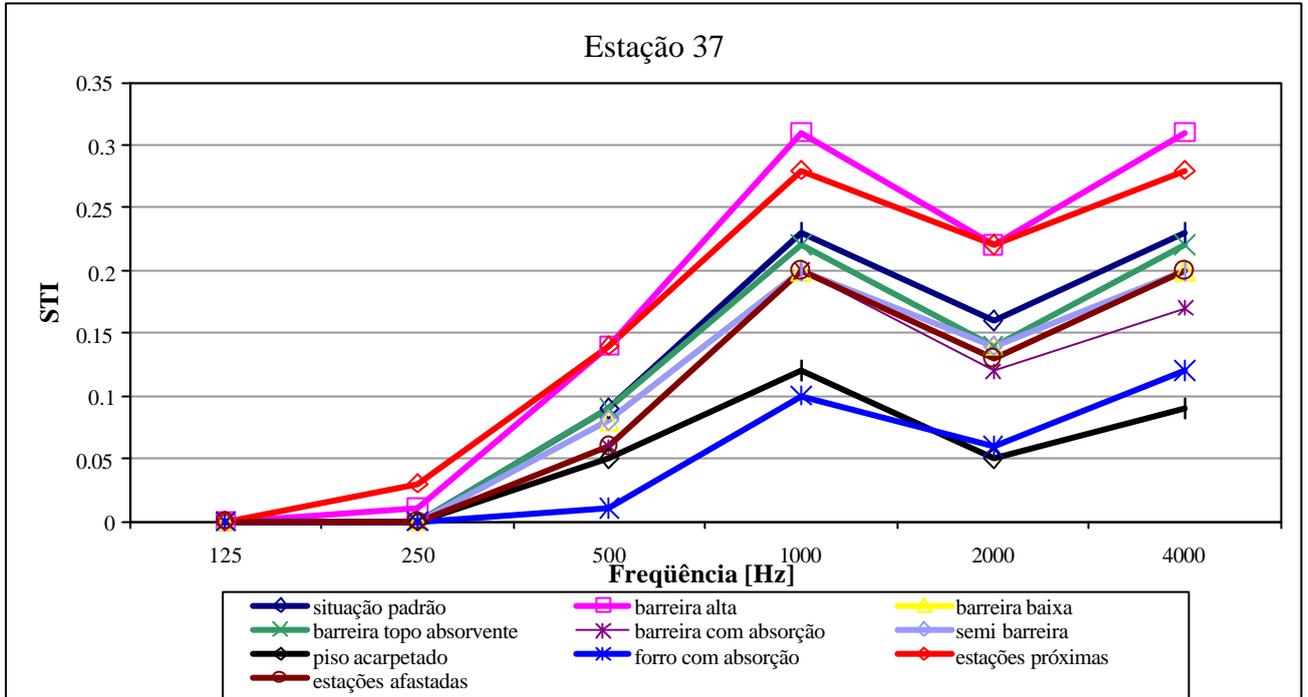


Figura 23 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 37.

**Grupo 2 – Estações 19, 20, 27 - [STI]**

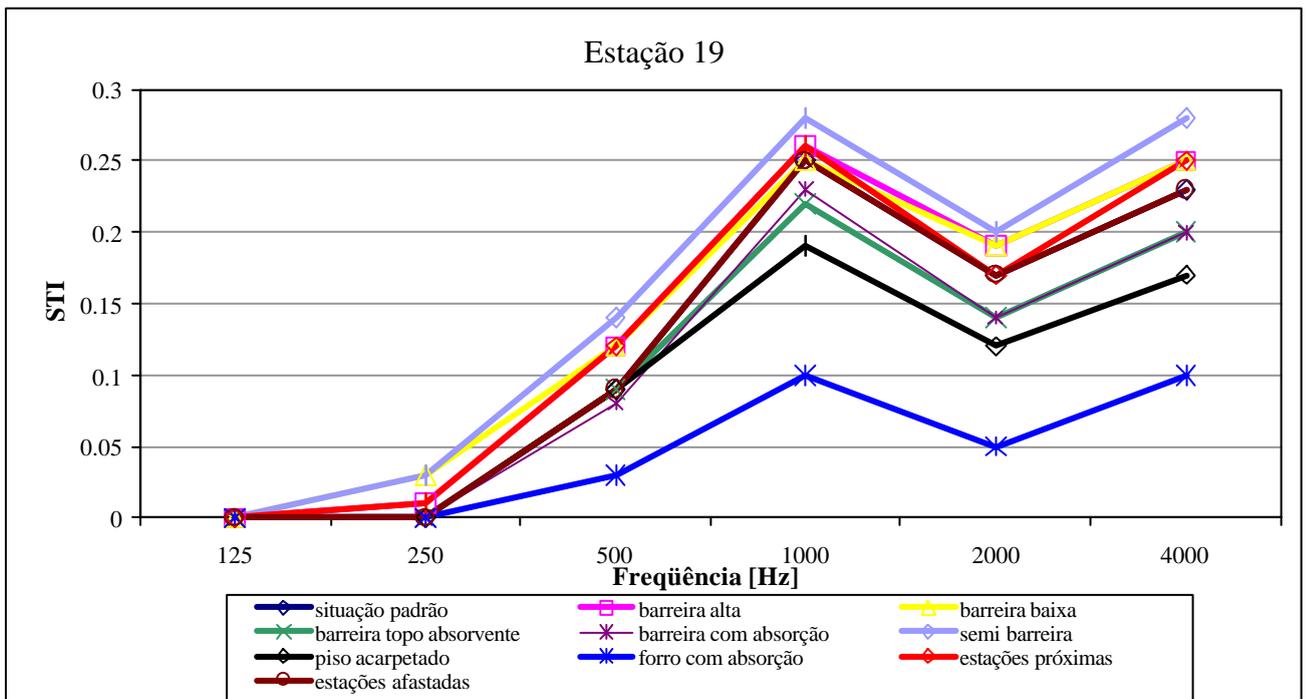


Figura 24 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 19.

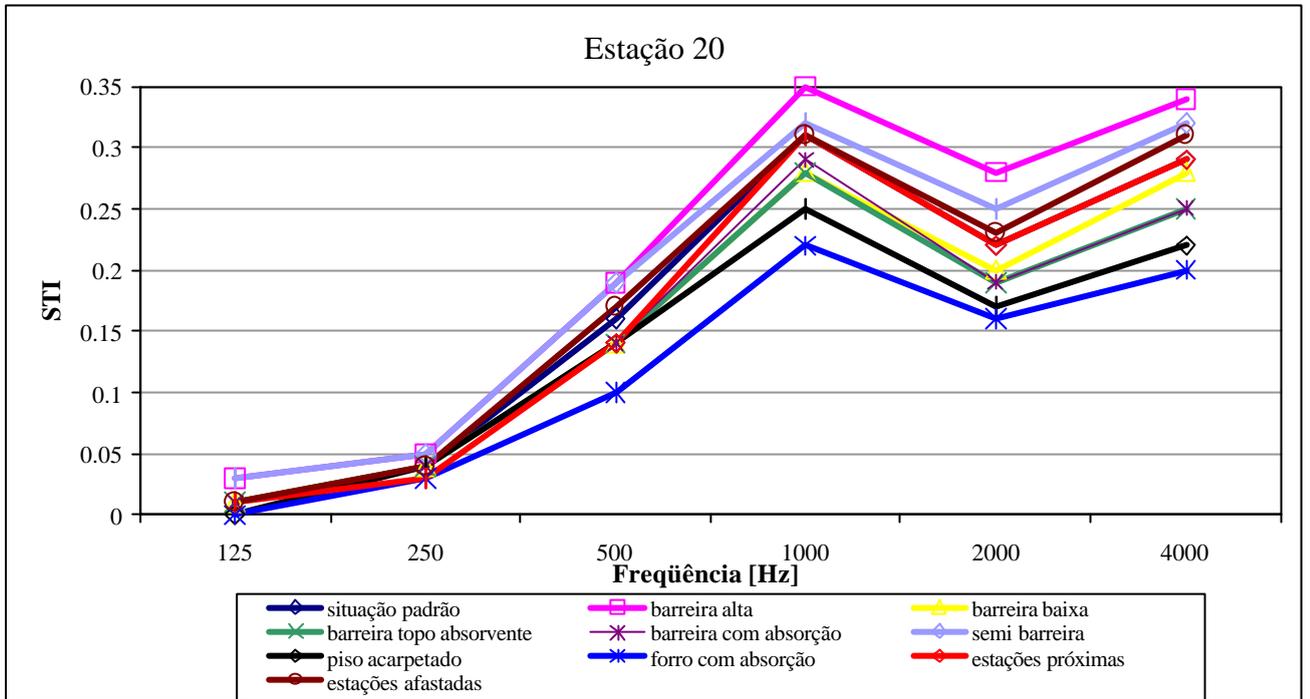


Figura 25 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 20.

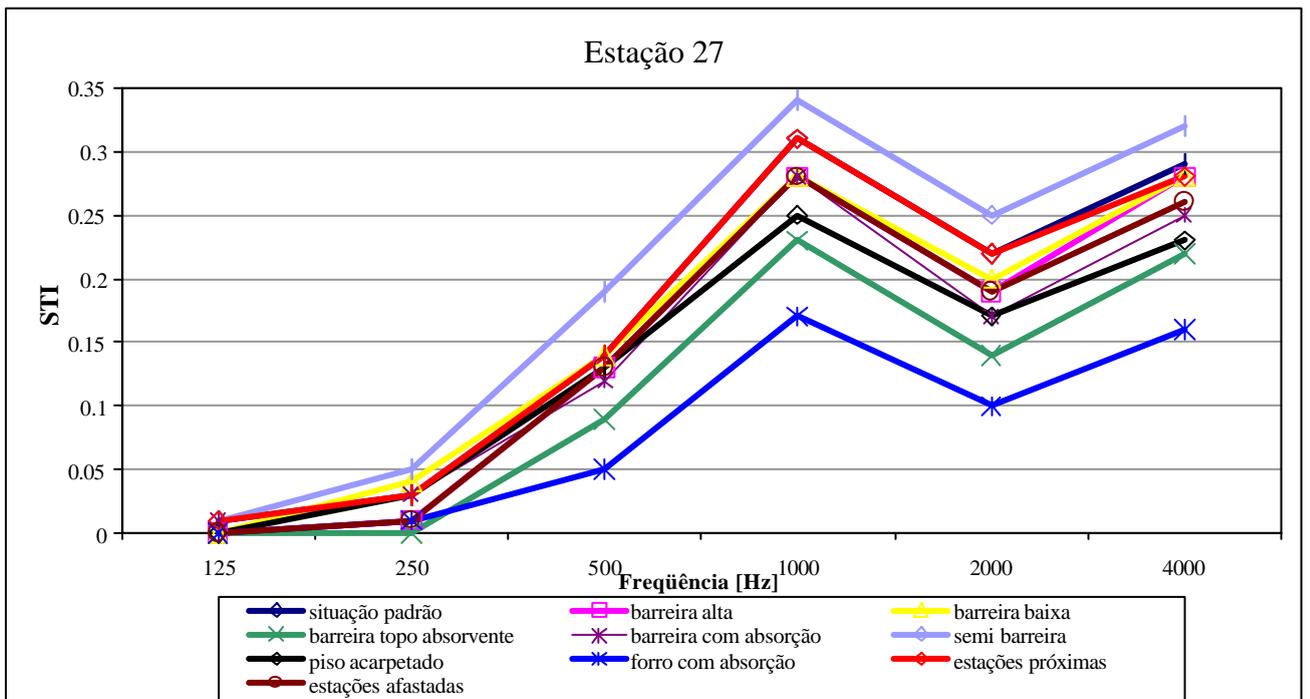


Figura 26 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 27.

**Grupo 3 – Estações 21, 35 – [STI]**

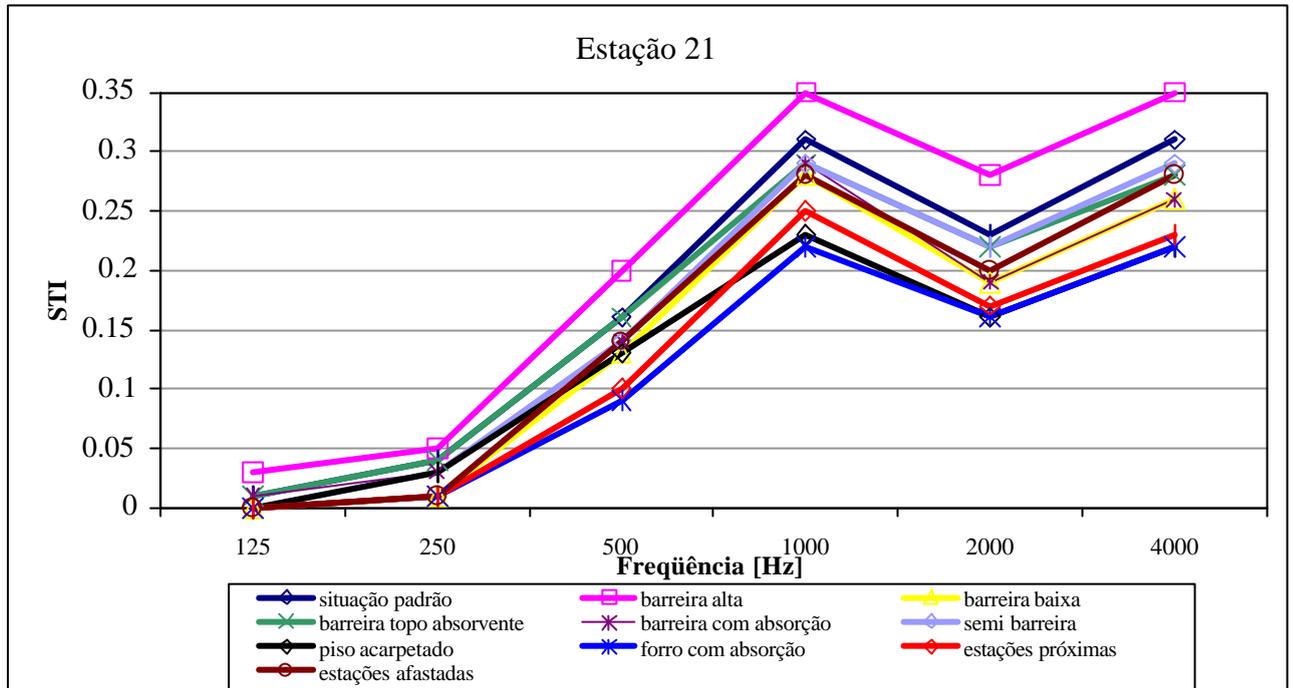


Figura 27 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 21.

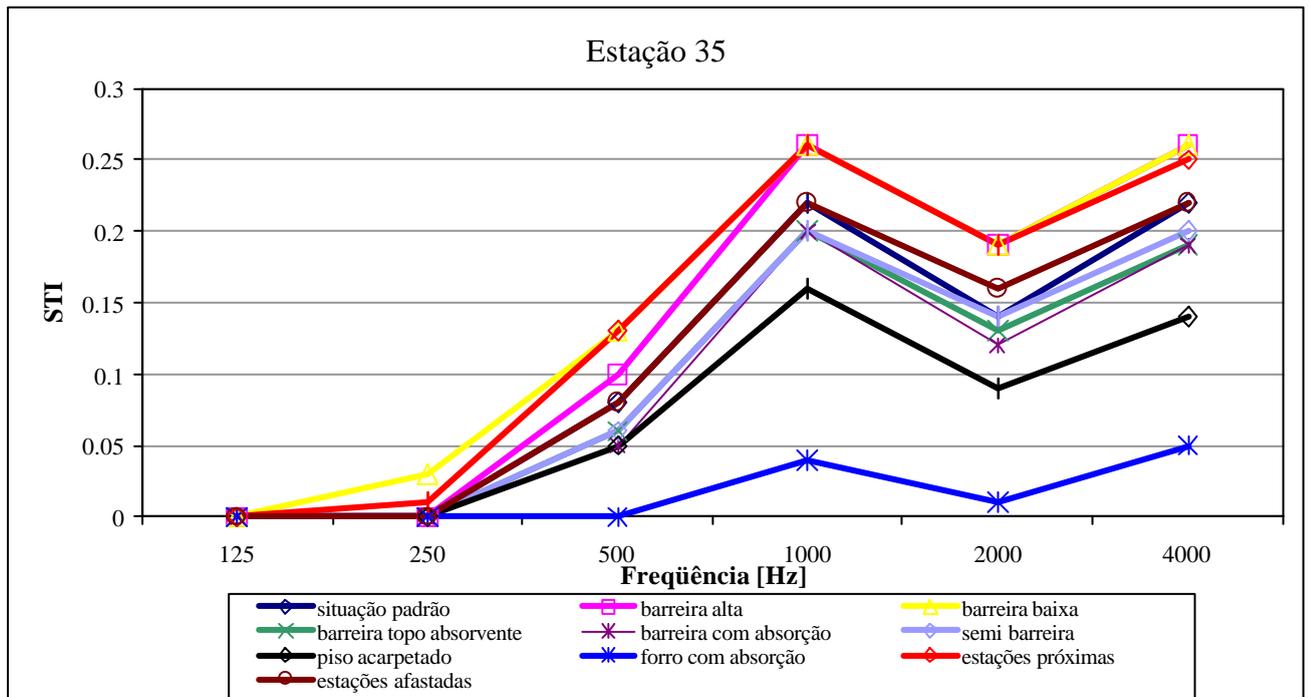


Figura 28 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 35.

**Grupo 4 – Estações 18, 26, 34 – [STI]**

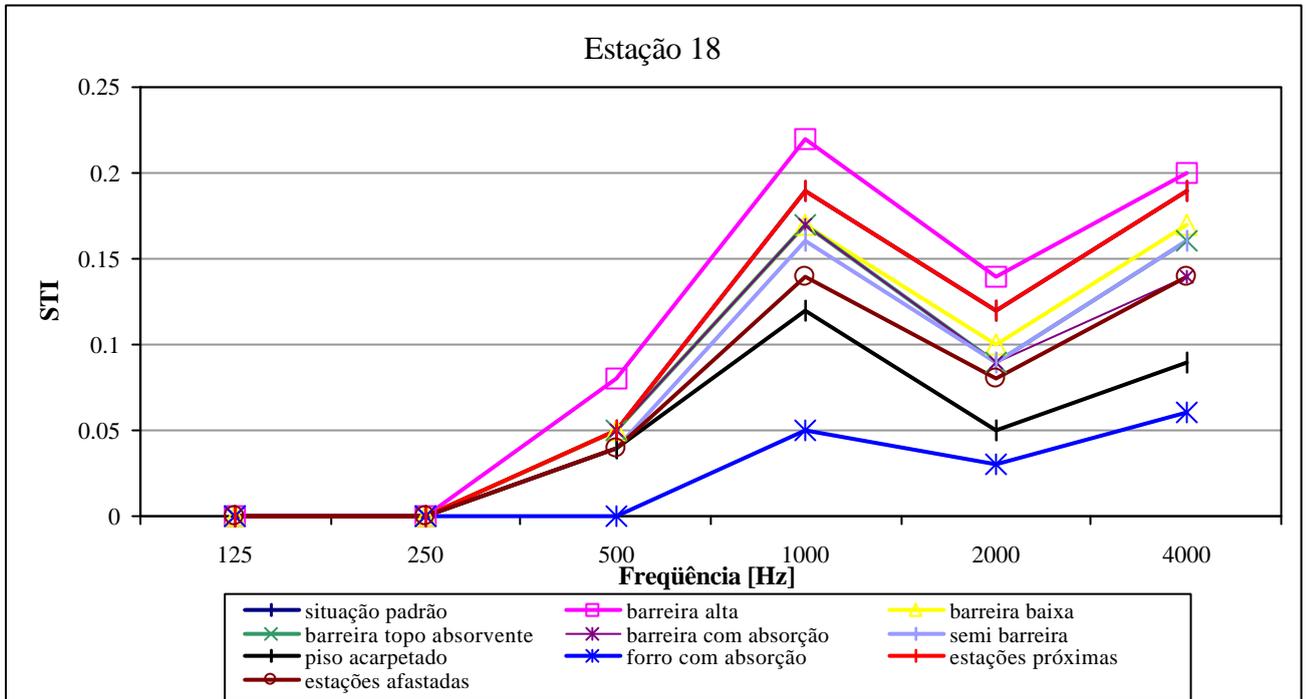


Figura 29 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 18.

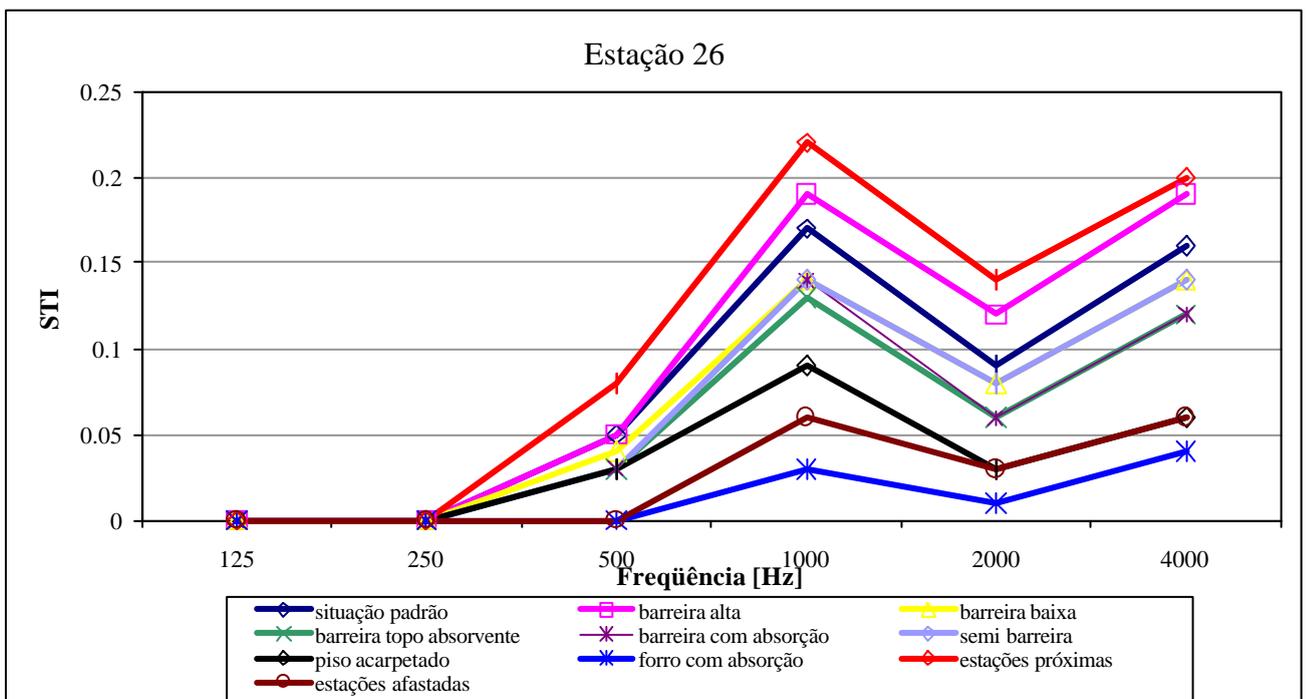


Figura 30 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 26.

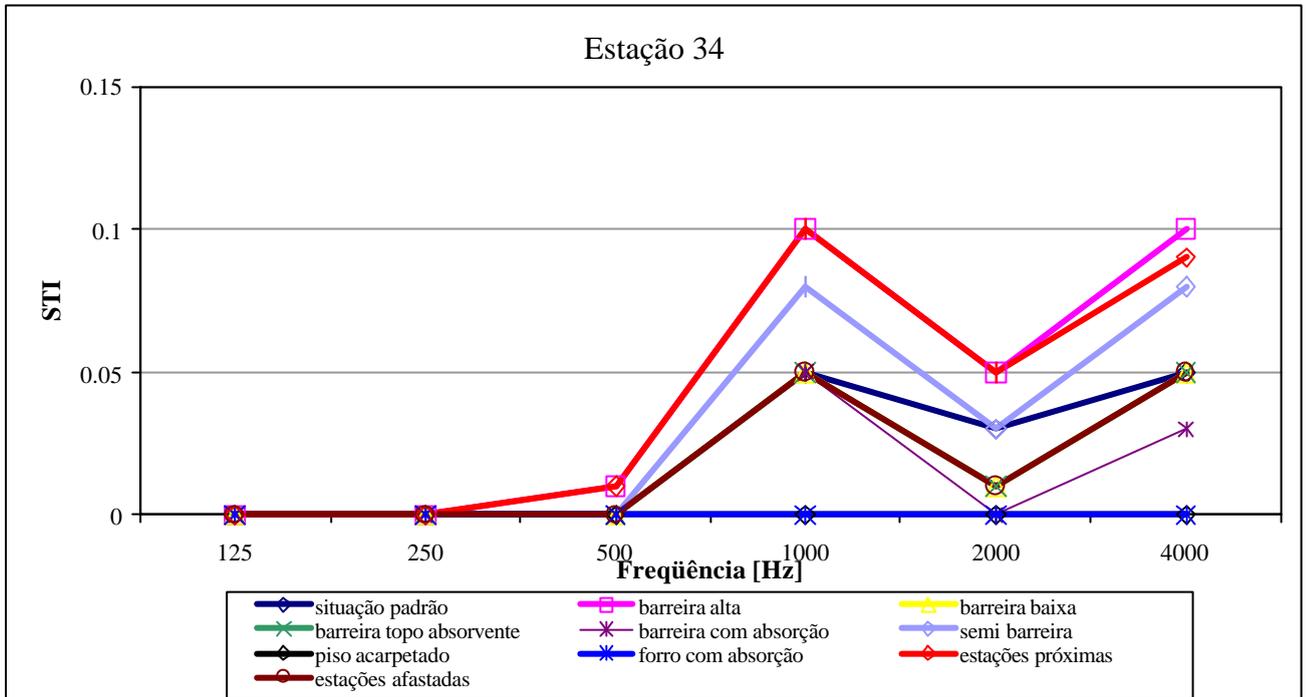


Figura 31 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 34.

**Grupo 5 – Estações 25, 31, 52 – [STI]**

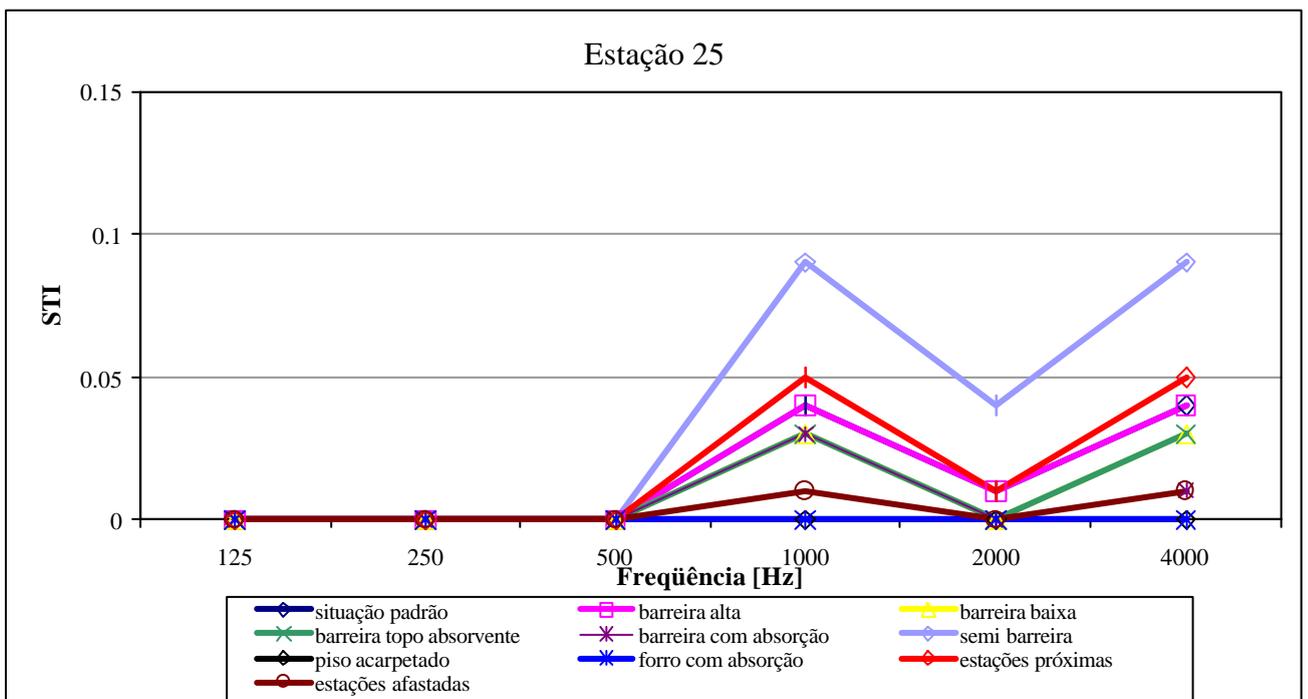


Figura 32 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 25.

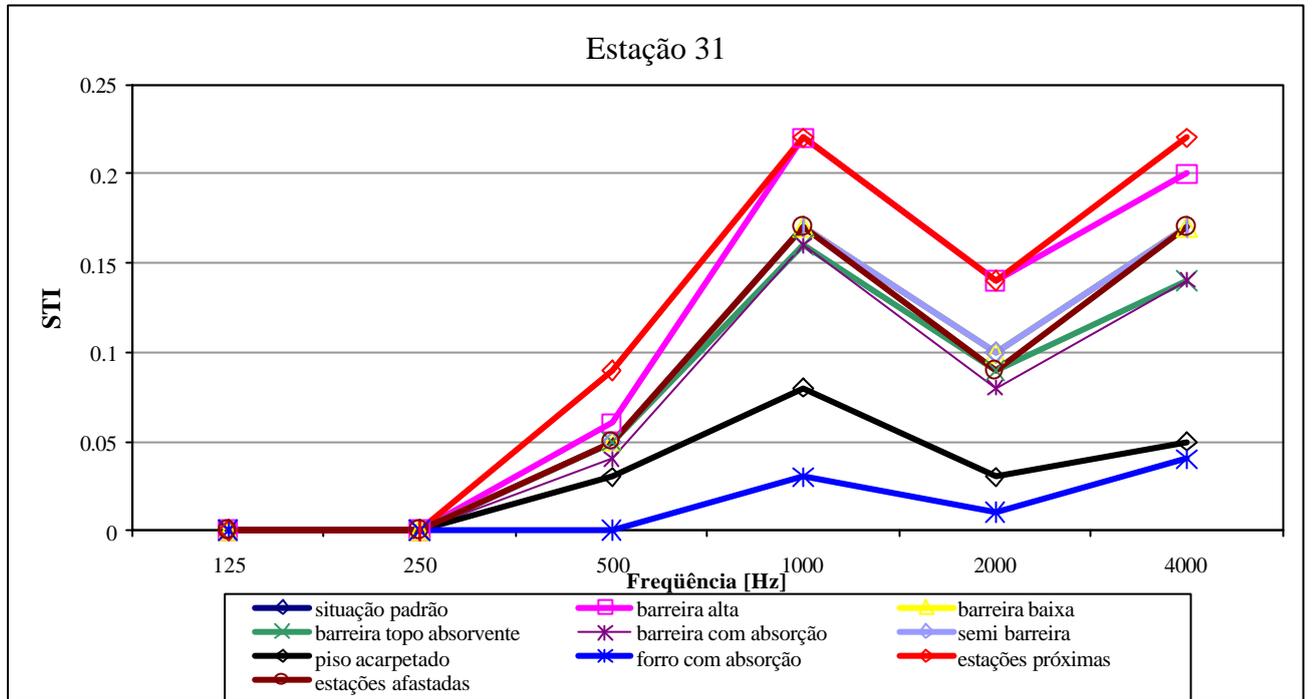


Figura 33 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 31.

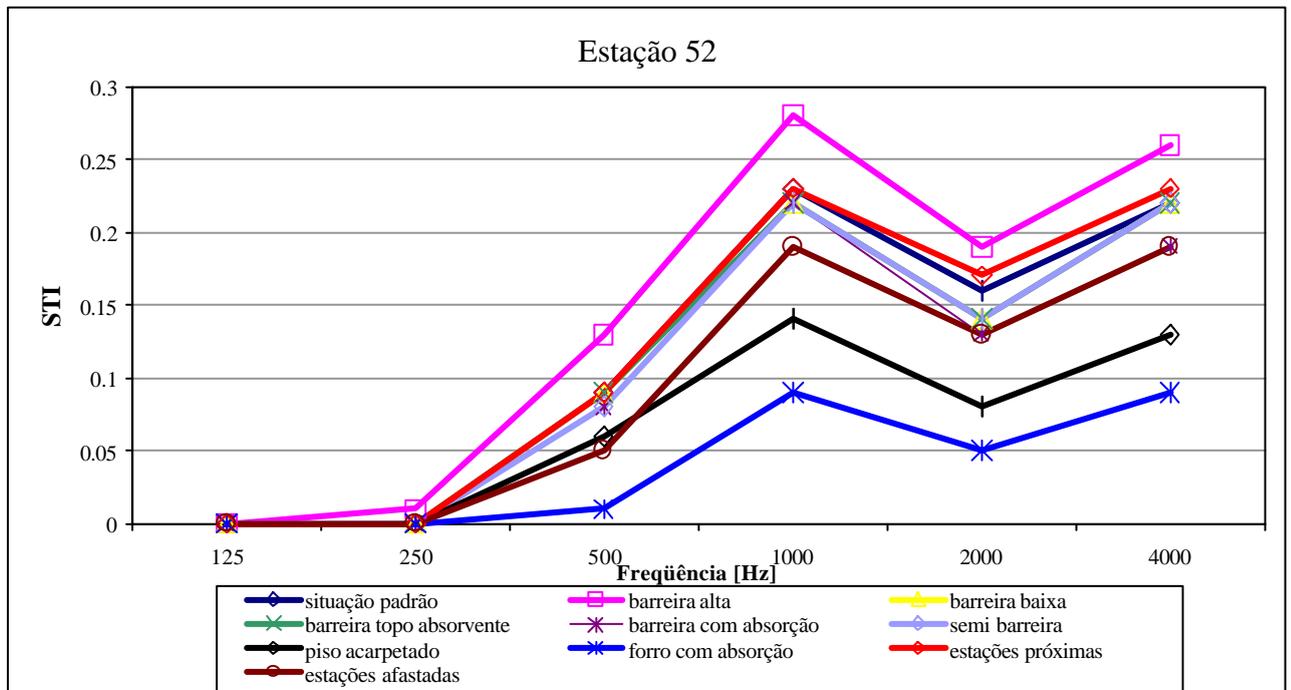


Figura 34 - Resultados dos ensaios simulados em STI para a estação 52.

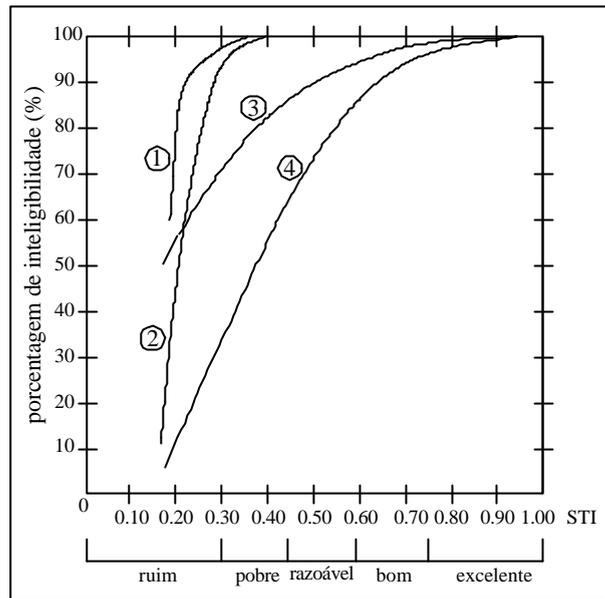
### 6.5.1 – Análise dos Resultados em STI

A análise dos resultados é apresentada por grupo de estações, conforme explicado na seção 6.3 e ilustrado na Figura 6.5.

De modo similar à análise realizada tendo como referência o nível de pressão sonora total em cada grupo de estações, um estudo considerando o STI como índice de avaliação é apresentado. O critério de avaliação adotado é mostrado na Tabela 6.7. Uma mudança de 0,15 em seu valor representa uma diferença significativa e claramente percebida na inteligibilidade da fala, conforme descrito no apêndice III.

Tabela 6.7 - Critério de avaliação dos resultados em STI.

<b>Qualificação da inteligibilidade</b>	<b>Critério</b>
ruim	0,00 - 0,30
pobre	0,30 - 0,45
razoável	0,45 - 0,60
boa	0,60 - 0,75
excelente	0,75 - 1,00

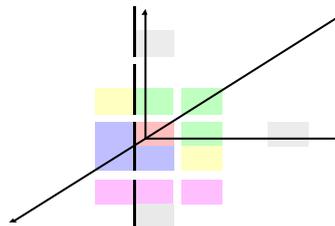


Legenda:

- 1 - números e alfabeto soletrado
- 2 - sentenças curtas
- 3 - testes de diagnóstico de rimas
- 4 - sentenças completas

Figura 6.35 – Relações típicas entre o STI e porcentagem de inteligibilidade para vários tipos de testes.

**1) Análise Grupo 1 - Estações 29, 36, 37 - grupo verde (com exposição visual direta)**



Para o primeiro grupo analisado, o parâmetro comum que promove uma redução no valor do STI de forma mais acentuada é o forro mais absorvente, principalmente nas frequências de 1000, 2000 e 4000 Hz. Em seguida, com valores bem próximos, está o piso absorvente. Uma redução nos valores do STI representa uma menor porcentagem na inteligibilidade da fala, como ilustrado na

Tabela 6.7, e conseqüentemente, uma maior privacidade. Esta é a condição mais favorável a um ambiente de trabalho típico de um escritório panorâmico.

Esta condição acústica, com menores valores de STI promovida pelos parâmetros forro e piso mais absorventes pode ser explicada em função da posição das estações em relação à fonte sonora. Por estarem situadas atrás e lateralmente à fonte, nenhuma das estações recebe raios diretos, apenas raios refletidos pelas diversas superfícies. A estação 37 é a que reflete maior influência destes parâmetros. Por estar diagonalmente oposta à estação central, a influência dos raios refletidos pelas divisórias é menor, e também, o caminho percorrido pelos raios é maior e com maior número de reflexões.

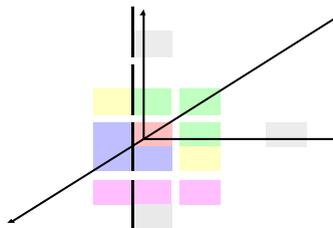
De maneira inversa, um aumento na altura das divisórias e uma maior aproximação das estações em relação à fonte, causam um aumento dos valores do STI, o que significa uma condição acústica pior em relação à situação padrão.

A diminuição da distância entre as estações tem mais influência nas estações 29 e 37. Como explicado anteriormente, quanto mais próximas as estações, menor o decaimento sonoro e conseqüentemente, maior parcela de energia alcança o ponto receptor.

Um aumento na altura da barreira que cerca a fonte sonora faz com que mais raios sejam refletidos pela mesma e atinjam as estações 29, 36 e 37. As alterações nas reflexões causadas pelas modificações na altura de uma barreira são mostradas na Figura 6.20.

Os outros parâmetros não promoveram mudanças representativas nos valores do STI.

## 2) Análise Grupo 2 - Estações 19, 20 e 27 - grupo azul (estações adjacentes frontais delimitadas por barreiras em comum)



Para estas três estações, o uso do forro mais absorvente promove uma redução nos valores do STI de maneira perceptível. Um grande número de reflexões atinge o forro, que por ser absorvente, reduz grande parte da energia incidente, refletindo ou deixando passar através dele mesmo uma parcela pequena desta energia.

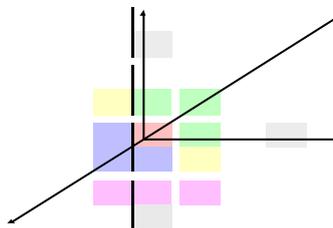
O piso com mais absorção também promove reduções nos valores do STI, porém com diminuições menos representativas.

Uma barreira com faixa mais absorvente na sua parte superior deu origem a uma redução nos valores do STI de modo mais significativo para a estação 27. Explica-se este fato pela ação que o móvel situado ao lado da estação 28 exerce sobre o número de raios refletidos que se voltam em direção à borda mais absorvente. O mesmo não acontece com a estação 20, que possui um espaço aberto em sua lateral, comum com a estação 28. Para as estações 19 e 20, as reduções em função deste parâmetro foram menos importantes.

Para todas as estações, uma semi-barreira originou um aumento nos valores do STI. Como já explicado anteriormente, os raios que atingem a borda inferior da semi-barreira são difratados para os receptores.

Os outros parâmetros não deram origem a mudanças significativas nos valores do STI.

### 3) Análise Grupo 3 - Estações 21e 35 - grupo amarelo (estações adjacentes com exposição semi-direta)



As estações 21 e 35 se situam em posições contrárias à fonte e portanto, estes parâmetros influenciam o campo sonoro em cada uma das estações receptoras de maneira diferente. A utilização de um forro com maior absorção provoca uma redução os valores do STI, o que significa que a adoção deste parâmetro reduz a inteligibilidade entre as estações. Esta mudança foi bem mais

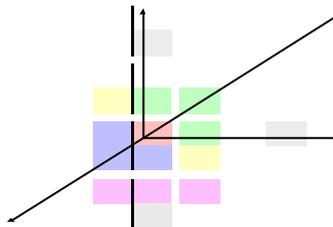
significativa para a estação 35. De modo similar, porém de modo menos representativo, o uso de um acabamento para o piso com maior absorção também gera uma redução nos valores do STI para ambas as estações.

De maneira contrária, uma barreira alta promove um aumento dos valores do STI, com valores de maior magnitude para a estação 21 que para a estação 35. Um aumento na altura da barreira faz com maior parcela de energia sonora seja refletida, com maior número de raios atingindo, principalmente, as estações posteriores a fonte.

Para a estação 35, barreiras baixas geram um aumento no STI. A diminuição na altura permite que esta estação receba mais raios diretos da fonte sonora. Uma maior proximidade das barreiras também promove um aumento dos valores do STI, uma vez que o decaimento sonoro é maior em função de uma menor distância entre fonte e receptor.

As curvas que representam os demais parâmetros não se destacaram em relação a situação padrão.

#### 4) Análise Grupo 4 - Estações 18, 26 e 34 - grupo rosa (estações frontais)



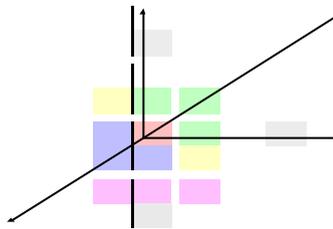
Para este grupo de estações, um forro com maior absorção estabelece reduções significativas nos valores do STI. Um forro com absorção adequada a um ambiente é de fundamental importância, pois além de ser a principal área de reflexão dos sons gerados no local, cumpre sua função que é promover a privacidade absorvendo os sons que alcançam o plano do teto, evitando que o mesmo reflita de volta ao local de origem e estações de trabalho adjacentes.

Mais dois parâmetros promoveram uma redução sonora, sendo o primeiro, um piso com maior absorção, e o segundo, um maior afastamento entre as estações. A curva representada pelo segundo parâmetro tem maior destaque na estação 26, sendo bem perceptível a mudança. Vale

repetir que quanto maior a distância entre fonte e receptor, maior o decaimento sonoro. Para as demais estações, as mudanças foram muito pequenas.

Estações mais próximas e barreiras mais altas, apesar de provocarem um aumento na inteligibilidade, apresentaram resultados menos significativos que os demais parâmetros cuja ação está direcionada no sentido oposto, ou seja, na redução dos valores de STI.

### 5) Análise Grupo 5 - Estações 25, 31 e 52 - grupo cinza (estações afastadas)



Todas as estações apresentaram como ponto comum uma redução nos valores do STI causada por um forro mais absorvente.

O piso mais absorvente também promove mudanças perceptíveis nos valores do STI, porém com valores de menor magnitude comparados com os valores promovidos pelo forro absorvente. De um modo geral, a absorção sonora promovida por esta superfície é menos importante que a absorção gerada pelo forro ou pelo entorno, uma vez que parte do som incidente é bloqueado pelo mobiliário. A absorção sonora dependerá da espessura e tipo de fibra do material.

Uma maior aproximação entre as estações provocaram um aumento nos valores do STI, o que representa uma redução na inteligibilidade. Para a estação 31 esta variação foi maior, e para as estações 25 e 52 a mudança foi imperceptível. Para a estação 25, o parâmetro que dá origem a um aumento perceptível no nível sonoro é a semi-barreira. Nas já demais estações deste grupo, este aumento perceptível é provocado por barreiras mais altas, que fazem com que maior número de raios emitidos pela fonte sejam refletidos, atingindo assim as posições posteriores e laterais. Reflexões sonoras em função de variações na altura das barreiras podem ser vistas na Figura 6.20.

Para este grupo de estações, os demais parâmetros não apresentaram mudanças significativas nos valores do STI.

Uma tabela sinóptica com todos os resultados em STI é apresentada.

Tabela 6.8 - Resultados das simulações em STI.

VARIÁVEL		GRUPO 1 exposição visual direta			GRUPO 2 adjac. frontais com barreiras comuns			GRUPO 3 adjac. com exposição semi- direta		GRUPO 4 estações frontais			GRUPO 5 estações afastadas		
		29	36	37	19	20	27	21	35	18	26	34	25	31	52
BARREIRAS	Barreira alta														
	Barreira baixa														
	Semi- barreira														
	Barreira com faixa absorvente														
ABSORÇÃO	Barreira absorvente														
	Piso absorvente														
	Forro absorvente														
ESPAÇO	Estações afastadas														
	Estações próximas														

Legenda:

- piora acentuada
- ligeira melhora
- ligeira piora
- melhora acentuada
- sem alteração significativa

### 6.6 - Decaimento Sonoro Espacial

O som irradiando de uma fonte pontual irá se espalhar em ondas esféricas. À medida que a área da esfera cresce com o quadrado da distância a partir da fonte, a intensidade também decresce decresce com o mesmo quadrado da distância. Isto é, a cada vez o raio da esfera é dobrado, a área da superfície aumenta 4 vezes, então a intensidade decresce em 1/4, correspondendo a uma redução de 6 dB. Esta característica é conhecida como a “lei do inverso do quadrado”, aplicável ao ar livre e para todos os tipos de ondas irradiando a partir de uma fonte pontual.

Conforme apresentado no estudo bibliográfico, Pirm [30] em seus trabalhos envolvendo escritórios panorâmicos, observou que dentro de espaços razoavelmente absorvedores, o nível sonoro diminui continuamente assim que a distância entre fonte e receptor é aumentada. O decaimento não precisa seguir necessariamente a lei do inverso do quadrado. O decaimento pode ser de 5dB ou menor, mas em espaços tratados uniformemente, a taxa de redução tende a ser constante. O autor indica uma simulação tão próxima quanto possível de um campo livre para uma maximização da privacidade acústica e, também, ressalta que uma perda de 5 dB pelo dobro da distância é razoável para um espaço panorâmico bem planejado.

Com o objetivo de completar a análise do escritório idealizado como um todo, foram avaliadas quatro linhas de decaimento sonoro espacial.

#### **6.6.1 - Resultados dos Decaimentos Espaciais**

De forma análoga à apresentação dos resultados das simulações, os resultados dos decaimentos são apresentados em forma de gráficos, por grupo de estações, conforme ilustrado na Figura 6. 5.

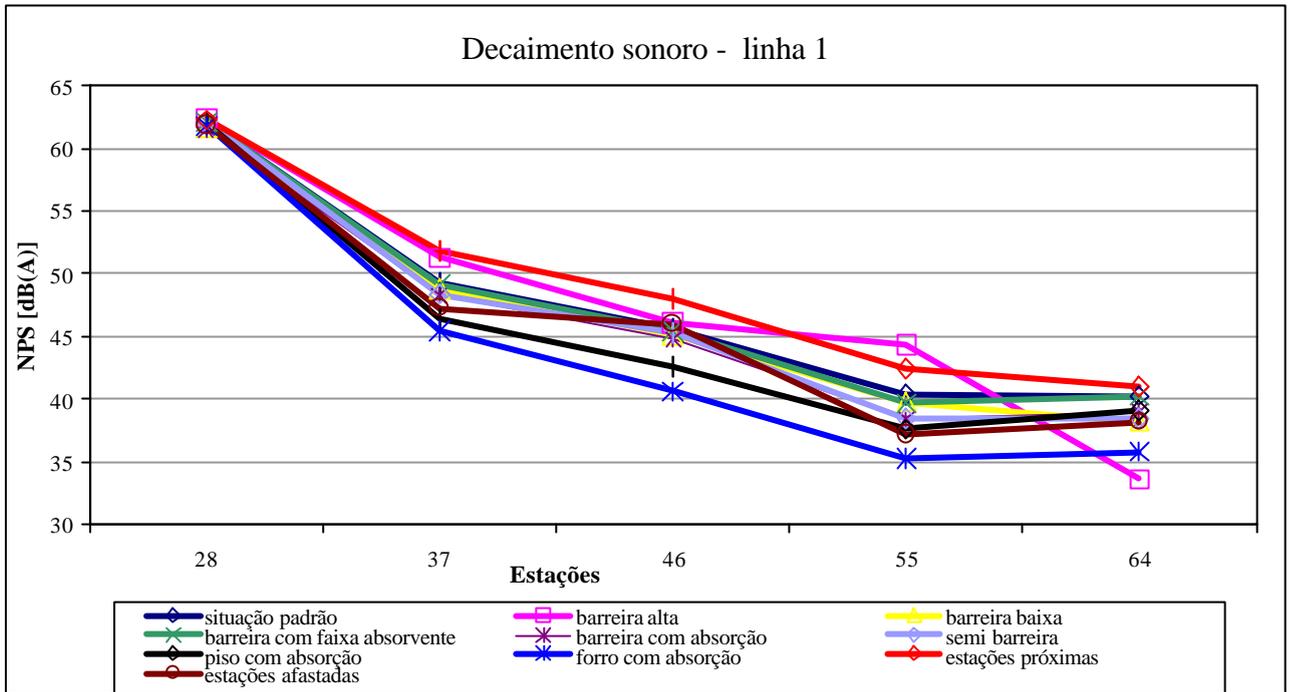


Figura 6.36 - Resultados dos ensaios simulados para o decaimento sonoro - linha 1

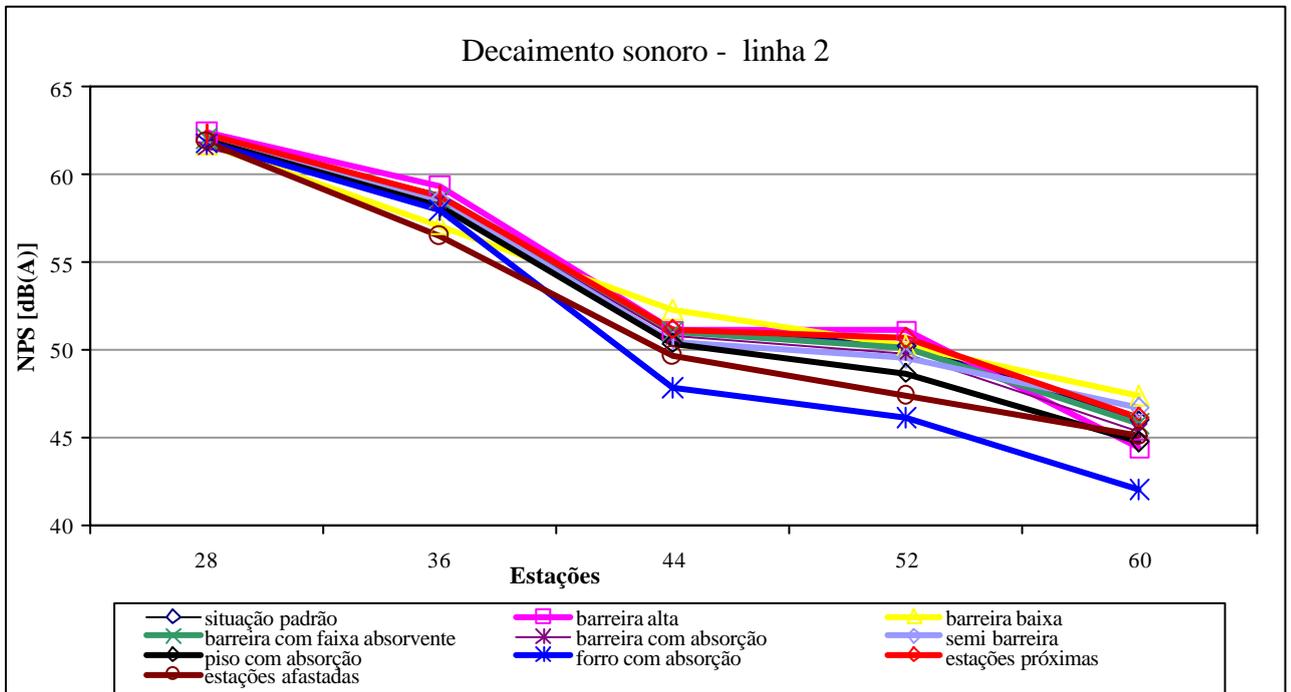


Figura 6.37 - Resultados dos ensaios simulados para o decaimento sonoro - linha 2

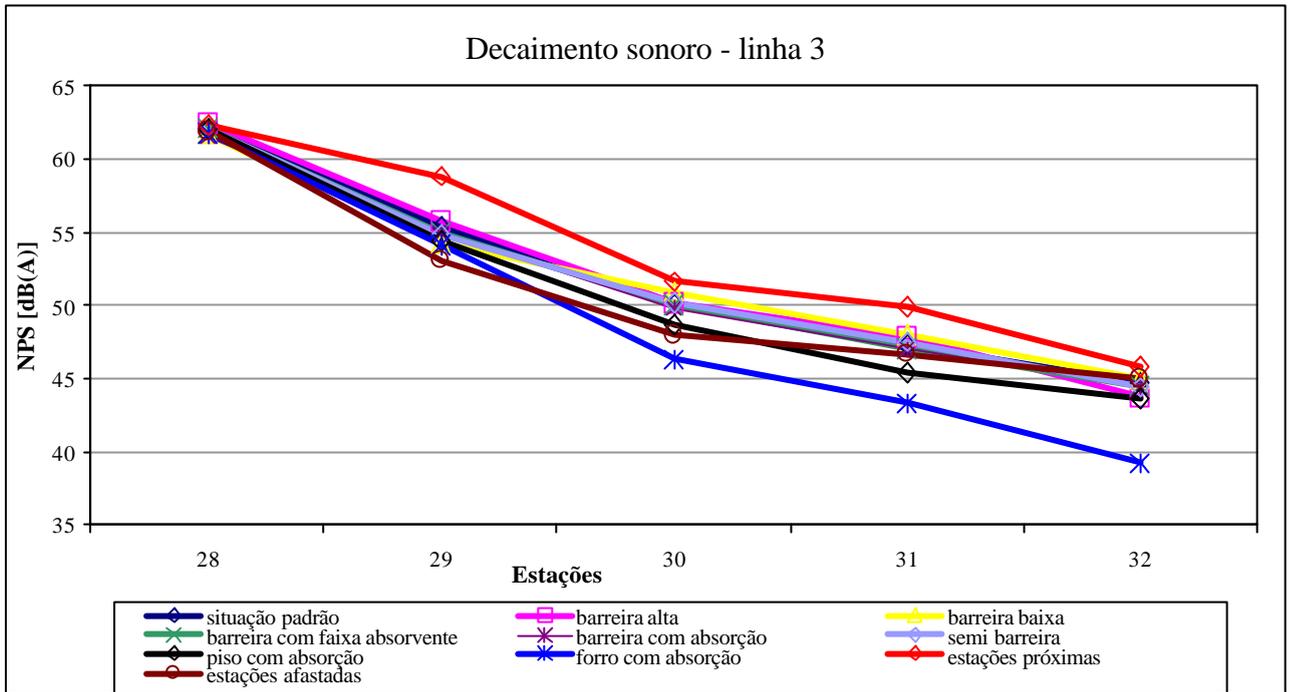


Figura 6.38 - Resultados dos ensaios simulados para o decaimento sonoro - linha 3

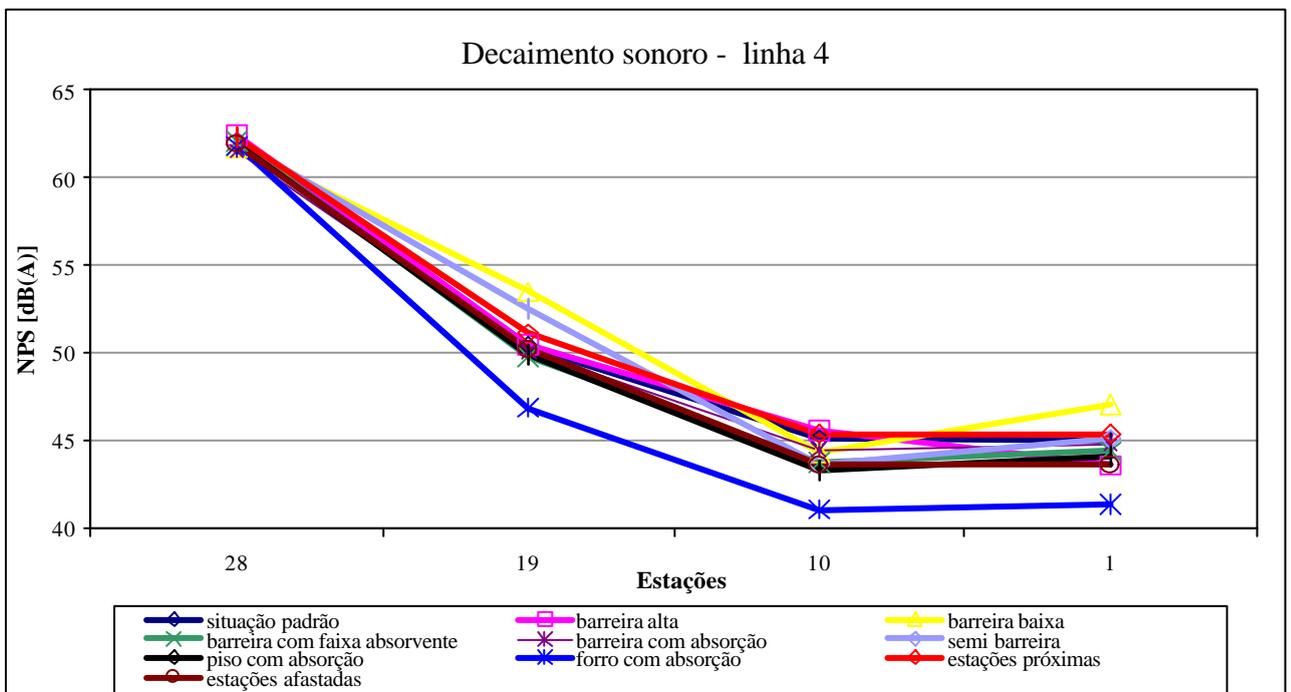


Figura 6.39 - Resultados dos ensaios simulados para o decaimento sonoro - linha 4

## 6.6.2 – Análise dos Resultados dos Decaimentos Sonoros Espaciais

### 1) Análise linha de decaimento 1 - Estações 28, 37, 46, 55 e 64 (ver Figura 6.5)

Para esta linha de decaimento sonoro, considerando todos os parâmetros, o decaimento é mais acentuado entre as estações 28 e 37. Entre as estações 37 e 55, o decaimento é menor, porém, com destaque para as curvas representantes dos parâmetros forro e piso mais absorventes, que promoveram maior queda no NPS.

De modo contrário, estações mais próximas promovem um aumento no nível sonoro. As curvas dos demais parâmetros mantiveram-se muito próximas da curva da situação-padrão. Entre as estações 55 e 64, a variação para todos os parâmetros foi mínima, mantendo os níveis praticamente constantes.

Para este grupo de estações, o parâmetro que promoveu maior decaimento foi o forro com maior absorção, e o que promoveu menor decaimento sonoro foi uma proximidade entre as estações.

### 2) Análise linha de decaimento 2 - Estações 28, 36, 44, 52 e 60 (ver Figura 6.5)

Para estas estações de trabalho, o decaimento sonoro apresentou-se mais suave e com poucas variações, para todos os parâmetros, entre as estações 28 e 36. A maior inclinação das curvas do gráfico, o que significa um decaimento sonoro maior, aconteceu entre as estações 36 e 44. Neste intervalo, os parâmetros forro absorvente e estações mais afastadas se destacam um pouco dos demais.

No intervalo seguinte, entre as estações 44 e 52, o decaimento é bastante suave. Os parâmetros forro e piso absorventes e estações afastadas destacam - se ainda mais, promovendo maior redução no nível sonoro. E finalmente, da estação 52 até a estação 60, o decaimento também foi suave, com uma inclinação acentuada para o forro absorvente.

Para este grupo de estações, o parâmetro que promoveu maior decaimento foi forro com maior absorção e em seguida, estações afastadas.

### **3) Análise linha de decaimento 3 - Estações 28, 29, 30, 31 e 32 (ver Figura 6.5)**

Nesta linha de decaimento, dois parâmetros se destacam em todo o conjunto: o forro promovendo grande decaimento sonoro entre estações, e estações próximas, com valores pobres de decaimento. No primeiro intervalo de estações, a inclinação das curvas é mais acentuada do que nos outros intervalos, havendo um destaque apenas da curva que representa estações mais próximas. As demais condições estão muito próximas da situação padrão.

No intervalo seguinte, entre as estações 29 e 30, de modo geral, o decaimento é mais suave, porém, permanecendo como destaque a curva estações próximas, com uma inclinação ainda maior. Neste mesmo intervalo, a influência do forro e piso absorventes e estações mais afastadas, começam a ser perceptíveis.

Entre as estações 30 e 31, a inclinação das curvas representantes de todos os parâmetros é bem mais suave, mantendo como destaque as mesmas curvas do intervalo anterior.

Por fim, no último intervalo entre as últimas estações analisadas, o forro absorvente apresenta a maior inclinação em toda sua variação, e com bastante destaque em relação às demais curvas. Neste intervalo, vale observar que a influência de maior afastamento entre as estações é bem menor. A influência do piso absorvente, e de modo um pouco mais acentuado, uma proximidade entre estações, também é reduzida.

### **4) Análise linha de decaimento 4 - Estações 28, 19, 10 e 1(ver Figura 6.5)**

Para estas estações, é bastante nítida a influência do forro absorvente no decaimento sonoro. Desde a estação central, onde está localizada a fonte sonora, até a estação 1, esta curva destaca - se. No primeiro intervalo entre as estações 28 e 19, há a maior inclinação de todas as curvas, o que significa a maior redução no nível sonoro. Também barreiras baixas têm influência no nível sonoro, porém de modo contrário ao forro, aumentando-o em relação a situação padrão.

Entre as estações 19 e 10, a inclinação de todas as curvas é mais suave. Exceto a curva do forro absorvente, as curvas de todos os outros parâmetros se situam muito próximas, não havendo destaque para nenhuma delas.

No último intervalo, a inclinação das curvas é praticamente zero, o que representa um nível sonoro constante neste intervalo.

### **6.7 – Sumário**

Neste capítulo foram feitas simulações numéricas para um escritório panorâmico idealizado, composto por 64 estações de trabalho, com o objetivo de avaliar de forma ampla o campo acústico nesta tipologia de espaço.

Primeiramente, uma fonte sonora, a fala, foi localizada em uma estação central deste ambiente, juntamente com a definição de nove variáveis de projeto, consideradas relevantes na composição de um espaço panorâmico. Assim, análises comparativas entre estações de trabalho em diferentes posições, permitiram uma avaliação da importância da fala e de cada variável na inteligibilidade /privacidade de estações contíguas e afastadas.

Para análise das simulações, as estações de trabalho foram agrupadas em função de sua localização em relação a fonte sonora. Os resultados foram apresentados em forma de curvas que representam os diversos parâmetros e são mostradas juntas à curva correspondente a situação-padrão. Para cada estação receptora, as respostas ao campo sonoro gerado pela fonte foram calculadas em níveis de pressão sonora (NPS) e em índice de transmissão sonora (STI). Para complementação do estudo do campo acústico, foi analisado o decaimento sonoro para quatro grupos de estações de trabalho.

## Capítulo 7

# CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisados os resultados de simulações de um escritório panorâmico composto por 64 estações de trabalho. De acordo com o estudo bibliográfico realizado, a conversa inteligível é inevitavelmente a que mais distrai a atenção em comparação a outros ruídos, sendo a interferência com a fala um efeito particularmente incômodo. Assim, assumindo-se a fala como principal fonte sonora nestes ambientes, para cada estação receptora, foram avaliadas a sua influência e de nove parâmetros de projeto de escritórios panorâmicos.

A influência de cada parâmetro foi avaliada através de dois índices, o nível de pressão sonora (NPS) e o índice de transmissão da fala (STI), além da análise do decaimento sonoro. Para o NPS, o ruído de fundo foi desprezado, e para o STI, o ruído de fundo considerado foi medido em um escritório real quando vazio. As conclusões para os dois índices foram semelhantes.

De forma análoga a análise computacional dos resultados, as conclusões são apresentadas de acordo com grupos formados pelos parâmetros de projeto.

### Barreiras:

Dentre todas as variáveis que agem para produzir o ambiente acústico final de um escritório panorâmico ou escritório de plano aberto, as barreiras são citadas como sendo um dos parâmetros mais importantes.

De um modo geral, para os grupos de estações estudados, conclui-se que a importância da barreiras depende de sua localização em relação a fonte, a circulação, e a presença de mobiliário, variando assim a importância de cada uma das configurações propostas. O mesmo ocorre dentro de um mesmo grupo de estações, onde a influência de cada configuração também é variável.

Para as estações localizadas posteriormente à fonte sonora, ou seja, de costas para o orador, barreiras baixas são mais favoráveis, promovendo uma redução no nível de pressão sonora. A redução na altura permite que maior parcela de energia irradiada pela fonte atravesse o espaço entre o topo da barreira e o teto. Com isto, menos energia é refletida pelas barreiras que circundam a fonte

na direção destas estações. De modo contrário, um aumento na altura faz com que maior número de raios seja refletido para estas estações.

Para as estações frontais, adjacentes ou não, barreiras baixas são desfavoráveis, permitindo que maior parcela de energia sonora alcance o receptor diretamente ou após reflexões de primeira ordem. De modo semelhante, as semi-barreiras também são desfavoráveis para estações frontais, adjacentes ou não, pois permitem que os raios sonoros atinjam os receptores por difração, aumentando o nível sonoro no ponto receptor.

Nas estações afastadas, a influência das diferentes configurações foi pouco importante. As demais variações das barreiras como maior absorção e barreiras com faixa absorvente mostraram-se eficientes na redução do nível sonoro em um número muito reduzido de estações dentro do conjunto total.

#### Absorção:

Em todos os artigos referentes ao estudo acústico de escritórios panorâmicos, a utilização de um forro com alta absorção sonora é indicado como fator de fundamental importância. Por ser a principal área de reflexão de sons gerados no ambiente, o forro deve absorver o som que o alcança e evitando que o mesmo reflita de volta ao local de origem e demais estações de trabalho. Neste estudo, para todas as estações analisadas, este fato é claramente percebido, corroborando o estudo bibliográfico. O uso de um forro adequado a este tipo de ambiente promove reduções significativas no nível sonoro. Como explicado anteriormente, em geral, busca-se uma redução no nível de pressão sonora total resultante da intrusão da fala, a fim de garantir-se a privacidade e a capacidade de concentração em um local de trabalho.

De acordo com a pesquisa realizada, para complementar as melhores condições para o alcance da privacidade sonora, o acabamento mais indicado para o piso é o carpete. Apesar da absorção promovida por esta superfície ser menos importante que a absorção gerada pelo forro ou pelo entorno de uma forma geral, uma vez que parte do som incidente é bloqueada pelo mobiliário diminuindo assim sua área livre, o tratamento adequado do piso é um item importante. De forma análoga à análise do forro, para a maior parte das estações analisadas, independente de sua posição em relação à fonte sonora, um piso absorvente promove reduções perceptíveis no nível sonoro total.

Em relação às barreiras com maior absorção, as alterações promovidas foram pouco significativas. Os valores dos coeficientes de absorção adotados foram obtidos de barreiras

encontradas em um escritório real. É possível para que maiores alterações sejam promovidas por barreiras com maior absorção, seja necessário uma modificação nos valores adotados.

#### Espaçamento:

Do mesmo modo aos parâmetros citados anteriormente, alterações nos espaçamentos entre as estações foram feitas em relação ao escritório padrão, dando origem a novos padrões de estações de trabalho.

Condizente ao estudo bibliográfico, para a grande maioria de estações analisadas, um maior afastamento entre as estações é fator determinante na redução do nível sonoro total. Isto leva a uma condição acústica mais adequada a um escritório panorâmico. Esta condição ocorre em função de maior decaimento sonoro promovido pelo aumento do trajeto de raios diretos ou refletidos. De forma antagônica, uma maior proximidade entre as estações, apresenta-se como condição desfavorável quando se quer reduzir o nível de pressão sonora total. Quanto mais próximas, menor o decaimento sonoro, menor a redução sonora no ponto receptor.

#### Decaimento:

De um modo geral, o decaimento sonoro referente ao nível de pressão sonora global atinge valores próximos a 5 dB por estação. Os parâmetros forro e piso mais absorventes destacam-se nesta análise na redução do nível sonoro total. O aumento na inclinação da curva de decaimento ocorre de forma mais acentuada para as estações adjacentes à estação central. Com menor destaque em relação à situação-padrão, para os demais parâmetros analisados, as conclusões também são semelhantes às obtidas quando considerados os índices de avaliação NPS e STI.

Como sugestões para trabalhos futuros na mesma linha, pode-se enumerar:

- 1) Estudar o ambiente panorâmico considerando outros tipos de fontes sonoras, tais como ar condicionado, telefone, computadores.
- 2) Investigar a influência de um número variado de fontes sonoras.
- 3) Considerar diferentes níveis de ruído de fundo.
- 4) Repetir o estudo para demais materiais de acabamento, variando-se os valores dos coeficientes de absorção.

## Apêndice I

### ÍNDICE DE ARTICULAÇÃO – AI

O conceito do AI foi derivado a partir de um trabalho teórico realizado nos laboratórios de telefone Bell, em 1940. A pesquisa nestes laboratórios, é geralmente considerada como uma das partes clássicas da pesquisa no campo acústico, com respeito ao cuidado e eficácia que caracteriza o trabalho. Este foi iniciado estabelecendo-se as características da fala e da escuta em termos de: espectro de uma fala normal de uma mulher e de um homem, médias de ambos por um longo período e, distribuições estatísticas de níveis; os limiares da audição e de "sentimento" que estabelece o alcance dentro da qual os sons da fala devem morrer; mascaramento em bandas críticas e, acima de tudo, a importância de diferentes regiões de frequência e intensidade para o processo de reconhecimento do constante trocar de padrões de vogal-consoante em falas. Com base em dados relacionados à inteligibilidade de fala filtrada e certas suposições, considerando a equivalência de largura de banda e nível de sinal (quando ambos são medidos em potência equivalente), French e Steinberg, em 1947, esboçaram um procedimento, pelo qual um índice de inteligibilidade da fala poderia ser calculado a partir de medições puramente físicas. Este procedimento recebeu a denominação de Índice de Articulação AI (*Articulation Index*). Os passos a serem seguidos no cálculo do AI foram desenvolvidos mais tarde e, são publicados como ANSI STANDARD S.3.5-1969.

O *Articulation Index* (AI) é um método de determinar a inteligibilidade da fala da maneira como a mesma é ouvida pelo ouvinte, na presença de ruído de fundo contínuo. A medição básica é a razão sinal/ruído ponderada, baseada em níveis sonoros normais de fala e níveis de ruído de fundo, medidos ou estimados. Este método compara o nível da fala com o nível do ruído de mascaramento em bandas de frequência de terço de oitava, de 200 a 5000 Hz. Estas 20 bandas foram escolhidas por serem consideradas de igual contribuição para a compreensão da fala e são proporcionais à largura de banda crítica do ouvido, como determinado a partir de estudos de audibilidade e mascaramento. Diferentes níveis em dB são multiplicados por diferentes fatores de ponderação, que refletem a importância relativa do sinal de intrusão da fala em cada frequência de banda de oitava.

O AI é um número entre o zero e a unidade. O valor zero indica que a fala é totalmente inteligível e, o valor 1(um) indica total inteligibilidade. Isto significa que virtualmente todas as palavras faladas são compreendidas, mesmo que as palavras sejam lidas de listas e não

relacionadas. Vários anos de medições e observações têm mostrado que um AI de 0,05 provê um grau de privacidade confidencial para a maioria dos ouvintes, enquanto um AI de 0,20 é equivalente a um grau de privacidade normal. Assim que o AI se eleva acima do nível normal, a inteligibilidade da fala cresce rapidamente. De fato, uma vez que o índice de articulação atinja uma faixa de 0,30 a 0,40, mudanças adicionais no AI são de pequena importância em termos de graus relativos de insatisfação com privacidade de fala.

## Apêndice II

### PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA -TL CLASSE DE TRANSMISSÃO SONORA - STC

Perda de transmissão sonora aérea refere-se ao som que é transmitido pelo ar até que ele encontre uma partição. Neste encontro, porções variadas do som são refletidas de volta para a fonte, absorvidas dentro da partição ou transmitidas através da mesma, onde continuará como som aéreo no espaço ao lado ou sala receptora. A medida física básica do valor de isolamento sonoro de uma partição é a razão da potência sonora incidente em um de seus lados e da potência sonora transmitida ao espaço adjacente. Expressa em escala logarítmica, esta razão é conhecida como perda de transmissão sonora, TL (*Transmission Loss*).

As propriedades de isolamento de uma partição usualmente variam com a frequência, sendo relativamente pobre em baixas frequências e crescendo rapidamente com o aumento da mesma. Além disso, a TL depende também do ângulo de incidência, decrescendo substancialmente enquanto a direção do som incidente varia de normal (90°) à incidência paralela a superfície (0°) (*grazing waves*).

Para avaliar as propriedades de isolamento sonoro da partição, a diferença entre o nível de intensidade incidente e o nível de intensidade transmitido, é então desejada. Esta diferença está relacionada ao coeficiente de transmissão ( $\tau$ ).

$$\tau = \frac{W_i}{W_t} \quad \Rightarrow \quad TL = 10 \log \frac{W_i}{W_t} = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad [\text{dB}]$$

onde:

$W_i$  = potência sonora incidente

$W_t$  = potência sonora transmitida

$\tau$  = coeficiente de transmissão

TL = perda de transmissão sonora, em decibels

Para ondas que se aproximam de uma parede de grandes dimensões com uma incidência normal, a perda de transmissão é dada por:

$$TL = \left( 1 + \frac{\pi M f}{400} \right) \quad [\text{dB}]$$

onde:

M = massa superficial, (kg/m<sup>2</sup>)

f = frequência, (Hz)

Em uma sala, é uma boa aproximação assumir que as ondas sonoras de baixa frequência são distribuídas de maneira aleatória, cobrindo ângulos de 0° a 80°. Isto decresce a perda de transmissão sonora em torno de 5 dB.

$$TL = 10 \log \left( 1 + \frac{\pi M f}{400} \right) - 5 \quad [\text{dB}]$$

De acordo com as fórmulas acima, vale ressaltar que: a) para reduzir a transmissão sonora em salas adjacentes, a partição deve ser a mais “pesada” possível e, b) sons de baixa frequência são mais difíceis de bloquear.

A perda de transmissão sonora (TL) é medida em laboratório pelo método “duas salas”, onde uma fonte sonora é localizada em uma das salas e uma amostra do material a ser testado é instalado em uma abertura entre as duas salas. O sinal da fonte para o teste consiste de um ruído rosa, em bandas de terço de oitava, com frequências centrais de 100 a 5000 Hz. O nível sonoro é medido em ambas as salas, a sala fonte (L<sub>f</sub>) e a sala receptora (L<sub>r</sub>) e a diferença entre eles é redução de ruído, NR (*Noise Reduction*), expressa em decibels. Como o nível sonoro medido na sala receptora depende não somente do som transmitido através do material, mas também de sua área e da absorção total da sala, o NR necessita ser normatizado para levar em conta estes fatores. O resultado é TL em cada uma das 18 bandas de frequência. A relação entre NR e TL é dada por:

$$TL = L_s - L_r + 10 \log \frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

onde:

S = área da amostra

A = absorção total da sala receptora

Os dados da TL podem ser expressos em um único número de avaliação, chamado de STC ou Classe de Transmissão Sonora (*Sound Transmission Class*), usado para comparar partições com propósitos iguais. Para determinar o STC de uma amostra, as perdas de transmissão sonora (TL)

para um dado material são medidas em bandas de oitava, na faixa de frequência de 125 a 4000 Hz. Estes valores são comparados com uma família de curvas, Contornos de Classe de Transmissão Sonora, e confrontadas ao contorno relativo mais alto, aos quais os valores da TL caiam abaixo por uma média de não mais que 2 dB e, em qualquer banda, não mais que 8 dB. O valor nominal da curva STC corresponde ao valor da perda de transmissão em 500Hz para esta curva.

O STC foi desenvolvido especificamente para avaliar partições realcionadas a ruídos (como a fala) que têm a maior parte de sua energia nas faixas de frequências média e alta. Para outros tipos de ruído, o STC deve ser usado com cautela.

### Apêndice III

#### ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)

Quando um orador se dirige a uma audiência, seja dentro de uma sala, em um auditório, ou em áreas externas com um sistema de alto-falantes, o sinal da fala alcançando o ouvinte será distorcido em algum “grau”, o que pode levar a uma redução da inteligibilidade da fala. Causas prováveis são ecos e reverberações, deformação espectral, ruído ambiental, etc. Assim, em termos de sistema de transmissão sonoro com o sinal da fala original produzido pelo orador como dado de entrada, e o som alcançando o ouvinte como dado de saída, o desempenho do sistema não é perfeito: de modo geral, uma vez que os dados de saída não são uma cópia perfeita dos dados de entrada. Os autores T. Houtgast e H. J. M. Steeneken mostraram que as imperfeições da relação dados de entrada - dados de saída de um sistema de transmissão sonora pode ser descrito adequadamente por uma Função Transferência de Modulação (MTF - *Modulation Transfer Function*), que pode ser usada para quantificar o efeito na inteligibilidade da fala.

A dimensão da MTF a qual se estende as modulações no sinal original são reduzidas em função da modulação da frequência. As modulações são definidas pela intensidade do envelope do sinal: é somente no domínio da intensidade que o ruído interfere ou reverberação irão afetar somente o grau de modulação de uma função senoidal sem afetar a forma senoidal propriamente dita.

A MTF de um sistema de transmissão sonora pode ser determinada de vários modos, o princípio sempre sendo que o fator de redução da modulação é derivado de uma comparação das modulações de intensidade dos dados de saída e dados de entrada do sistema.

A intensidade média do sinal teste é um parâmetro crítico, e deveria ser relacionado a aquela da fala que é normalmente produzido pelo orador naquela posição. Como regra, para cada banda de oitava considerada, o  $L_{eq}$  do sinal-teste deve ser ajustado ao  $L_{eq}$  da fala típica para a condição sendo testada.

O desempenho de um sistema de transmissão sonora é quantificado por uma família de curvas, uma curva para cada banda de oitava de um ruído, e cada curva definida por 14 pontos na escala de frequência da modulação (valores de F a partir de 0,63 até 12,5 Hz em intervalos de 1/3 de oitava).

### **STI - (*Speech Transmission Index*)**

O desempenho de um sistema de transmissão sonora sendo quantificado por uma família de curvas MTF, compreendendo  $7 \times 14 = 98$  valores, leva à questão de como transformar este conjunto de dados em um simples índice que represente o efeito do sistema de transmissão na inteligibilidade da fala: o índice de transmissão da fala (STI - *Speech Transmission Index*). O critério de relevância desta transformação é, claro, para uma larga variedade de sistemas de transformação com diferentes tipos de “distúrbios”, e a relação entre os valores STI e o efeito na inteligibilidade da fala é único, isto é, não é para um sistema específico.

O passo mais importante nesta transformação é a conversão de cada dos 98 m valores em aparente razão sinal-ruído  $(S/N)_{app}$  : sem levar em conta o tipo atual de “perturbação” causada no valor de m. É interpretada como se tivesse sido causada por um ruído interferente exclusivamente.

### **STI e a Inteligibilidade da Fala**

Existe um grande número de dados experimentais da relação entre o STI e a inteligibilidade da fala obtidos com testes entre orador e ouvinte. Estas relações típicas são mostradas na Figura 6.34. Estas relações são somente ilustrativas uma vez que, além do desempenho do sistema de transmissão, a quantificação da inteligibilidade é também afetada por outros fatores, como o grau de treinamento e familiaridade do orador e ouvinte com aspectos específicos do assunto da fala empregado no teste.

Os intervalos de qualificação (ruim.....excelente) especificados ao longo da abscissa na Figura. 1 são baseados em um estudo bem amplo, envolvendo vários testes de inteligibilidade em diferentes línguas. Estes intervalos provêm uma base para a interpretação dos valores medidos de STI.

Na faixa central, cada intervalo de qualificação corresponde a um intervalo de 0,15 ao longo da escala do STI. Isto implica que diferenças desta magnitude são importantes: para duas condições com uma diferença no STI de 0,15, a diferença na inteligibilidade da fala é significativa e claramente percebida. Em conformidade, um dispositivo de medição de STI requer que a precisão seja (isto é, o desvio padrão para repetidas medições) consideravelmente menor que 0,15.

## Apêndice IV

### CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE RUÍDO

Para a especificação ou julgamento da aceitabilidade sonora de um espaço, critérios de avaliação de ruído devem ser escolhidos. Para tanto, existem diversas famílias de curvas que especificam os limites de pressão sonora em diferentes frequências e que são usadas para quase todas as aplicações. A forma destas famílias de curvas estão amplamente relacionadas aos contornos de audibilidade e são, normalmente, usadas como níveis máximos de pressão sonora permitidos em cada banda de oitava. A definição da curva de critério para quantificar o ruído será determinada pelo ponto mais alto do espectro deste ruído.

#### 1 - Curvas NC (*Noise Criterion Curves*) - 1957

Originalmente desenvolvida nos Estados Unidos, as curvas NC são uma família de curvas de níveis de pressão sonora versus frequência centrais em bandas de oitava. Estas curvas são aplicadas nas especificações de ruído total, incluindo as atividades normais do espaço e com todos os sistemas operando. As curvas NC têm duas aplicações: avaliar a aceitabilidade de um ruído em um ambiente existente ou, ajudar na especificação de níveis de ruído aceitáveis em um espaço. Estas curvas foram baseadas nas premissas que condições para a comunicação pela fala ou para a escuta de música, televisão ou rádio são desejadas, e que os níveis, em bandas de oitava, acima ou abaixo de 1000 Hz, não deveria ser tão alto que produzisse um espectro de incômodo. Isto é, no espectro do ruído, os valores dos níveis de pressão sonora das demais bandas não deveriam ser muito maiores ou menores que 1000 Hz. As formas destas curvas compensam a resposta da audibilidade do ouvido humano, permitindo níveis mais altos nas baixas frequências.

#### 2 - Curvas RC (*Room Criterion Curves*) - 1981

É uma família de curvas em níveis de pressão sonora versus frequências centrais em bandas de oitava, indicada para a avaliação e especificação de projetos de sistemas de tratamento de ar, calculadas somente para escritórios. As curvas RC não levam em consideração as características de audição das pessoas.

### 3 - Curvas NCB (*Balanced Noise Criterion Curves*) - 1989

É um conjunto de curvas originárias de uma versão revisada das curvas NC. Tanto as curvas NC e NCB se aplicam ao ruído total de uma sala ocupada, com as atividades normais em curso e todos os sistemas mecânicos em funcionamento. A derivação das curvas NCB é baseada em duas premissas. Primeiro, a forma das curvas é determinada levando-se em consideração a audibilidade das bandas de oitava calculadas, de modo a torná-las iguais. Segundo, o número dado a uma curva NCB é a média dos níveis, em decibel, em bandas de oitava com frequências centrais em 500, 1000, 2000 e 4000Hz.

### 4 - Curvas NR (*Noise Rating Curves*) - 1989

A partir das curvas NC, as curvas NR foram desenvolvidas na Europa, propondo uma ligeira modificação nas formas e ampliando a faixa de frequência e níveis sonoros.