

CAROLINA REICH MARCON PASSERO

**AVALIAÇÃO E ADEQUAÇÃO ACÚSTICA DE ESCRITÓRIOS
PANORÂMICOS ATRAVÉS DE MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES**

Tese apresentada como requisito para obter o título em doutor em engenharia mecânica do curso de doutorado em engenharia mecânica da UFPR, na área de concentração Fenômenos de Transportes e Mecânica do Sólidos.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Paulo Henrique Trombetta Zannin

CURITIBA

2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

TERMO DE APROVAÇÃO

CAROLINA REICH MARCON PASSERO

AVALIAÇÃO E ADEQUAÇÃO ACÚSTICA DE ESCRITÓRIOS PANORÂMICOS
ATRAVÉS DE MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES.

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia
Mecânica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor
de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando H. de Oliveira Iazzetta
USP/SP

Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger
USP/SP

Prof. Dr. Adriano Scremin
UFPR/PR

Prof. Dr. Paulo H. Trombetta Zannin
UFPR/PR

Prof. Dr. Eduardo Márcio de Oliveira Lopes
Presidente

Curitiba, 15 de maio de 2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me ensinarem o valor e a importância do estudo e da instrução para a minha vida.

Agradeço ao meu irmão, José Augusto, pelo apoio e confiança.

Agradeço ao meu marido, Gustavo, pelo apoio, compreensão e valioso auxílio durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Paulo Henrique Trombetta Zannin, por acreditar no meu trabalho e por me orientar por esses quatro anos.

Agradeço aos meus colegas do LAAICA pela ajuda prestativa durante a realização deste trabalho, em especial ao meu colega e amigo David.

Agradeço ao DAAD (Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à Fundação Araucária pelo fornecimento de equipamentos e software, sem os quais não seria possível a realização desta tese.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante todo o período de realização deste doutorado.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná por me acolher como aluna desde o período da graduação.

Agradeço às empresas que permitiram a realização da pesquisa no interior de suas instalações: Sadia, Copel, ALL e Volvo.

Agradeço aos meus amigos pelo apoio e carinho.

E, finalmente, agradeço à força superior que me fez superar obstáculos e dificuldades e concluir com êxito este doutorado.

RESUMO

Este trabalho estudou os parâmetros acústicos e arquitetônicos que interferem na avaliação e na adequação acústica de escritórios panorâmicos. Essa pesquisa foi realizada através da análise da bibliografia existente e através do estudo de caso de escritórios reais. O objetivo deste trabalho foi gerar dados que tornassem possível avaliar e incrementar a qualidade acústica de escritórios panorâmicos, respondendo ao seguinte questionamento: quais são as características de um escritório panorâmico acusticamente adequado? Para isso, foram realizadas: 1) avaliações subjetivas através da aplicação de questionários; 2) avaliações objetivas através de medições e simulações acústicas e 3) análises das alterações das condições acústicas através de simulações computacionais com alterações das características de absorção sonora, características arquitetônicas e de ruído ambiente. Observou-se nas respostas subjetivas que a maioria dos entrevistados avalia seu ambiente de trabalho como um local ruidoso, além disso, os usuários evidenciaram maior demanda pela privacidade que pela inteligibilidade da fala, assim como demonstraram maior necessidade de concentração no trabalho e menor necessidade de integração com outros colegas de trabalho. Em relação às medições, essas se mostraram uma etapa fundamental para a calibração do modelo computacional, mas não foram suficientes para a avaliação dos escritórios panorâmicos, pois geraram dados pontuais, não sendo possível avaliar os ambientes em sua totalidade apenas através de medições. Assim, foram realizadas simulações computacionais do tempo de reverberação (T_r), do índice de transmissão da fala (STI) e da taxa de redução do ruído com o dobro da distância (DL_2). Através das simulações do STI, foi possível obter o raio de distração (r_D), o qual se mostrou um descritor adequado para a avaliação da inteligibilidade e da privacidade da fala dos escritórios em sua totalidade. As simulações com alterações das características dos escritórios são uma ferramenta válida para a análise da relação entre os parâmetros e as características de condicionamento acústico e do ruído ambiente em escritórios panorâmicos. Através dessas simulações foi possível a sugestão de valores ideais para parâmetros acústicos em escritórios panorâmicos. Assim, este trabalho concluiu que, através do método adotado, é possível avaliar e incrementar a qualidade acústica de escritórios panorâmicos.

Palavras chaves: Escritórios panorâmicos. Avaliação acústica. Condicionamento acústico. Inteligibilidade e privacidade da fala. Medição e simulação computacional.

ABSTRACT

A study was made of the acoustic and architectural parameters that interfere in the evaluation and acoustic conditioning of open plan offices. This research was based on an analysis of the existing bibliography and on a case study of real offices. The objective was to generate data to allow for the evaluation and improvement of the acoustic quality of open plan offices by asking the following question: What are the characteristics of an open plan office with proper acoustic conditioning? To find the answer, the following steps were carried out: 1) subjective assessments by means of questionnaires; 2) objective evaluations based on acoustic measurements and simulations; and 3) analyses of the alterations in acoustic conditions through computer simulations, with alterations of the acoustic absorption, architectural and ambient noise characteristics. The subjective answers revealed that most of the interviewees evaluated their work environment as noisy. They expressed a greater demand for privacy than for speech intelligibility, and also demonstrated a need for better concentration on work and less need for integration with their work colleagues. The measurements proved to be an essential step in the calibration of the computational model, but were insufficient for the evaluation of the open plan offices because they generated pointwise data, thus precluding the evaluation of the entire environments based only on measurements. Therefore, computational simulations were made of the reverberation time (T_r), the speech transmission index (STI), and the rate of spatial decay of sound pressure levels per distance doubling (DL_2). Based on the STI simulations, it was possible to obtain the radius of distraction (r_D), which proved to be a suitable descriptor to evaluate speech intelligibility and privacy through the open plan offices. Simulations of alterations of the characteristics of offices are a good tool to analyze the relationship between the parameters and the acoustic conditioning and ambient noise characteristics in open plan offices. Based on these simulations, it was possible to suggest ideal values for acoustic parameters in such offices. Therefore, it was concluded that the method adopted in this work enables the evaluation and improvement of the acoustic quality of open plan offices.

Keywords: Open plan offices. Acoustic evaluation. Acoustic conditioning. Speech intelligibility and privacy. Acoustic measurements and computer simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Desenho 1. Onda sonora 0,005 segundo após ter sido emitida pela fonte.	26
Desenho 2. Onda sonora 0,01 segundo após ter sido emitida pela fonte.	26
Desenho 3. Onda sonora 0,02 segundo após ter sido emitida pela fonte.	27
Desenho 4. Onda sonora 0,06 segundo após ter sido emitida pela fonte.	27
Desenho 5. Lei da Reflexão.....	28
Desenho 6. Difusão do som.....	28
Desenho 7. Espalhamento por uma superfície corrugada.....	32
Desenho 8. Técnica de traçado de raio cônico (esquerda) e traçado piramidal (direita).....	81
Desenho 9. Modelagem em 3D escritório 1.	115
Desenho 10. Modelagem em 3D escritório 2.	116
Desenho 11. Modelagem em 3D escritório 3.	116
Desenho 12. Modelagem em 3D escritório 4.	117
Desenho 13. Modelagem em 3D escritório 5.	117
Desenho 14. Passagem do som nas estações centrais no escritório 4, simulação computacional.....	162
Desenho 15. Caracterização gráfica do raio da estação e do raio abrangendo as estações adjacentes.....	201
Esquema 1. Medição do tempo de reverberação.	109
Esquema 2. Medição do índice de transmissão da fala.	111
Fotografia 1. Escritório administrativo de indústria de aço, localizado em Curitiba.	14
Fotografia 2. Escritório administrativo de banco em Curitiba.....	15
Fotografia 3. Larkin Administration Building, projetado por Frank Lloyd Wrigh , 1904, Estados Unidos, princípios Tayloristas.....	88
Fotografia 4. Osram Offices, projetado por Walter Henn, 1963, Alemanha, princípios do “Bürolandschaft”.	90
Fotografia 5. Vista geral do escritório utilizado no estudo piloto.	101
Fotografia 6. Vista geral do escritório 1.	103
Fotografia 7. Vista geral do escritório 2.	103
Fotografia 8. Vista geral do escritório 3.	104
Fotografia 9. Vista geral do escritório 4.	104
Fotografia 10. Vista geral do escritório 5.	105
Fotografia 11. Analisador acústico modelo BK 2260.	107
Fotografia 12. Fonte dodecaédrica (Brüel e Kjaer 4296).	109
Fotografia 13. Boca artificial (Brüel e Kjaer 4227).	111
Fotografia 14. Área no escritório 3 onde foi locada a fonte 1.	150
Fotografia 15. Área no escritório 3 onde foi locada a fonte 3.	150
Fotografia 16. Estação de trabalho no escritório 4.	152
Fotografia 17. Estação de trabalho no escritório 2.	152
Fotografia 18. Forro acústico no escritório 4.	157
Fotografia 19. Localização dos monitores nos postos de trabalho no escritório 3.....	161
Fotografia 20. Passagem do som nas estações centrais no escritório 4, situação real.....	161

Gráfico 1. Resposta impulsiva de uma sala evidenciando o som direto, as reflexões iniciais, as reflexões tardias ou som reverberante, e o ruído de fundo ou som ambiente.....	17
Gráfico 2. Curvas de critério de ruído de fundo (NC).....	23
Gráfico 3. Forma aproximada do espectro do ruído de mascaramento.....	25
Gráfico 4. Respostas impulsivas na medição do coeficiente de espalhamento.....	35
Gráfico 5. Redução do nível sonoro com a distância da fonte.....	40
Gráfico 6. Coeficiente de absorção da fibra de vidro (densidade 48 kg/m ³) nas espessuras de 25mm, 50mm e 100mm.....	43
Gráfico 7. Tempo de reverberação ideal relacionado ao volume e função da sala.....	48
Gráfico 8. Representação da curva de distribuição espacial do som (1: curva de distribuição sonora em campo aberto; 2: curva de distribuição sonora espacial; eixo x (m): distância da fonte ao receptor (escala logarítmica); eixo y (dB)- diferença entre Lp (nível de pressão sonora no ponto de medição) e Lw (nível de potência sonora da fonte)).....	51
Gráfico 9. Obtenção de T ₂₀ e T ₃₀ a partir da curva de decaimento.....	66
Gráfico 10. Síntese do método de cálculo híbrido utilizado pelo software Odeon.....	80
Gráfico 11. Relação entre a redução do desempenho no trabalho e aumento dos valores de STI.....	95
Gráfico 12. Tempo de trabalho nos escritórios avaliados.....	128
Gráfico 13. Fontes de maior incômodo nos escritórios avaliados.....	131
Gráfico 14. Grau de falta de privacidade.....	133
Gráfico 15. Grau de falta de inteligibilidade.....	133
Gráfico 16. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 1, calibração do modelo computacional.....	153
Gráfico 17. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 2, calibração do modelo computacional.....	154
Gráfico 18. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 3, calibração do modelo computacional.....	154
Gráfico 19. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 4, calibração do modelo computacional.....	155
Gráfico 20. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 5, calibração do modelo computacional.....	155
Gráfico 21. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 1, calibração do modelo computacional.....	158
Gráfico 22. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 2, calibração do modelo computacional.....	159
Gráfico 23. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 3, calibração do modelo computacional.....	159
Gráfico 24. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 4, calibração do modelo computacional.....	159
Gráfico 25. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 5, calibração do modelo computacional.....	160
Gráfico 26. T _r médio, por frequência em banda de oitava, simulado nos escritórios, situação original.....	169
Gráfico 27. T _r médio para as frequências em banda de oitava de 500 a 2000 Hz, simulado nos escritórios nas seis situações, comparação com o volume.....	199
Mapa 1. T _r em 1000 Hz no escritório 1.....	164
Mapa 2. T _r em 1000 Hz no escritório 2.....	165

Mapa 3. T_r em 1000 Hz no escritório 3.	166
Mapa 4. T_r em 1000 Hz no escritório 4.	167
Mapa 5. T_r em 1000 Hz no escritório 5.	168
Mapa 6. STI simulado no escritório 1, situação real. P4 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=1,00m$. A linha mais longa em P4 indica a direção da fonte sonora.	172
Mapa 7. STI simulado no escritório 2, situação real. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=1,50m$. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	173
Mapa 8. STI simulado no escritório 3, situação real. P2 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=2,00m$. A linha mais longa em P2 indica a direção da fonte sonora.	174
Mapa 9. STI simulado no escritório 4, situação real. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=2,50m$. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	175
Mapa 10. STI simulado no escritório 5, situação real. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=2,00m$. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	176
Mapa 11. STI simulado no escritório 2, situação real. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora. Ampliação do mapa 7.	178
Mapa 12. STI simulado no escritório 1, situação A, com ruído fraco. P4 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P4 indica a direção da fonte sonora.	185
Mapa 13. STI simulado no escritório 1, situação D, com ruído fraco. P4 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P4 indica a direção da fonte sonora.	186
Mapa 14. STI simulado no escritório 2, situação A, com ruído intenso. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	189
Mapa 15. STI simulado no escritório 2, situação D, com ruído intenso. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	189
Mapa 16. STI simulado no escritório 2, situação A, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	190
Mapa 17. STI simulado no escritório 2, situação D, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	190
Mapa 18. STI simulado no escritório 4, situação D, com ruído intenso. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	193
Mapa 19. STI simulado no escritório 4, situação A, com ruído intenso. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	194
Mapa 20. STI simulado no escritório 4, situação A, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	195

Mapa 21. STI simulado no escritório 4, situação C, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	195
Mapa 22. STI simulado no escritório 4, situação D, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	196
Mapa 23. STI simulado no escritório 4, situação F, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.	196
Planta 1. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 1.....	138
Planta 2. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 2.....	139
Planta 3. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 3.....	140
Planta 4. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 4.....	141
Planta 5. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 5.....	142
Planta 6. Localização da fonte e receptores na medição do STI no escritório 1.	145
Planta 7. Localização da fonte e receptores na medição do STI no escritório 2.	146
Planta 8. Localização das fontes e receptores na medição do STI no escritório 3.....	147
Planta 9. Localização da fonte e receptores na medição do STI no escritório 4.	148
Planta 10. Localização da fonte e receptores na medição do STI no escritório 5.	149
Quadro 1. Possibilidade de comunicação da fala e utilização do telefone em diversos níveis de ruído de fundo.	24
Quadro 2. Valores ideais de T_r em escritórios panorâmicos.....	49
Quadro 3. Comparação dos valores de T_r simulados nos escritórios, situação atual, com os dados especificados por normas pertinentes.	171
Quadro 4. Comparação dos valores de T_r simulados nos escritório 1, com alterações no ambiente, com os dados especificados por normas pertinentes.	184
Quadro 5. Comparação dos valores de T_r simulados nos escritório 2, com alterações no ambiente, com os dados especificados por normas pertinentes.	188
Quadro 6. Comparação dos valores de T_r simulados nos escritório 4, com alterações no ambiente, com os dados especificados por normas pertinentes.	193
Retrato 1. Resposta impulsiva no software Dirac 3.1.....	108
Retrato 2. Área de trabalho do software Odeon 9.0.	114
Retrato 3. Página de “ajuste da sala” no software Odeon 9.0.	119
Retrato 4. “Lista de materiais” no software Odeon 9.0. À esquerda está a lista com os materiais existentes na sala simulada, à direita está a biblioteca com coeficientes de absorção para diversos materiais.	121
Retrato 5. Raio de distração obtido através do software AutoCad. O raio do círculo branco é o raio de distração, P4 é a fonte sonora e a cor verde no grid represente $STI= 0,5$ (Odeon 9.0).	122
Retrato 6. Simulação do DL2 no software Odeon 9.0. P1 representa a fonte sonora, os pontos de 1 a 12 são os receptores. As linhas tracejadas são superfícies transparentes para o Odeon 9.0.....	123
Retrato 7. Balão de diretividade da fonte “Tlk_normNATURAL.S08” contida na biblioteca do Odeon 9.0.....	124

Retrato 8. Ruído de fundo mixado a simulação com receptores em grid do STI.....	125
Retrato 9. Modelo em 3 dimensões do escritório 3. P2 representa a localização da boca artificial.....	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Correção dos níveis de pressão sonora, por frequência, para ponderação em A.....	20
Tabela 2. Coeficientes de espalhamento sugeridos para alguns materiais, para frequências médias.....	34
Tabela 3. Coeficiente de atenuação do ar (m).....	37
Tabela 4. Relação entre inteligibilidade e privacidade da fala e relação sinal-ruído.....	56
Tabela 5. Relação entre a inteligibilidade e a privacidade da fala e o Índice de Articulação (AI).....	58
Tabela 6. Correlação subjetiva dos valores de STI.....	63
Tabela 7. Sensação subjetiva e exemplo de ocorrência em escritórios, correlacionado a valores de STI entre estações de trabalho adjacentes.....	64
Tabela 8. Classe, utilização e tolerância de precisão dos medidores de nível sonoro.....	65
Tabela 9. Ponderação do nível de pressão sonora por frequência, em banda de oitava, para voz masculina e feminina.....	75
Tabela 10. Relação entre classificação acústica de escritórios panorâmicos e valores de DL_2 e r_D	96
Tabela 11. Valores ideais de parâmetros de projeto em escritórios panorâmicos.....	98
Tabela 12. Características principais dos escritórios panorâmicos estudados.....	102
Tabela 13. Características das mudanças físicas e nível de pressão sonora utilizado nas simulações.....	126
Tabela 14. Dados referentes ao sexo e idade dos ocupantes dos escritórios.....	127
Tabela 15. Dados referentes à necessidade de concentração e integração com colegas de trabalho, valores médios.....	129
Tabela 16. Dados referentes ao incômodo ao ruído, sensação ao ruído e satisfação do ambiente acústico dos escritórios.....	130
Tabela 17. Dados referentes à falta de privacidade e inteligibilidade da fala.....	132
Tabela 18. L_{Leq} , por frequência em banda de oitava, medido nos escritórios durante o expediente de trabalho.....	135
Tabela 19. L_{Aeq} medido nos escritórios durante o expediente de trabalho.....	135
Tabela 20. L_{eq} , por frequência em banda de oitava, corrigidos para a curva de ponderação em A.....	136
Tabela 21. T_r medido no escritório 1.....	138
Tabela 22. T_r medido no escritório 2.....	139
Tabela 23. T_r medido no escritório 3.....	140
Tabela 24. T_r medido no escritório 4.....	141
Tabela 25. T_r medido no escritório 5.....	142
Tabela 26. Variação do T_r conforme ponto de medição.....	143
Tabela 27. STI medido no escritório 1.....	145
Tabela 28. STI medido no escritório 2.....	146
Tabela 29. STI medido no escritório 3.....	147
Tabela 30. STI medido no escritório 4.....	148
Tabela 31. STI medido no escritório 5.....	149
Tabela 32. T_r médio, por frequência em banda de oitava, simulado nos escritórios, situação real.....	170
Tabela 33. DL_{2,C_0} simulado nos escritórios, situação real.....	180
Tabela 34. Características construtivas e acústicas dos escritórios, situação real.....	181
Tabela 35. Características acústicas do escritório 1, com alterações no ambiente.....	183
Tabela 36. Características acústicas do escritório 2, com alterações no ambiente.....	187

Tabela 37. Características acústicas do escritório 4, com alterações no ambiente.....	191
Tabela 38. Raio da estação e raio abrangendo as estações adjacentes para os escritórios 1, 2 e 4 utilizando para cálculo área/estação em cada escritório.	202

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Conceitos Acústicos.....	17
2.1.1 Nível de Pressão Sonora.....	18
2.1.2 Ruído de Fundo e Som de Mascaramento.....	20
2.1.3 Reflexão, Difusão e Difração.....	25
2.1.4 Absorção Sonora.....	36
2.1.5 Tempo de Reverberação.....	45
2.1.6 Curva de Distribuição Espacial do Som.....	50
2.1.7 Inteligibilidade e Privacidade da Fala.....	53
2.2 Medição de Parâmetros Acústicos.....	64
2.3 Simulação de Parâmetros Acústicos.....	76
2.4 Escritórios Panorâmicos.....	87
2.4.1 Acústica em Escritórios Panorâmicos.....	91
3 MATERIAIS E MÉTODO.....	100
3.1 Estudo Piloto.....	100
3.2 Objeto de Estudo.....	102
3.3 Resposta Subjetiva.....	105
3.4 Medição no local.....	106
3.4.1 Nível de Pressão Sonora.....	106
3.4.2 Tempo de reverberação.....	108
3.4.3 Índice de transmissão da fala.....	111
3.5 Simulação Computacional.....	113
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	127
4.1 Resposta Subjetiva.....	127
4.2 Medições no local.....	135
4.3 Calibração de Parâmetros Acústicos.....	153
4.4 Simulação da situação original.....	163
4.5 Simulação com alterações no ambiente.....	182
5 CONCLUSÃO.....	204
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	212
REFERÊNCIAS.....	213
APÊNDICE.....	222
ANEXOS.....	224

1 INTRODUÇÃO

A questão da qualidade acústica no ambiente de trabalho pode ser dividida em dois grandes setores: o ambiente industrial e o ambiente comercial. Esses setores dividem-se em vários sub-setores de acordo com as atividades realizadas, tendo cada um deles necessidades ambientais específicas. Segundo Duboc (1998), a preocupação com as condições de saúde do trabalhador deveria nascer no projeto do ambiente de trabalho. O ruído no ambiente industrial tem sido largamente estudado e fiscalizado, pois nesses locais são gerados níveis de ruído muito elevados e o trabalhador que fica exposto continuamente a tais níveis de pressão sonora tende a apresentar problemas ocupacionais graves, como a surdez adquirida. Apesar da surdez profissional, a qual é causada principalmente pela má qualidade do ambiente e falta de proteção auricular dos trabalhadores, ser um problema que merece muita atenção, o ambiente acústico de escritórios também deve ser estudado (CORDEIRO, 1996). Ambientes com níveis de ruído inferiores aos encontrados no chão de fábrica, os escritórios técnico-administrativos de indústrias, bancos e de outros ramos comerciais devem ser tratados acusticamente.

Os escritórios, em relação ao tipo de organização do espaço, podem ser divididos em dois setores: escritórios fechados, ou convencionais, e escritórios de plano aberto, ou panorâmicos.

Segundo Durval, Charles e Veitch (2002), desde 1960 os escritórios panorâmicos são populares entre os profissionais de projeto. A necessidade de comunicação e a busca de intensa produtividade levaram ao seu surgimento. Conforme Duffy (1980), as características dos escritórios desenhados com este conceito são as grandes plantas abertas, com um meio de trabalho organizado de uma forma livre e não de maneira geométrica e retilínea.

Atualmente, na cidade de Curitiba, estado do Paraná, local onde foi desenvolvido este trabalho, há grandes empresas que adotaram esse modo de organização do espaço para seus escritórios.



Fotografia 1. Escritório administrativo de indústria de aço, localizado em Curitiba. Fonte: Aços Continente.



Fotografia 2. Escritório administrativo de banco em Curitiba. Fonte: Autor.

Enquanto essa forma de organizar o ambiente traz algumas vantagens a seus usuários, devido à rapidez na comunicação entre os colegas de trabalho, gera prejuízos no que diz respeito ao conforto, à privacidade e à capacidade de concentração. Por isso, um correto tratamento acústico do ambiente torna-se necessário. Conforme Nijs et al. (2002), a necessidade de planejamento acústico nesses locais tem crescido, pois profissionais têm concebido arquitetonicamente grande número de ambientes com o conceito de plano aberto.

A ausência de partições altas e de portas beneficia a visualização de todo o ambiente, a troca de informações entre os usuários, o acesso a departamentos e proporciona maior flexibilidade do leiaute, embora, como ponto negativo, amplia a interferência sonora entre os postos de trabalho, gerando falta de inteligibilidade e de privacidade da fala nestes locais (NOGUEIRA, 2002). Segundo Yoon e Loftness (2002), a falta de privacidade é apontada como o fator de maior insatisfação entre os ocupantes de escritórios panorâmicos.

Tais empecilhos gerados pela eliminação das divisórias e paredes até o teto, responsáveis por grande parte do isolamento acústico no ambiente de trabalho, pode encadear na redução da satisfação no ambiente de trabalho. Segundo Duffy (1980), o principal objetivo de se planificar o ambiente de trabalho é o aumento da produtividade dos trabalhadores. Entretanto, Duboc (1998) enfatiza que o incômodo acústico provoca falta de concentração, falta de comunicação e de privacidade, irritabilidade e stress e como consequência disso, tem-se uma queda na produtividade.

Durval, Charles e Veitch (2002) atentam para o fato que escritórios panorâmicos comportam uma maior densidade de ocupantes que escritórios convencionais. Isso pode causar um problema, pois estudos mostram que quanto mais espaço tem um empregado, mais satisfeito ele está com seu ambiente de trabalho, além disso, quanto menos pessoas há em um mesmo local, maior é a satisfação. Os mesmos autores enfatizam que a densidade de

trabalhadores adequada em um escritório pode ser determinada pela atividade realizada no local. Muitas vezes, em escritórios panorâmicos, principalmente de empresas de pequeno e médio porte, várias atividades são desenvolvidas no mesmo ambiente de trabalho, não se dando a devida atenção às necessidades de ambiente exigidas para a realização de cada tarefa.

Segundo Knudsen e Harris (1988), trabalhadores de escritórios, bancos e lojas geralmente preferem ambientes silenciosos, muitos dizem que se sentem menos cansados ao final do dia se não estiverem expostos a incessantes e irritantes níveis de ruído. Estudos em escritórios panorâmicos mostram que o ruído nesses ambientes pode ser estressante e desmotivante (EVANS; JOHNSON, 2000) e pode ocasionar alto grau de distração e baixo nível de privacidade (HEDGE, 1982).

Do acima exposto, pode-se perceber a importância de se estudar a acústica de escritórios panorâmicos. A complexidade do condicionamento acústico de um escritório desse tipo está no equilíbrio entre a privacidade e a inteligibilidade da fala em seu interior. Além disso, escritórios panorâmicos devem ser condicionados de forma a não descaracterizá-los como tal.

Dessa forma, esse trabalho de tese partiu do seguinte problema de pesquisa: quais são as características de um escritório panorâmico acusticamente adequado? Para responder a essa pergunta, teve como objetivo gerar dados que torneasse possível avaliar e incrementar a qualidade acústica de escritórios panorâmicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos Acústicos

O som pode ser dividido em componentes pela percepção das qualidades acústicas. Vários trabalhos são baseados na idéia que uma resposta impulsiva pode ser dividida nos seguintes componentes: o som direto, as reflexões iniciais, as reflexões finais ou reverberantes e o ruído ambiente ou de fundo (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

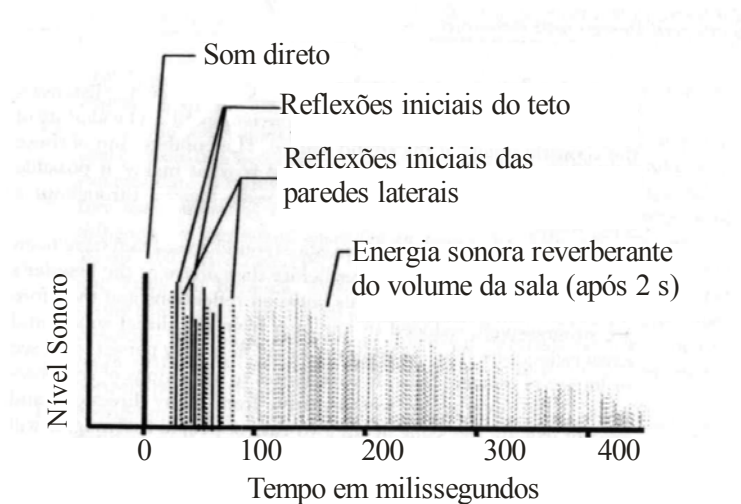


Gráfico 1. Resposta impulsiva de uma sala evidenciando o som direto, as reflexões iniciais, as reflexões tardias ou som reverberante, e o ruído de fundo ou som ambiente. Fonte: Cavanaugh e Wilkes (1999, p. 241, tradução nossa)

Conforme a norma ISO 3382 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1997), a resposta impulsiva pode ser definida como uma função temporal da pressão sonora percebida em uma sala como o resultado da excitação da sala por uma função de delta de Dirac.

O som direto é a onda sonora que viaja diretamente da fonte até o ouvinte, sem encontrar qualquer superfície do recinto. Ele contribui para a sensação de sonoridade, clareza e localização, sendo normalmente reduzido através de uma geometria espalhada ou divergente à medida que se distancia da fonte sonora (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

As reflexões sonoras iniciais são ondas sonoras que encontraram uma das superfícies da sala e são refletidas para a posição do ouvinte. As reflexões que chegam em um intervalo

curto de tempo após o som direto (menos de 80 milissegundos para a música) são normalmente combinadas ao som direto pelo ouvido. Essas reflexões adicionadas ao som direto aumentam sua intensidade aparente (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Assim, o termo som inicial engloba o som direto mais todas as reflexões que cheguem até os ouvidos do receptor em até 80 milissegundos após a chegada do som direto (BERANEK, 2004). Se as reflexões chegarem com 40 milissegundos ou menos após o som direto, elas também contribuirão para a sensação de intimidade acústica. A combinação dessas reflexões iniciais com o som direto torna possível se ter nível sonoro semelhante em todos os assentos situados em uma grande sala (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

O campo sonoro reverberante consiste de ondas sonoras que foram refletidas por várias superfícies antes de chegar até os ouvidos do receptor. Para Beranek (2004), o campo reverberante consiste de todas as reflexões que chegam até o ouvinte após 80 milissegundos da chegada do som direto. As ondas sonoras viajam longas distâncias entre reflexões e são progressivamente reduzidas em nível sonoro em relação ao som direto e primeiras reflexões (CAVANAUGH; WILKES, 1999). O campo sonoro reverberante pode persistir por 2 segundos ou mais em grandes auditórios. Ele contribui para a sensação de reverberação. Se os sons reverberantes chegarem de diversas direções e não forem exatamente os mesmos nos dois ouvidos do receptor, ele irá aumentar a sensação de espacialidade acústica na sala. Se o campo sonoro reverberante tiver componentes baixos ou baixas frequências intensas, irá aumentar a sensação de calor na sala. Se ele tiver altas frequências intensas ou componentes agudos, irá contribuir com a percepção do brilho (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

2.1.1 Nível de Pressão Sonora

Segundo Long (2006), quando uma escala de intensidade é muito grande, comumente existe a prática de se expressar valores em termos de níveis. Um nível é basicamente uma fração, expressa como 10 vezes o logarítmico da relação de dois números, sendo o denominador dessa relação um valor de referência.

O nível de pressão sonora é o indicador mais comumente utilizado para expressar valores à onda sonora, pois se relaciona bem com a percepção da audição humana e pode ser facilmente mensurado (LONG, 2006). Segundo Mehta, Johnson e Rocaford (1999) existe maior facilidade para medir a pressão sonora que a intensidade sonora, pois o microfone

utilizado detecta pressão e não intensidade sonora. O nível de pressão sonora é simplesmente a representação logarítmica da pressão sonora (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999)

Para se calcular esse nível, o valor de referência a ser utilizado é o limite da audição em 1000 Hz de uma pessoa jovem. Esse valor é igual a $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, o que equivale a zero decibel (dB). Assim, o nível de pressão sonora é calculado da seguinte forma:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{(p_0)^2} \text{ (dB)} \quad (1)$$

Onde:

- a) L_p é o nível de pressão sonora (dB);
- b) p é a pressão sonora (Pa);
- c) p_0 é a pressão sonora de referência e é igual a $2 \cdot 10^{-5}$ (Pa).

O nível de pressão sonora pode ser obtido através de uma medição acústica. Esse nível pode ser apresentado para cada frequência em tempo real, ou ainda ser adquirido através do nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}). O L_{eq} é o nível que representa a quantidade de energia sonora existente em um período de tempo (ENVIRONMENTAL..., 2001). Ou seja, é uma média temporal do nível de pressão sonora.

O nível de pressão sonora pode sofrer ponderações. Comumente utiliza-se a ponderação do nível de pressão sonora em A. Essa ponderação segue uma curva normalizada, que corrige os níveis para o resultado se assemelhar à forma do ouvido humano perceber o som. Assim, a curva de ponderação A reduz os níveis em baixa frequência, pois o ouvido humano possui menos sensibilidade nessas frequências (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999).

Quando um nível sonoro é medido com ponderação em A é designado dB(A) para distinguir do nível sem ponderação dado por dB (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999). Os níveis em dB(A) são normalmente menores que os níveis em dB.

A norma NBR 10151 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000) define nível de pressão sonora equivalente ponderado em A como sendo o “...nível obtido a partir do valor médio quadrático da pressão sonora, com ponderação em A, referente a todo o intervalo de medição” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000, p. 2).

Tabela 1. Correção dos níveis de pressão sonora, por frequência, para ponderação em A.

Frequência (Hz)	Ponderação em A (dB)
31,5	-39,4
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1000	0
2000	1,2
4000	1,0
8000	-1,1

Fonte: Fasold e Veres (2003, p. 49, tradução nossa).

Para as medições dos níveis de pressão sonora deve ser seguido o prescrito na norma NBR 10151 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

Em relação ao nível de pressão sonora adequado, médicos do trabalho recomendam os seguintes níveis em função da exigência intelectual no ambiente de trabalho: exigência elevada $LA_{eq} \leq 50$ dB, exigência média $50 < LA_{eq} < 60$ dB e demais casos $50 < LA_{eq} < 70$ (BOBRAN, 1995).

As normas NBR 10152 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987) e NR 17 (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2005) estabelecem um nível limite de $LA_{eq} = 65$ dB para escritórios. Entretanto, a norma NBR 10152 estabelece que para o conforto, esse nível deve ser de $LA_{eq} = 45$ dB. A norma NRB 10152 estabelece esses níveis para salas de computadores em ambientes de escritórios. Essa é a descrição mais próxima de escritórios panorâmicos encontrada nessa norma.

Segundo Bobran (1995), o nível sonoro em escritórios panorâmicos normalmente encontra-se na faixa de 55 a 65 dB(A), enquanto que em escritórios fechados o nível sonoro encontra-se em torno de 35 dB(A).

2.1.2 Ruído de Fundo e Som de Mascaramento

Os níveis gerais de ruído ambiente, ou ruído de fundo, em um local são um elemento de grande importância no ambiente acústico (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Eles formam a base do som no ambiente, ou seja, a relação do que é dito com o que é ouvido e entendido.

Segundo Cavanaugh e Wilkes (1999), ruídos de fundo contínuos podem encobrir ou mascarar sons não desejáveis do próprio ambiente ou vindo de ambientes adjacentes. Entretanto, quando não é possível escutar um orador em um auditório por causa de um intenso ruído de fundo, isso ocorre porque o ruído de fundo está mascarando totalmente ou parcialmente o som do orador (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999). Quando é necessário aumentar a intensidade da voz para ser ouvido em um local ruidoso, é novamente efeito do ruído de mascaramento atuando no local.

Quando se escuta dois ou mais sons simultaneamente, se seus níveis forem suficientemente diferentes, é difícil entender o som de menor nível (LONG, 2006). Segundo Long (2006), quando isso ocorre, pode-se dizer que o som de menor nível é mascarado pelo som de maior nível. Segundo Mehta, Johnson e Rocaford (1999), efeito de mascaramento é medido pelo número de decibéis que um dado som deve se elevar acima do valor normal de audibilidade para ser ouvido em presença do som de mascaramento.

Long (2006) define mascaramento como uma mudança no limiar da audição produzida pelo som de maior nível através da sobreposição da banda crítica na cóclea. Mehta, Johnson e Rocaford (1999) ainda completam comentando que mascaramento não é simplesmente propriedade do ouvido, mas é também do cérebro. Por exemplo, normalmente é possível ouvir conversas distantes de interesse particular em um local ruidoso com diversas fontes, já, se essas não forem de interesse, normalmente não é possível ouvi-las.

Segundo Mehta, Johnson e Rocaford (1999), um som de uma dada frequência é mais facilmente mascarado por um som de frequência próxima. Long (2006) completa: sons que têm frequências mais próximas mascaram uns aos outros mais que sons amplamente separados na frequência. Ainda, quanto maior o nível do som de mascaramento, mais ampla será a faixa de frequência que ele poderá mascarar. Além disso, baixas frequências são normalmente mais eficientes no mascaramento de altas frequências que o inverso, principalmente se o som for intenso (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999). Assim, sons de mascaramento em alta frequência têm pouco ou nenhum efeito em sons de baixa frequência (LONG, 2006). Portanto, conforme o uso para que se destina o local, ruídos excessivos em baixa frequência devem ser evitados, uma vez que representam uma fonte em potencial de transferência tanto da voz como da música (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999).

Certa quantidade de mascaramento pelo ruído de fundo é necessária, provendo certo “aroma acústico”, pois um ambiente extremamente silencioso pode ser irritante (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORD, 1999). Em ambientes extremamente silenciosos, ruídos que

provêm dos movimentos pessoais do corpo e da respiração podem ser perturbadores. Egan (1988) afirma que ocupantes de salas com níveis de ruído de fundo muito baixos têm sérios problemas de privacidade na conversação devido à falta de mascaramento. Entretanto, segundo Mehta, Johnson e Rocaford (1999), níveis de ruído de fundo excessivos são indesejáveis. Cavanaugh e Wilkes (1999) esclarecem que, conforme o tipo e a função do ambiente, existe um nível de ruído de fundo aceitável. Segundo os mesmos autores, para locais críticos, como estúdios de rádio e gravação, um nível de ruído de fundo muito baixo é admitido para possibilitar a compreensão dos sons fracos da voz na música. Em locais muito grandes, como aeroportos e ginásios de esporte, ruídos de fundo reverberantes em baixa frequência podem mascarar o som do sistema de sonorização do local (LONG, 2006). Entretanto, níveis muito baixos em ambientes de escritórios típicos podem ser indesejáveis em atividades diárias que exijam certo grau de privacidade (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Segundo Mehta, Johnson e Rocaford (1999), o fenômeno do mascaramento é utilizado como vantajoso em escritórios de plano aberto onde é intencionalmente gerado ruído de fundo sem conteúdo de informação para gerar privacidade da fala em estações de trabalho. Cavanaugh e Wilkes (1999) afirmam que um nível mais elevado de ruído de fundo nesses espaços torna o ambiente mais confortável para os ocupantes. Então, o objetivo geral é que um nível de ruído de fundo confortável para cada ambiente seja alcançado.

As curvas de critério de ruído (NC) são amplamente utilizadas por engenheiros projetistas (CAVANAUGH; WILKES, 1999). O valor numérico da curva é a média aritmética dos níveis em 1000, 2000 e 4000 Hz. Essas frequências são utilizadas por serem as mais importantes para a compreensão da fala (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Cada curva normalmente permite níveis mais elevados do som em baixa frequência se comparados com os níveis em média e alta frequência, e segue o padrão geral de como as pessoas respondem ao som na faixa audível. Os sons em baixa frequência são normalmente menos perturbadores que sons em alta frequência, com o limite expresso pelas curvas NC (CAVANAUGH, WILKES, 1999). As curvas NC são representadas no gráfico a seguir.

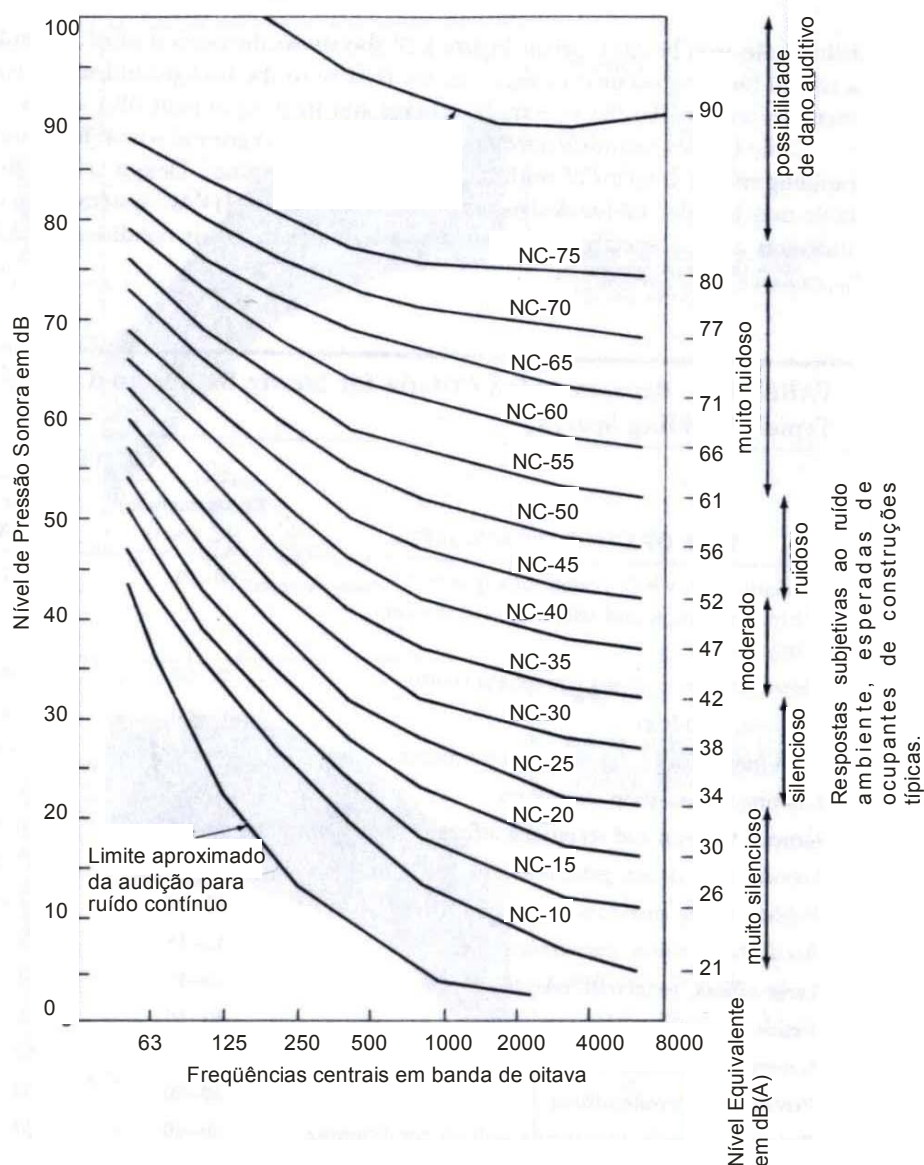


Gráfico 2. Curvas de critério de ruído de fundo (NC). Fonte: Cavanaugh e Wilkes (1999, p. 37, tradução nossa).

O gráfico 2 mostra o julgamento subjetivo que um ocupante de edifícios típicos expressa em relação ao nível de ruído de fundo representado pelas curvas NC e pelo seu valor equivalente em dB(A).

Ver em anexo A tabela que lista os níveis de ruído de fundo recomendados em espaços de edifícios típicos em curvas NC e valores em dB(A) (CAVANAUGH; WILKES, 1999)

A norma brasileira NBR 10152 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA, 1987), que trata dos níveis de ruído para conforto acústico, também traz um gráfico representando as curvas NC, ver em anexo B. Além do gráfico, a norma brasileira traz uma tabela que relaciona os valores da curva NC nas várias frequências com o número dessa curva. Essa tabela está transcrita no anexo C.

Assim como apresentado por Cavanaugh e Wilkes (1999), a norma NBR 10152 também traz valores de níveis sonoros em dB(A) e das curvas NC para edificações com diferentes funções. Essa norma apresenta um intervalo de valores para cada local, em que o valor inferior da faixa representa o nível sonoro para conforto, enquanto o valor superior significa o nível sonoro aceitável para a finalidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987). Essa tabela pode ser vista no anexo D.

O quadro 1 relaciona a possibilidade de conversação pessoalmente e ao telefone com diferentes níveis de ruído ambiente.

Nível de ruído de fundo (dB(A))	Necessidade de esforço da voz e distância.	Possibilidade de comunicação.	Utilização do telefone.
55	Voz normal na distância de 3,00m.	Comunicação relaxada.	Satisfatório
65	Voz normal a 0,90m, voz intensa a 1,80m, voz muito intensa a 3,65m.	Comunicação contínua.	Satisfatório
75	Voz intensa a 0,60m, gritando a 2,50m	Comunicação intermitente.	Mediana
85	Voz muito intensa a 0,30m, gritando a 0,6-0,9m	Comunicação mínima.	Impossível

Quadro 1. Possibilidade de comunicação da fala e utilização do telefone em diversos níveis de ruído de fundo. Fonte: Cavanaugh e Wilkes (1999, p. 39, tradução nossa).

Em escritórios panorâmicos, o ruído de fundo é tratado de modo especial, pois a grande quantidade de material para a absorção sonora utilizada nesses escritórios resulta em níveis de ruído de fundo muito baixos, o que gera uma privacidade da fala também baixa (HARRIS, 1998). Para contornar esse problema, fontes eletrônicas de som podem ser utilizadas para aumentar o nível de ruído de fundo. Um sistema de mascaramento sonoro é um sistema que produz um campo sonoro uniforme por toda a área do escritório (HARRIS, 1998). Segundo Beranek e Vér (1992), o aumento do ruído de fundo dificulta a escuta da fala vinda de estações de trabalho adjacentes. O nível, espectro e distribuição espacial do som de mascaramento requer ajustes cuidadosos para a aceitação dos ocupantes (BERANEK; VÉR, 1992). O ruído de mascaramento é normalmente mais intenso nas baixas frequências e está na faixa de 45 a 50 dB(A) (HARRIS, 1998). O gráfico 3 mostra os níveis do ruído de mascaramento nas diversas frequências.

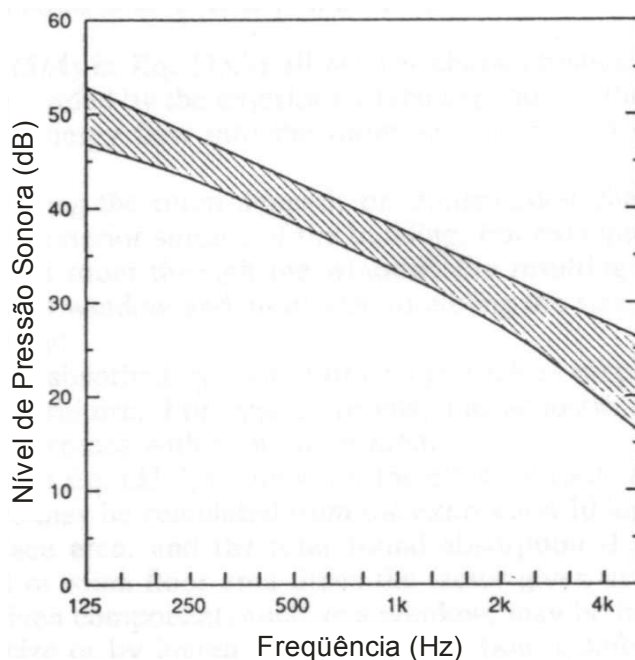


Gráfico 3. Forma aproximada do espectro do ruído de mascaramento. Fonte: Harris (1998, p. 33.37, tradução nossa).

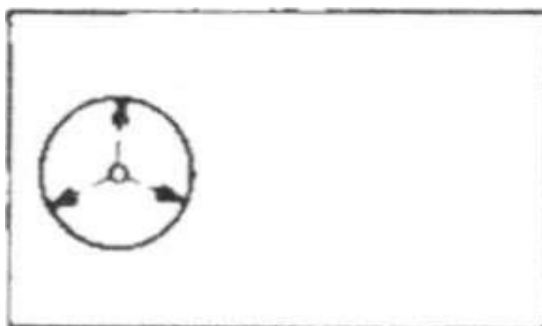
Níveis de ruído de fundo mais elevados irão induzir os ocupantes a queixas e o mascaramento não alcançará seu objetivo, uma vez que os ocupantes irão aumentar o nível da voz para conversação (BERANEK; VÉR, 1992). As variações temporais e espaciais do som de mascaramento devem ser inferiores a 3 dB(A). Sistemas de ventilação geram ruído que resulta em algum mascaramento, mas eles normalmente não fornecem a uniformidade espacial e temporal gerada pelos sistemas de mascaramento (HARRIS, 1998). Segundo Cordeiro (1996) a utilização dos sistemas eletrônicos de mascaramento da fala integrados ao projeto acústico de escritórios panorâmicos ainda é uma prática pouco utilizada.

2.1.3 Reflexão, Difusão e Difração

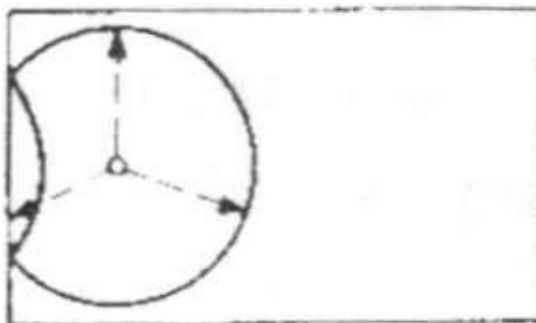
Quando uma onda sonora colide com uma superfície, parte do som incidente é refletido pela superfície, outra parte é transmitido para dentro dela, onde parte é dissipado através de calor e o resto é transmitido através dela (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Se essa onda for refletida pela superfície, como uma parede ou o teto, sua direção é alterada (HARRIS, 1994). Para Egan (1988), reflexão é o retorno das ondas sonoras de uma superfície.

As reflexões das ondas sonoras pelas superfícies no interior de um recinto normalmente resultam em um movimento espacial complexo do som (HARRIS, 1994). Por exemplo, os desenhos 1, 2, 3 e 4 retratam o progresso da onda sonora em uma sala retangular com paredes rígidas e lisas. Os círculos sólidos ou arcos de círculo representam as ondas sonoras radiadas pela fonte, as linhas com flechas indicam as direções nas quais as ondas viajam.

O desenho 1 representa a onda sonora 0,005 segundo após ter sido emitida pela fonte, antes de encontrar as paredes. O desenho 2 mostra a onda 0,01 segundo após ter deixado a fonte. A onda agora viajou duas vezes mais longe que no desenho 1 e parte da onda foi refletida pela superfície mais próxima (HARRIS, 1994).

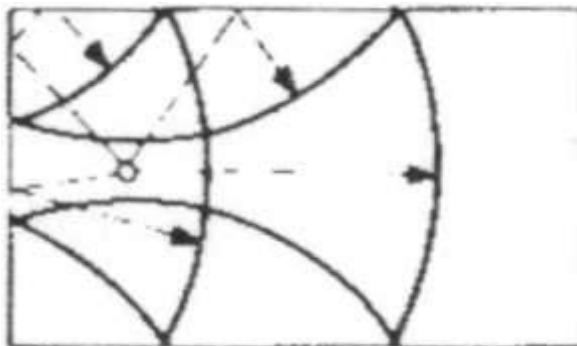


Desenho 1. Onda sonora 0,005 segundo após ter sido emitida pela fonte. Fonte: Harris (1994, p. 4.8).



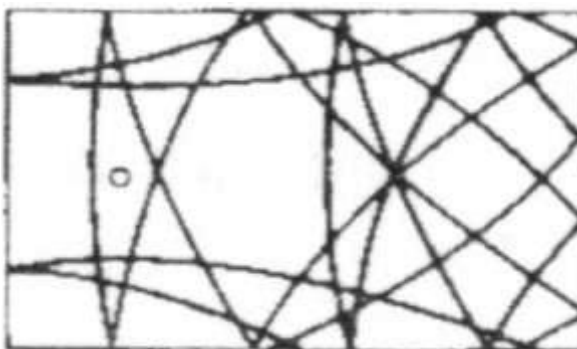
Desenho 2. Onda sonora 0,01 segundo após ter sido emitida pela fonte. Fonte: Harris (1994, p. 4.8).

O desenho 3 retrata a onda 0,02 segundo após ter deixado a fonte. Existem reflexões das paredes laterais e reflexões duplas das paredes laterais e dos fundos.



Desenho 3. Onda sonora 0,02 segundo após ter sido emitida pela fonte. Fonte: Harris (1994, p. 4.8).

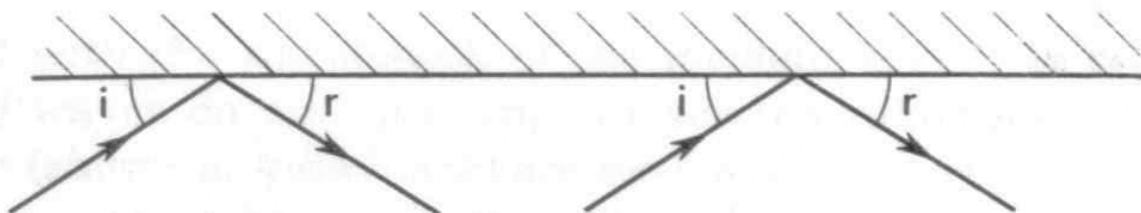
O desenho 4 mostra a onda sonora 0,06 segundo após ter deixado a fonte. Nesse ponto, o padrão de reflexão é um pouco mais complexo, a onda original se quebrou em um grande número de segmentos, todos viajando em direções diferentes no recinto (HARRIS, 1994).



Desenho 4. Onda sonora 0,06 segundo após ter sido emitida pela fonte. Fonte: Harris (1994, p. 4.8).

Segundo Long (2006), quando um raio sonoro impacta uma superfície, parte da energia é refletida de forma especular e parte é refletida de forma difusa. Após atingir a superfície, o ângulo de reflexão das ondas sonoras depende da relação entre as dimensões da superfície refletora e o comprimento de onda do som incidente (HARRIS, 1994). Se as dimensões da superfície forem pelo menos 2 a 4 vezes maiores que o comprimento de onda, λ , do som incidente, o ângulo de incidência será igual ao ângulo de reflexão (EGAN, 1988). Por exemplo, 1000 Hz corresponde ao comprimento de onda de 35 cm, assim, as dimensões das superfícies (comprimento e largura) de aproximadamente $4\lambda=1,40$ m irão refletir especularmente sons na frequência de 1000 Hz e em frequências superiores (EGAN, 1988). Complementando, Knudsen e Harris (1988) afirmam que quando uma onda sonora livre da influência das reflexões das superfícies encontra uma superfície uniforme que é grande comparada ao comprimento de onda do som, a reflexão dessa onda ocorre de forma semelhante à reflexão da luz. Assim, segundo Harris (1994), quando o som é refletido por

uma superfície plana e rígida, de grandes dimensões se comparado ao comprimento de onda do som incidente, o ângulo de reflexão (r) será igual ao ângulo de incidência (i) e essa relação é chamada lei da reflexão, ilustrada no desenho 5. As linhas com flechas representam os raios sonoros.

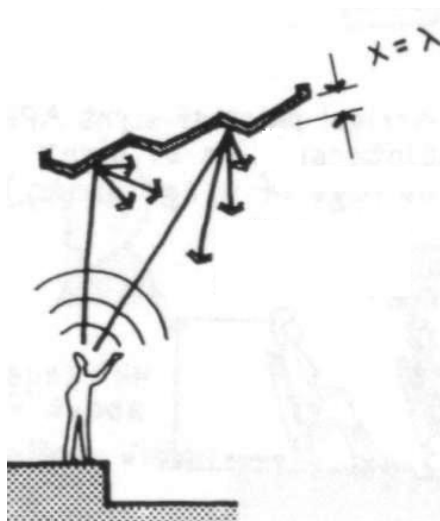


Desenho 5. Lei da Reflexão. Fonte: Harris (1994, p. 4.2).

É importante enfatizar que essa lei só é válida se as dimensões da superfície forem grandes se comparadas ao comprimento de onda do som incidente (HARRIS, 1994).

Engenheiros acústicos fazem uso freqüente da lei da reflexão para investigar os efeitos de várias formas na distribuição do som em recintos (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Esses estudos podem gerar o projeto das superfícies internas que trarão reflexões desejáveis ou a eliminação e modificação das superfícies que gerarão ecos ou outras reflexões nocivas. Entretanto, segundo os mesmos autores, deve ser empregado cuidado na aplicação da lei da reflexão, pois muitos erros são realizados em projetos acústicos por se assumir que o som é refletido da mesma forma que a luz.

Quando as dimensões das superfícies dos materiais são comparáveis aos comprimentos de onda do som incidente ocorre a difusão do som (EGAN, 1988). Difusão é o espalhamento ou a redistribuição aleatória da onda sonora após atingir uma superfície.



Desenho 6. Difusão do som. Fonte: Egan (1988, p. 89).

Assim, a direção da onda sonora incidente é alterada quando ela se choca com um material difusor acústico (EGAN, 1988). Segundo Harris (1994), quanto maior a uniformidade de reflexão do nível sonoro, maior a difusão no recinto. O som é dito perfeitamente difuso se o nível de reflexões do som for igual em todos os lugares e se as ondas refletidas viajarem em todas as direções com a mesma probabilidade (HARRIS, 1994). Ou seja, quando é alcançada uma difusão satisfatória, os ouvintes têm a sensação que o som vem de todas as direções em igual nível (EGAN, 1988).

Os principais meios de se conseguir difusão em um recinto são através de (HARRIS, 1994):

- a) irregularidade nas superfícies das paredes, por exemplo, grandes formas triangulares, superfícies convexas, pilastras e ornamentação de superfícies;
- b) objetos no interior da sala que espalhem o som, por exemplo estátuas ou cadeiras;
- c) materiais de absorção sonora com distribuição não uniforme na sala. Essa providência contribui para a difusão do som com menor eficácia que as anteriores.

Irregularidades nas superfícies e objetos são bastante eficientes para gerar difusão quando suas dimensões são aproximadamente iguais ao comprimento de onda do som incidente (HARRIS, 1994). Por essa razão, para se obter difusão excelente em uma faixa de frequência é necessário que existam irregularidades nas superfícies e objetos de diversos tamanhos. Por esse motivo, o som é mais difuso em uma sala mobilhada que em uma sala vazia.

Em uma sala onde exista boa difusão, o nível sonoro tende a decrescer relativamente uniforme conforme aumenta a distância da fonte sonora (HARRIS, 1994). Em contraste, em uma sala onde exista difusão pobre, conforme se distancia da fonte o decréscimo do nível sonoro é muito mais irregular, normalmente sendo marcado por um máximo e um mínimo (HARRIS, 1994).

Em oposição, a difusão do som será muito pobre se (HARRIS, 1994):

- a) as paredes e o teto forem superfícies planas e lisas;
- b) uma dimensão da sala for muitas vezes outra dimensão, por exemplo cinco vezes. Esse é o caso de grandes escritórios que têm pé-direito baixo;
- c) se a forma da sala for anormal, por exemplo, uma igreja em forma de cruz ou um auditório com um deslocamento muito grande de balcões;
- d) se a sala estiver conectada com outra que tenha características acústicas distintas;
- e) se a fonte sonora no interior da sala incluir um ou mais componentes de frequência discreta fortes, por exemplo, tons puros.

Knudsen e Harris (1988) afirmam que a óptica geométrica corresponde à acústica geométrica, a qual assume que o som é propagado em linha reta, entretanto, isso só é válido para comprimentos de onda que são pequenos comparados às dimensões da sala e às superfícies refletoras e aberturas existentes no local. Deve-se lembrar que muitas superfícies em um recinto não são grandes se comparadas ao comprimento de onda de sons em baixa frequência. Janelas, portas, pilastras, várias formas de ornamentação e painéis de material absorvente; todos geram difração que alteram em muito a direção e magnitude do som refletido (KNUDSEN; HARRIS, 1988). A óptica física e a acústica física são baseadas nas propriedades da onda e assim descrevem muitos aspectos da luz e do som que não podem ser mensurados pelo tratamento geométrico; entre esses, a difração é o aspecto mais importante (KNUDSEN; HARRIS, 1988).

A difração é a mudança de direção de propagação das ondas sonoras graças a sua passagem por um obstáculo (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Por exemplo, um caminhão localizado atrás de uma construção pode ser escutado porque as ondas sonoras se curvam ao redor das quinas da construção (EGAN, 1988).

O grau de difração depende da relação entre o comprimento de onda do som e o tamanho do obstáculo (KNUDSEN; HARRIS, 1988). O tratamento arquitetônico e decorativo de um recinto, como colunas e ornamentos em gesso, resultam em quebras regulares, ou irregulares, ou discontinuidades nas superfícies do recinto, e conseqüentemente o interior da maioria desses recintos resultam em introduzir fenômenos de difração complexos. Descontinuidades no tratamento de absorção acústica em uma parede ou irregularidades na forma de uma parede irão difratar as ondas sonoras que se colidirem com a parede. Então, trechos de material absorvedor em uma parede difratam ou espalham as ondas sonoras incidentes e ajudam a difundir o som pela sala (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Em auditórios, por ondas sonoras difratarem ao redor de painéis que sejam menores que o comprimento de onda, painéis suspensos devem ser cuidadosamente projetados para as dimensões serem grande o bastante para refletir efetivamente as ondas sonoras desejadas (EGAN, 1988).

Difração por um obstáculo no caminho da onda sonora é freqüentemente referido como espalhamento (KNUDSEN; HARRIS, 1988). O obstáculo altera o campo sonoro nas suas imediações. A alteração, que é a diferença entre a onda existente e a onda que deveria existir se o obstáculo não existisse, é chamada de onda de espalhamento.

Assim, percebe-se que as leis da reflexão podem ser inadequadas para prever o comportamento do som em arquitetura de interiores. Se a superfície for grande, uniforme e plana as leis da reflexão serão uma aproximação do comportamento real da onda sonora. O

tratamento arquitetônico da sala, entretanto, normalmente introduz superfícies descontínuas que afetam em muito a distribuição da reflexão sonora (KNUDSEN; HARRIS, 1988).

Segundo Mommertz (2000), as propriedades acústicas das superfícies arquitetônicas, como revestimentos de paredes, forros suspensos ou acetos em auditórios, são normalmente descritos apenas pelo coeficiente de absorção. Entretanto, como foi verificado acima e para Mommertz (2000), na utilização de métodos de predição mais sofisticados, como o traçado de raios, uma descrição apropriada das propriedades de espalhamento se faz necessária. Na simulação computacional da propagação sonora em recintos, resultados realísticos são alcançados quando não apenas as reflexões especulares são consideradas, mas também as reflexões difusas (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000).

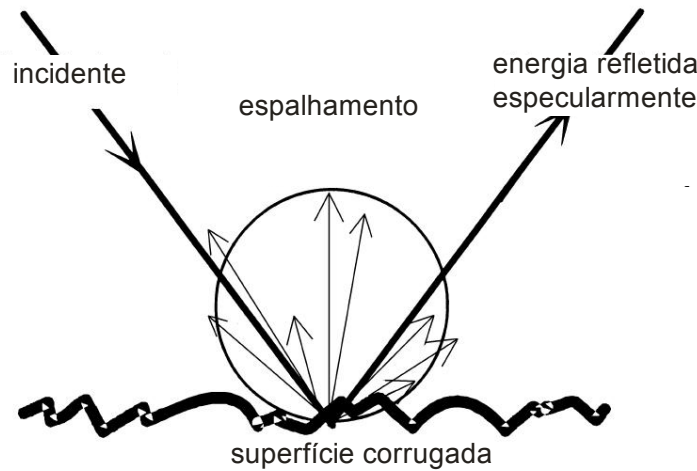
As propriedades de espalhamento de superfícies heterogêneas podem ser descritas por meio da distribuição direcional da energia refletida, a qual é chamada direcionamento da reflexão (MOMMERTZ, 2000). Essa distribuição angular da energia pode ser medida ou calculada por amostras com dimensões finitas em condições de campo livre.

Esse estudo do espalhamento sonoro é necessário, pois, geralmente, as irregularidades das superfícies das paredes não são nem tão pequenas nem tão grandes comparadas aos comprimentos de onda dos sons incidentes (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000). Assim, pode ser útil introduzir uma grandeza característica e simples, o coeficiente de espalhamento δ , o qual é definido como a relação entre a energia não especular e a energia total refletida (MOMMERTZ, 2000).

Long (2006) afirma que a caracterização da difusão é normalmente um estudo considerável na predição do ambiente acústico. Segundo Vorländer e Mommertz (2000), tradicionalmente, as propriedades de espalhamento são expressas através do direcionamento, que pode ser medido ou calculado para diversos ângulos de incidência e frequências. Entretanto, apenas em poucos casos o direcionamento detalhado do espalhamento do som é de grande interesse. Por isso, tem-se assumido que uma superfície difusa pode ser caracterizada por meio de um coeficiente, chamado coeficiente de espalhamento δ , o qual varia entre 0 (reflexão especular) e 1 (difusão completa) (LONG, 2006). Coeficiente igual a zero indica uma superfície lisa e infinitamente grande que reflete os raios de forma especular (CHRISTENSEN, 2003). Se o coeficiente for igual a 1, significa que a superfície reflete o raio de forma totalmente espalhada. Para coeficientes entre 0 e 1, a direção de reflexão é calculada através da ponderação entre a direção espalhada e especular.

O coeficiente de espalhamento é definido simplesmente como a relação entre a energia refletida de forma não especular, difusa, e a energia total refletida (desenho 7) e não inclui

qualquer informação sobre o direcionamento da energia espalhada (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000).



Desenho 7. Espalhamento por uma superfície corrugada. Fonte: Vorländer e Mommertz (2000, p. 188, tradução nossa).

Assim, o coeficiente de espalhamento pode ser representado da seguinte forma (LONG, 2006):

$$\delta = \frac{E_{\text{difusa}}}{E_{\text{total}}} = \frac{E_{\text{difusa}}}{E_{\text{especular}} + E_{\text{difusa}}} \quad (2)$$

A medição de toda a energia difusa é de difícil obtenção, então, são utilizados métodos de medição da energia refletida de forma especular e o coeficiente de absorção difusa para calculá-la (LONG, 2006), assim:

$$\delta = \frac{E_{\text{difusa}}}{E_{\text{total}}} = 1 - \frac{E_{\text{especular}}}{E_{\text{total}}} \quad (3)$$

O coeficiente de espalhamento (δ) geralmente depende da frequência e do ângulo de incidência sonora (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000). Entretanto, semelhantemente a incidência randômica do coeficiente de absorção obtido em salas reverberantes, uma média angular do coeficiente de espalhamento, por exemplo, a incidência randômica do coeficiente de espalhamento, pode caracterizá-lo adequadamente. Então, o coeficiente de espalhamento pode ser calculado através do coeficiente de absorção de incidência randômica (α) e o coeficiente de absorção especular ($\alpha_{\text{especular}}$) (JEON; LEE; VORLÄNDER, 2004), assim:

$$\delta = \frac{\alpha_{\text{especular}} - \alpha}{1 - \alpha} \quad (4)$$

Jeon, Lee e Vorländer (2004) afirmam que o nível de difusão, caracterizado pelo coeficiente de espalhamento dos materiais de superfície, é um dos fatores mais importantes na determinação das qualidades acústicas de uma casa de concertos. Vorländer e Mommertz (2000) complementam a afirmação anterior observando que coeficientes de espalhamento são utilizados como dado de entrada para simulações acústicas.

Apesar de não ter uma exatidão física, nos métodos de predição acústica de salas a distribuição direcional da energia pode ser expressa em termos da lei do cosseno de Lambert, se δ é conhecido (VORLÄNDER, MOMMERTZ, 2000). Por exemplo, no programa computacional de simulação acústica, Odeon (CHRISTENSEN, 2003), a forma de espalhamento gerado pelas superfícies existentes no recinto deve ser especificada pelo usuário, existindo três opções: 1) Lambert, 2) sem espalhamento e 3) espalhamento total (CHRISTENSEN, 2003). Se o método de espalhamento escolhido for o de Lambert, todas as direções das reflexões recentes serão calculadas utilizando os coeficientes de espalhamento indicados às superfícies. Por exemplo, se o coeficiente de espalhamento for 10%, a nova direção do raio será calculada como 90% especular e 10% difuso, com direção randômica através de uma distribuição Lambert. Se o método for definido como sem espalhamento, o espalhamento não é considerado, então todas as reflexões serão calculadas como especular. Finalmente, se definido como espalhamento total, 100% de espalhamento será aplicado em todas as superfícies (CHRISTENSEN, 2003).

Segundo Jeon, Lee e Vorländer (2004), atualmente, os valores de espalhamento utilizados em modelos computacionais são estimativos. Christensen (2003) comenta que em estudos empíricos foi encontrado que os coeficientes de espalhamento normalmente são próximos de 0,1 para superfícies grandes e planas e aproximadamente 0,7 para superfícies muito irregulares, por exemplo, áreas de audiência em teatros. Coeficientes de espalhamento próximos de 0,02 foram encontrados em estudos com superfícies extremamente lisas, sem nenhum elemento de espalhamento (CHRISTENSEN, 2003). Os valores extremos de 0 e 1 não devem ser utilizados. Assim, em geral, é recomendado manter os coeficientes de espalhamento entre 0,1 e 0,7. Para salas como escritórios e salas de aula, normalmente existem vários itens pequenos que não são considerados nos modelos geométricos e o interior das salas é normalmente modelado com superfícies perfeitamente paralelas e perpendiculares, entretanto, na realidade, não são. Segundo Christensen (2003), um coeficiente de espalhamento mínimo de 0,3 é recomendado em salas de aula e escritórios, com o objetivo de simular o espalhamento que seria provocado se a sala fosse modelada com mais detalhes.

A tabela a seguir sugere coeficientes de espalhamento para alguns materiais. Deve-se salientar que o coeficiente de espalhamento não é resultado apenas do material, mas também das dimensões das superfícies.

Tabela 2. Coeficientes de espalhamento sugeridos para alguns materiais, para frequências médias.

Material	Coeficiente de espalhamento nas frequências médias
Concreto alisado e pintado	0,01 - 0,03
Alvenaria sem reboco	0,05 - 0,10
Estante de livros com livros	0,3
Área de audiência	0,60 - 0,70

Fonte: Christensen e Rindel (2005a, p.5, tradução nossa).

Christensen e Rindel (2005b), em estudo realizado em salas de aula, verificaram que apesar das superfícies nesses locais serem aparentemente de grandes dimensões, o coeficiente de espalhamento igual a 0,1 não gera bons resultados, sendo necessário aumentá-lo para valores entre 0,25 e 0,5. No software Odeon, o coeficiente de espalhamento estipulado para uma superfície particular é válido para todas as frequências. Esse coeficiente é o produto do espalhamento do próprio material e das propriedades geométrica da superfície. O espalhamento geométrico em baixas frequências é dominado pela difração e pelo limite de tamanho das superfícies, já em altas frequências é dominada pela irregularidade das superfícies (CHRISTENSEN, 2003).

Apesar da utilização desses valores estimados, o comitê de normas técnicas ISO/TC43/SC2/WG25 sugere um método de medição da incidência randômica do coeficiente de espalhamento em meio difuso (JEON; LEE; VORLÄNDER, 2004). O comitê de normas AES SC-04-02 introduziu um método da incidência direcional em campo livre. O método de medição do coeficiente de espalhamento é baseado na ISO 354: “Acoustics- Measurement of sound absorption in reverberation room”, sendo a norma utilizada para a medição do coeficiente de espalhamento, ISO 17497-1, uma extensão abrangendo a condição de medição de amostra circular, em rotação (JEON; LEE; VORLÄNDER, 2004).

Do estudo realizado por Jeon, Lee e Vorländer (2004) foi obtido o gráfico 4, o qual apresenta as respostas impulsivas obtidas de uma medição do coeficiente de espalhamento segundo a ISO 17497-1, em diferentes posições de microfone da amostra em teste.

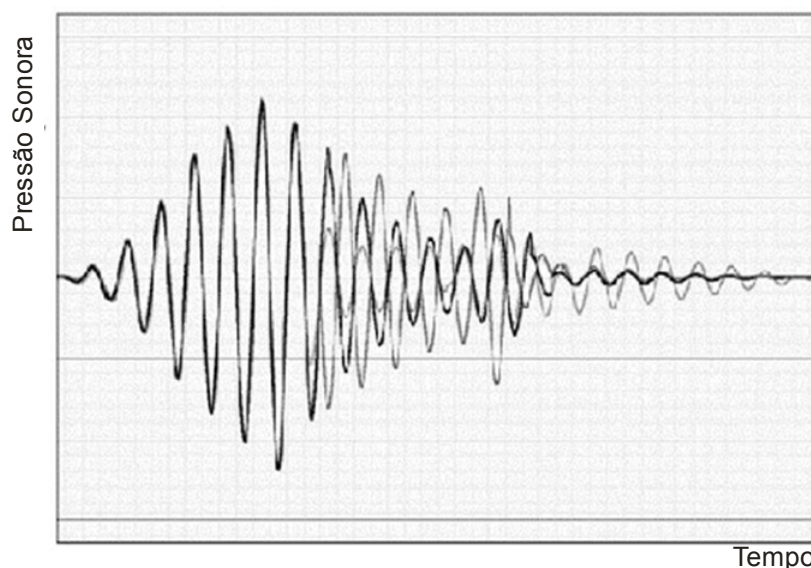


Gráfico 4. Respostas impulsivas na medição do coeficiente de espalhamento. Fonte: Jeon, Lee e Vorländer (2004, p. 343, tradução nossa).

No gráfico 4, os impulsos mostram os sons refletidos de uma superfície difusora para diferentes orientações (JEON; LEE; VORLÄNDER, 2004). As partes iniciais de cada som refletido, as partes especulares da reflexão, são bastante correlatas, comparando às partes posteriores das reflexões, as partes espalhadas, que são afetadas por orientações específicas e diferenças de fase. Conseqüentemente, as partes posteriores dos pulsos refletidos contêm a energia na cauda. Segundo Jeon, Lee e Vorländer (2004), após sincronizar ou coincidir as fases dos valores médios das respostas impulsivas, o coeficiente de espalhamento pode ser obtido extraindo a energia especular dos pulsos refletidos.

Com o exposto, percebe-se que a difusão sonora é considerada um fator importante no projeto acústico de edificações. Para reforçar essa afirmativa, Christensen (2003) comenta que a imprecisão dos coeficientes de espalhamento inseridos em simulações computacionais é uma das principais fontes de erros. Essa imprecisão ocorre pelo conhecimento dos coeficientes de espalhamento ser normalmente um tanto limitado. Assim, Jeon, Lee e Vorländer (2004) vêem como uma alternativa à tal carência o estudo da difusão sonora no recinto, o qual tornará possível estimar a difusão de materiais de acabamento de superfícies internas em situações reais.

2.1.4 Absorção Sonora

Quando o som colide com as superfícies em um recinto, parte da sua energia é absorvida e transmitida e parte é refletida novamente para dentro da sala (EGAN, 1988). Se forem examinadas as características de reflexão, absorção e transmissão do som da perspectiva do interior do ambiente, observa-se que tanto as partes da absorção quanto da transmissão da energia são perdidas do ambiente (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). Em outras palavras, considerando a acústica de ambientes, é assumido que a energia sonora que atinge uma superfície, parte é refletida e parte é absorvida.

A absorção total (A) em um recinto é resultado da soma de três fatores (HARRIS, 1994):

- a) a absorção provida por todas as superfícies desse recinto ($A_{superfície}$), principalmente pelas paredes, teto e piso;
- b) a absorção provida pelo mobiliário e ocupantes do local ($A_{mobiliário e ocupantes}$);
- c) a absorção provida pelo ar (A_{ar}).

Assim, a absorção total de um recinto é dada por:

$$A = A_{superfície} + A_{mobiliário e ocupantes} + A_{ar} \quad (5)$$

A unidade de absorção (A) é chamada *sabin* em homenagem ao acústico americano Wallace Clement Sabine (1868-1919) (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

Segundo Mehta, Johnson e Rocafort (1999), em um auditório, a absorção da audiência é normalmente a maior contribuição na absorção total. De fato, para uma casa de concertos, aproximadamente 75% do total da absorção é provida pela audiência.

O ar também absorve o som, mas a sua absorção é significativa apenas nas altas frequências, acima de 2000 Hz, e em salas de grandes dimensões (HARRIS, 1994). A absorção do ar é dada por:

$$A_{ar} = m \cdot V \quad (6)$$

Onde V é o volume da sala em m^3 e m é o coeficiente de atenuação do ar, expresso em sabins/m. O valor de m é função da umidade relativa do ar, para uma umidade relativa de 40 a 60%, os valores de m dados na tabela a seguir podem ser utilizados.

Tabela 3. Coeficiente de atenuação do ar (m).

Frequência (kHz)	Atenuação do ar (sabins/m)
2	0,009
4	0,025
8	0,080

Fonte: Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p. 85, tradução nossa).

Já no caso de superfícies, a absorção sonora é resultado do produto da área do material (S) e seu coeficiente de absorção (α). Então, a absorção sonora gerada pelo material (A) pode ser expressa por:

$$A = S \cdot \alpha \quad (7)$$

Como visto, a eficiência de absorção sonora de um material pode ser expressa pelo seu coeficiente de absorção, α (EGAN, 1988). O coeficiente de absorção é a fração, expressa como um número decimal, da potência sonora incidente aleatoriamente que é absorvida, ou que não é refletida, pelo material (HARRIS, 1998). Teoricamente, o α pode variar de 0, nenhuma energia sonora absorvida, a 1,0, absorção perfeita com toda a energia incidente absorvida (EGAN, 1988). Por exemplo, um coeficiente de absorção sonora de 0,65 indica que 65% da energia sonora incidente que encontra um material é absorvida (HARRIS, 1998).

O coeficiente de absorção sonora de qualquer material varia com a frequência (HARRIS, 1998). Normalmente, os coeficientes são listados em seis frequências: 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz (HARRIS, 1998). O coeficiente de absorção varia também com o ângulo que a onda atinge o material (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Como em um recinto, as ondas sonoras atingem as superfícies com diversos ângulos (HARRIS, 1998), normalmente, o coeficiente de absorção em uma dada frequência é dado como a média do coeficiente em todos os ângulos de incidência (KNUDSEN; HARRIS, 1988). O coeficiente de absorção não depende apenas da natureza do material, mas também de outros fatores como a espessura, a forma que está instalado, e a quantidade de ar existente atrás dele.

Segundo Egan (1988), os coeficientes são alcançados através de testes de laboratório ou por estimativa através de medição em construções existentes. Pelo coeficiente de absorção variar com o ângulo de incidência da onda sonora, os coeficientes são normalmente medidos

em salas reverberantes de laboratórios, nas quais as ondas sonoras são razoavelmente difusas, assim, elas atingem a superfície de teste em várias direções (HARRIS, 1998).

Materiais com coeficientes de absorção médios a altos, maior que 0,5, são referenciados como absorsores acústicos (EGAN, 1988). Já, materiais com coeficientes de absorção baixos, menor que 0,2, são chamados refletores acústicos (EGAN, 1988). Segundo Mehta, Johnson e Rocafort (1999), uma janela aberta, que se imagina não absorver nenhum som, é considerada um absorsores acústico perfeito, pois todo o som que incide na janela é transmitido para fora. Assim, para uma janela aberta, o coeficiente de absorção (α) é igual a 1,00.

Cavanaugh e Wilkes (1999) salientam que todos os eventos acústicos envolvem uma fonte, um meio e um receptor. A atenuação normalmente envolve dois ou mais espaços, sendo um deles o recinto da fonte, referindo-se, assim, em atenuação entre salas. A absorção, entretanto, afeta a acústica de um recinto, o qual contém tanto a fonte como o receptor (CAVANAUGH; WILKES, 1999). A taxa em que o som é absorvido em um recinto é o fator principal na redução do ruído e controle da reverberação (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Assim, materiais de absorção acústica são utilizados para reduzir o ruído em espaços internos e no controle da reverberação em grandes espaços (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

Utilizando a absorção do ambiente para o controle da reverberação, o tempo de reverberação de uma sala pode ser dado pela equação de Sabine que, de uma forma simplificada, é escrita:

$$T = 0,16 V/A \tag{8}$$

Onde T é o tempo de reverberação em segundos; V é o volume da sala em metros cúbicos; e A é a combinação da absorção dos materiais e revestimento, do mobiliário e objetos, mais a absorção do ar, em sabins (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Assim, é claro que um recinto contendo pouca absorção terá uma alta reverberação.

Cobrir algumas das maiores superfícies com absorsores razoavelmente eficiente, será obtida redução satisfatória da reverberação. Entretanto, adicionar tratamento acústico em um local onde já existe absorção não resultará em uma grande redução da reverberação. A eficiência do material não é tão importante quanto o número de sabins, ou seja, grandes áreas cobertas com material nem tão eficiente são tão eficazes quanto pequenas áreas cobertas com

material de maior absorção (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Através da fórmula, percebe-se que o tempo de reverberação é reduzido pela metade a cada dobro de absorção.

Já para o controle de ruído, a absorção é utilizada para controle no campo reverberante. Conforme Cavanaugh e Wilkes (1999), com exceção das imediações da fonte, o nível sonoro em uma sala, em relação àquela fonte, tende a ser o mesmo independentemente da distância. Esse nível, chamado nível sonoro reverberante, é expresso por (CAVANAUGH; WILKES, 1999):

$$L = P - 10\log A \quad (9)$$

Onde L é o nível sonoro em decibéis; P é o nível da potência sonora da fonte; e A representa a absorção em sabins.

Como a potência depende das características da fonte, o nível sonoro é controlado pela absorção sonora do ambiente. Assim, um recinto com pouca absorção, ou absorção ineficiente, tende a ser ruidoso (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

Níveis sonoros em um recinto podem ser reduzidos com o uso efetivo do tratamento de absorção sonora (EGAN, 1988). Segundo HARRIS (1994), a redução sonora através da inserção de material absorvente em um recinto pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{nível de redução} = 10\log \frac{A_{depois}}{A_{antes}} \quad (10)$$

Onde A_{antes} é a absorção sonora total antes da adição de material acústico, por exemplo, antes do tratamento acústico; e A_{depois} é a absorção após o tratamento. Assim, adicionando ou melhorando a absorção, o ambiente se tornará menos ruidoso, mas essa redução não será tão significativa se no local já existir absorção (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Nesse caso, novamente, a absorção total é mais importante que a eficiência do material individualmente. Além disso, como descrito por Knudsen e Harris (1988), a localização e distribuição do material de absorção em um recinto afeta a absorção devido ao material e à distribuição do som no local. Por exemplo, 25 pequenas áreas do material, cada uma com $0,40\text{m}^2$, irá absorver mais som que uma grande área coberta do material absorsor com 10 m^2 (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Essa dependência da absorção no tamanho dos painéis é freqüentemente referente à área de efeito.

Segundo Egan (1988), a adição de absorção sonora no teto de uma sala pequena (menor que 45m²) pode reduzir os níveis de som reverberante em 10 dB, como demonstrado no gráfico 5. Entretanto, próximo da fonte a redução será de apenas 3 dB aproximadamente. Se além do teto, todas as paredes forem tratadas com material de absorção acústica, o nível sonoro no campo reverberante terá uma queda de 16 dB, mas o campo sonoro próximo da fonte não será afetado. É interessante notar que nenhuma redução é alcançada próximo da fonte com a adição desse tratamento (EGAN, 1988).

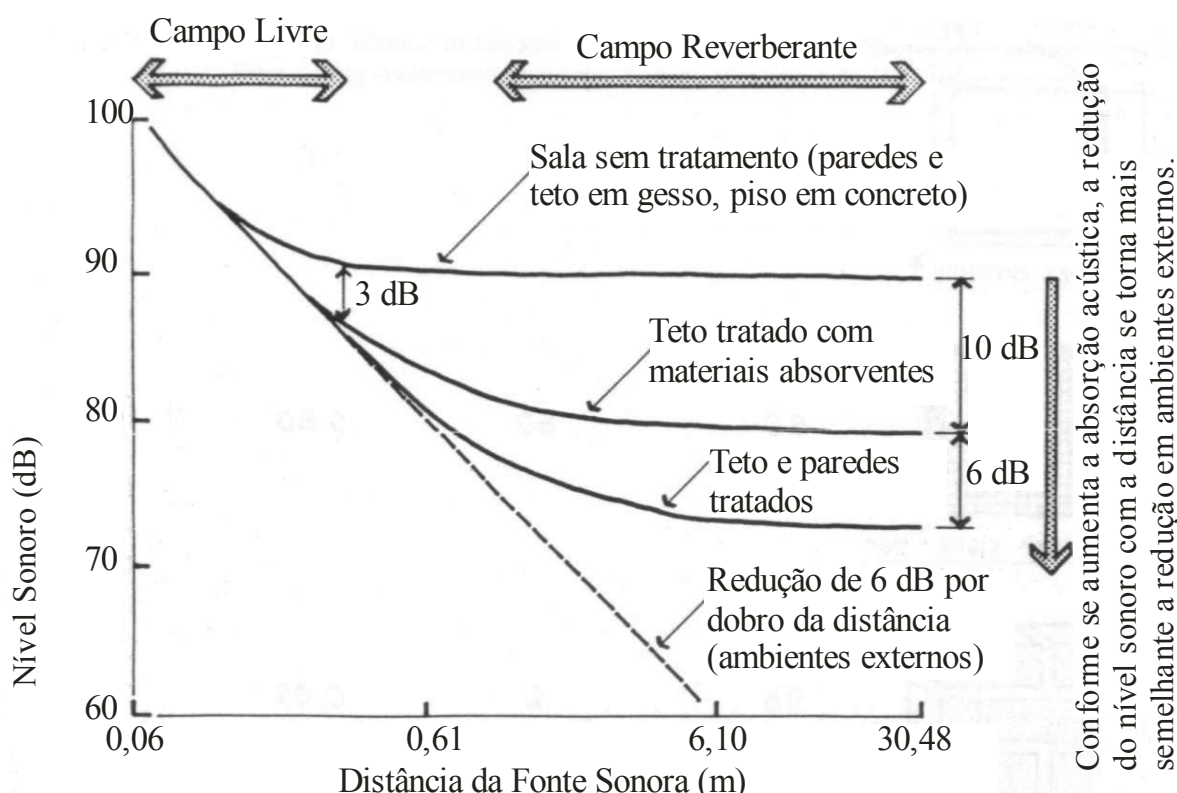


Gráfico 5. Redução do nível sonoro com a distância da fonte. Fonte: Egan (1988, p. 41, tradução nossa).

Assim, quando utilizado corretamente, materiais absorsores acústicos podem ser eficientes no controle de ruído no interior de recintos (EGAN, 1988). Entretanto, eles têm um limite de aplicação e não são eficientes para todos os problemas de ruído. Cavanaugh e Wilkes (1999) afirmam que a cada dobro da absorção instalada o nível sonoro reverberante reduz em 3dB, o que, aliás, é muito pouco se comparada à redução de tempo de reverberação, o qual reduz pela metade a cada vez que a absorção é dobrada. Assim, a lei do rendimento decrescente pode limitar rapidamente a eficiência do aumento da absorção acústica para o controle do ruído (EGAN, 1988).

Em salas grandes e amplas, materiais absorvedores acústicos podem contribuir para a privacidade da fala, pois causam a redução da energia sonora com a distância de acordo com a lei do quadrado inverso (EGAN, 1988). Em grandes planos abertos, onde as paredes são partes relativamente insignificantes na sala, a atenuação sonora pode ser aproximada a 6 dB a cada dobro da distância da fonte, se o piso for revestido por carpete e o teto por material absorvente.

Além do controle da reverberação e do nível de ruído em um local, a absorção pode contribuir com as reflexões discretas (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Segundo esses autores, um caso típico de reflexões discretas são os ecos de uma superfície distante, como a parede do fundo de um auditório. Os mesmos autores afirmam que, nesse caso, o problema não é a interação repetitiva entre o som e o material, mas um único contato. Nesse instante, o nível sonoro deve ser sensivelmente reduzido. O nível refletido, L_r , relativo ao nível incidente, L_i , ambos em decibéis, é dado por (CAVANAUGH; WILKES, 1999):

$$L_r = L_i + 10 \log (1 - \alpha) \quad (11)$$

Assim, um material com α de 0,50 irá reduzir o nível em 3 dB, o que dificilmente será suficiente para eliminar ecos (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Coeficientes de absorção de 0,80 a 0,90 ou superiores normalmente são necessários para eliminar as reflexões discretas. Nesse caso, diferindo dos casos apresentados anteriormente, a eficiência do material em absorver o som é mais importante que a quantidade total de absorção, número de sabins.

Todos os materiais utilizados na construção de edifícios absorvem algum som, mas um bom controle de ruído normalmente requer o uso de materiais que foram projetados com a função principal de absorvedores acústicos (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Segundo Long (2006), os materiais de absorção acústica utilizados em arquitetura podem ser divididos em três categorias: absorção por poros, painéis absorvedores e absorvedores por ressonância. A absorção por materiais porosos é normalmente grande nas altas frequências e pequena nas baixas (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Já a absorção pela ressonância de painéis é pequena nas altas frequências, mas pode ser grande nas baixas. Os dois tipos de absorção são importantes no controle do som em salas, entretanto, desses, os materiais porosos são os mais utilizados e incluem fibra de vidro, produtos em fibra mineral, chapas de madeira prensada, tecidos, feltros, espumas, carpete e muitos outros produtos (LONG, 2006).

No caso da absorção através da ressonância de painéis, ocorre da seguinte forma: quando as ondas sonoras atingem um painel, a mudança de pressão dessas ondas de encontro

com o painel força ele a vibrar (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Ou seja, absorção por ressonância ocorre quando um sistema consistente, mas não totalmente rígido, é colocado em movimento pela energia sonora (CAVANAUGH; WILKES, 1999). O sistema irá absorver e dissipar a energia se a sua frequência natural corresponder à frequência do som incidente. O resultado dessa vibração é a transformação de uma quantidade de energia sonora em calor (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Se o painel for maciço e duro, a quantidade de energia convertida em vibração mecânica no painel será muito pequena, entretanto, se o painel for leve e flexível, a quantidade de energia absorvida será muito grande, principalmente nas baixas frequências. Poucos produtos utilizam esse princípio como design, mas existem muitos produtos que, se não forem bem fixados, irão ressonar e absorver o som (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

Já os materiais porosos são formados por lã mineral ou fibra de vidro, pelos vazios entre grãos ou por uma composição de espuma na qual as bolhas solidificadas se interconectam através do material (HARRIS, 1998). Segundo Beranek e Vér (1992), esses materiais possuem poros abertos com dimensões tipicamente inferiores a 1mm, os quais são muito menores que o comprimento da onda sonora. A maioria dos materiais com superfície porosa pode ser considerada um absorvedor por poros, sendo a fibra de vidro e a lã mineral os absorvedores porosos comumente mais utilizados (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). A absorção sonora por absorvedores porosos é predominantemente a conversão indireta da energia sonora em energia térmica (EGAN, 1988). Uma onda sonora que atinge um absorvedor poroso faz com que o ar nos espaços vazios do material vibre para frente e para trás (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). À medida que o ar vibra nos vazios, a energia de vibração do ar é convertida em calor através da fricção entre as partículas de ar e as paredes do vazio. Segundo Cavanaugh e Wilkes (1999) a absorção por fricção ocorre quando o som passa por poros finos e abertos encontrados em materiais porosos e fibrosos. A onda sonora tem sua energia largamente reduzida através da resistência de atrito das paredes do labirinto de poros interconectados (EGAN, 1988). Mehta, Johnson e Rocafort (1999) salientam que para ocorrer as perdas por fricção, é importante que os vazios no material sejam interconectados e contínuos, assim, o ar pode se movimentar para frente e para trás no interior do material. A maioria dos materiais acústicos que têm como propósito absorver o som é baseada nesse princípio (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

Então, apenas materiais com células abertas são bons absorvedores acústicos (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). Espumas plásticas com poliestireno ou poliisocianurato expandidos, muito utilizadas em isolamento térmico, são absorvedores acústicos pobres por

terem estrutura de célula fechada sem conexão. Entretanto, espumas de melamine, poliuretano e poliéster com suas células interconectadas são bons absorvedores acústicos.

A quantidade de absorção que pode ser alcançada é determinada pelas propriedades físicas da espessura, densidade e porosidade para a maioria dos materiais porosos, e diâmetro e orientação das fibras do material (EGAN, 1988). As indústrias otimizam essas propriedades para alcançar alta eficiência na absorção sonora. Egan (1988) reforça que a espessura tem um efeito significativo na eficiência de um absorvedor sonoro poroso. Mehta, Johnson e Rocafort (1999) afirmam que o valor de α para um material absorvedor poroso aumenta com a espessura do material. Isso porque a velocidade da partícula aumenta a uma distância do substrato (parede, teto, piso, outros) de 0,25 vezes o comprimento de onda (λ) da onda incidente. Se a espessura do material for pequena, a velocidade máxima da partícula ocorre fora do material de absorção, gerando um valor de α pequeno. A exemplo disso, tem-se na figura a seguir os coeficientes de absorção da fibra de vidro em diversas espessuras.

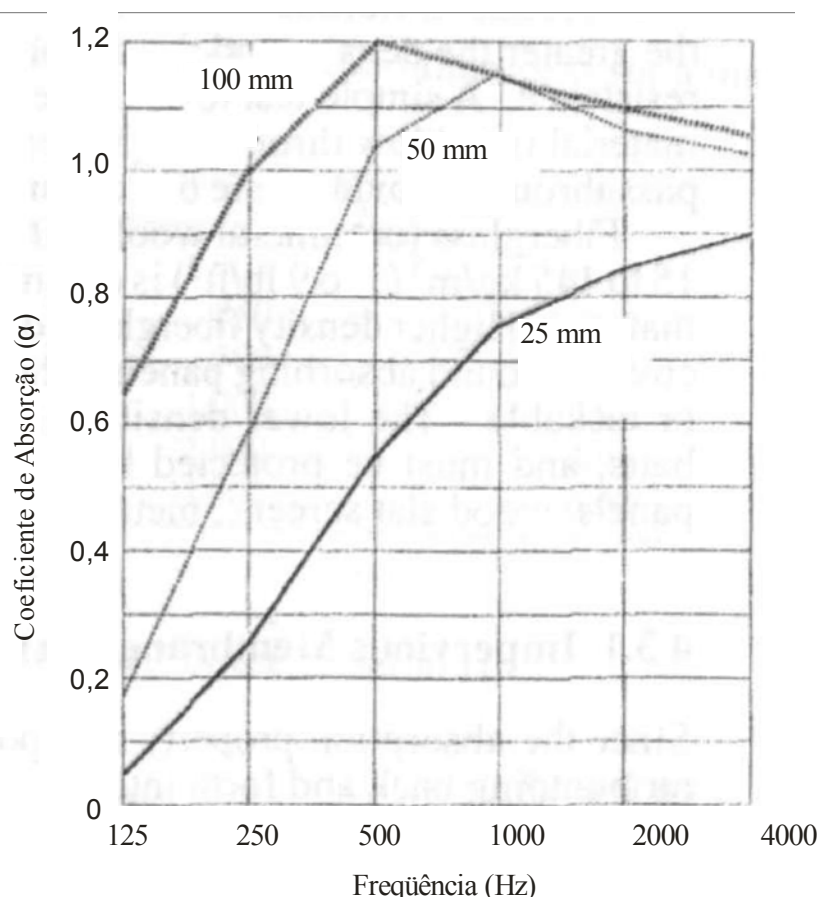


Gráfico 6. Coeficiente de absorção da fibra de vidro (densidade 48 kg/m³) nas espessuras de 25mm, 50mm e 100mm. Fonte: Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p. 66, tradução nossa).

Mehta, Johnson e Rocafort (1999) salientam que a camada de material absorvedor poroso que está em contato direto com o substrato é inútil na absorção acústica, já que a velocidade

da partícula ali é zero. A efetividade da camada de material poroso aumenta com a distância do substrato até um máximo de $0,25\lambda$ de distância dessa superfície. Após essa distância, a efetividade diminui e maximiza novamente em $0,75\lambda$, $1,25\lambda$ e assim por diante de distância do substrato. Para espessuras utilizadas normalmente de 25 a 50mm, o coeficiente de absorção de materiais porosos aumenta com a frequência. Assim, para baixas frequências, essas espessuras dos materiais comumente utilizadas são pequenas se comparado a $0,25\lambda$, gerando um valor baixo de α . Já para altas frequências, a espessura de 25 a 50mm é comparável a $0,25\lambda$. Se utilizada uma fibra de vidro com espessura de 100mm, devido a sua espessura, os valores de α serão elevados tanto nas altas como nas baixas frequências. A existência de cavidade com ar entre o material e o substrato aumenta a absorção sonora nas baixas frequências. Para as frequências acima de 1000 Hz o aumento no valor de α é insignificante, podendo até existir queda de absorção nas altas frequências se houver cavidade de ar no ponto de velocidade máxima da partícula. Com isso, observa-se que para utilizar o coeficiente de absorção do material para cada situação particular, é importante que a condição de montagem seja identificada. Sendo que, sem essa identificação, o valor do coeficiente não tem significado (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

Segundo Knudsen, e Harris (1988), houve grande aumento na utilização de absorsores acústicos, principalmente para a redução de ruído em escritórios, hospitais e restaurantes. Absorsores porosos como fibra de vidro ou lã mineral são comumente utilizados em divisórias baixas de escritórios, em paredes e painéis modulados de teto (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). Nas divisórias, são utilizadas fibras de vidro de alta densidade, relativamente rígidas e resistentes, ou chapas de fibra de madeira com revestimento em tecido. O teto com material acústico se tornou um item comum na maioria dos interiores comercial, educacional e institucional. Um forro acústico é uma chapa rígida, normalmente de lã mineral ou fibra de vidro de alta densidade, fabricado em tamanhos modulares. Sua espessura normalmente varia de 13 a 40mm e é simplesmente encaixado na estrutura de alumínio suspensa pela laje ou telhado. Sendo de material fibroso, as características de absorção do forro correspondem às características dos materiais porosos (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

Várias pessoas toleram o ruído, entretanto muitas não gostam dele (KNUDSEN; HARRIS, 1988). Essa é provavelmente a razão pela qual muitos estabelecimentos comerciais concluíram que o custo do tratamento acústico normalmente incrementa os resultados de lucro pelo aumento de clientela após a instalação do material de absorção. Similarmente, o valor desse tratamento aplicado foi demonstrado na melhora da acústica em escolas, teatros, igrejas,

locais de trabalho e locais para escutar música. Quando aplicado de forma correta, o tratamento de absorção em salas contribui para uma boa acústica, tornando possível se escutar a fala de forma clara e tornando a música melhor audível em toda a extensão do recinto (KNUDSEN; HARRIS, 1988).

2.1.5 Tempo de Reverberação

Beranek (2004) se refere a tempo de reverberação como o tempo necessário para o som, em um dado espaço, tornar-se totalmente inaudível após a sua fonte ser cessada. Como uma definição mais técnica, a norma ISO 3382 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1997) define tempo de reverberação como o tempo, expresso em segundos, necessário para o nível de pressão sonora decrescer 60 dB, em uma taxa de decaimento dada pela regressão dos quadrados lineares da curva de decaimento medido de um nível de 5dB abaixo do nível inicial a 35 dB abaixo do mesmo nível. Ainda de acordo com essa norma, a faixa de 30 dB para a curva de decaimento deve ser utilizada quando a curva não é monótona e o valor obtido para o T_r é chamado T_{30} . Um valor para o tempo de reverberação baseado na taxa de decaimento em uma escala dinâmica menor, decaimento mínimo de 20 dB estendendo-se de 5 dB a 25 dB abaixo do nível inicial, é também possível. Esse valor para o T_r é chamado T_{20} . A norma ISO 3382 estabelece que curva de decaimento é o decaimento do nível de pressão sonora, como função do tempo, em um ponto da sala após a fonte sonora ser cessada.

Assim como a absorção sonora em um recinto varia com a frequência, o tempo de reverberação também se diferenciará nas várias frequências. Para os casos de predominância da fala, é usual a avaliação nas bandas de frequência de 500, 1000 e 2000 Hz (FREYMUTH et al., 2002).

Existem muitas fórmulas para o cálculo do tempo de reverberação, conforme apresentadas nos estudos realizados por Bistafa e Bradley (2000), Neubauer (2001) e Bradley (2002). Entretanto, a fórmula mais difundida para o cálculo do tempo de reverberação é a Fórmula de Sabine.

A fórmula de Sabine é a mais tradicional e simplificada para o cálculo do tempo de reverberação (ver fórmula 8). Foi desenvolvida no ano de 1900 por Wallace Sabine. Essa fórmula assume que a energia sonora é igualmente difusa pela sala (homogênea e isotrópica).

Condição raramente atendida, uma vez que as grandes áreas existentes em um recinto são caracterizadas por absorções diversas (NEUBAUER; KOSTEK, 2001). Segundo Fasold e Veres (2003) a condição para a aplicação da Equação de Sabine é que o coeficiente médio de absorção sonora do ambiente seja igual ou menor a 0,3 ($\bar{\alpha}_{\text{médio}} \leq 0,3$ - ambientes “vivos”). Ainda segundo os autores, quando o $\bar{\alpha}_{\text{médio}} > 0,3$ (“salas mortas”, ou seja, com muita absorção) deve-se utilizar a fórmula de Eyring.

Eyring (1930) afirma que a fórmula de Sabine não é válida quando há absorção considerável na sala. Esse autor aponta que a fórmula de Sabine deve ser utilizada para salas “vivas” e que o tempo de reverberação depende da forma do recinto. Assim, apresenta a teoria revisada e deriva uma fórmula da formulação de Sabine. A fórmula derivada por Eyring apresenta aplicação mais geral que a fórmula de Sabine, pois é baseada no meio de propagação livre entre reflexões caracterizado por um campo sonoro difuso (Neubauer e Kostek, 2001). A fórmula de Eyring está transcrita a seguir:

$$T_r = \frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (12)$$

Onde: V é o volume da sala; S é o somatório das áreas de cada material existente na sala; ln é o logarítmico neperiano; $\bar{\alpha}$ é o coeficiente de absorção médio de todos os materiais, dado pela fórmula:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i S_i \alpha_i}{S} \quad (13)$$

Outra fórmula existente para o cálculo do tempo de reverberação é a fórmula de Arau-Puchade, essa fórmula deve ser utilizada em salas com distribuição assimétrica da absorção. A fórmula de Arau-Puchade assume que o decaimento da reverberação é um processo hiperbólico. Esse decaimento é a superposição de três contribuições: decaimento inicial, primeira e segunda porção linear do decaimento e terceira porção linear do decaimento (NEUBAUER; KOSTEK, 2001). Para salas retangulares, a fórmula de Arau-Puchade define um coeficiente de absorção baseado no modelo de Eyring para cada superfície paralela a cada direção do espaço (DUCOURNEAU; PLANEAU, 2003).

Arau e Puchade, em artigo publicado na revista *Acustica*, no ano de 1988, sugeriram uma fórmula para o cálculo do tempo de reverberação (NEUBAUER, 2001). Essa fórmula está descrita a seguir:

$$T_r = \left[\frac{0,16V}{-\text{Sln}(1-\alpha_x)+4mV} \right]^{\frac{S_x}{S}} \left[\frac{0,16V}{-\text{Sln}(1-\alpha_y)+4mV} \right]^{\frac{S_y}{S}} \left[\frac{0,16V}{-\text{Sln}(1-\alpha_z)+4mV} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (14)$$

Onde: a primeira parcela corresponde à absorção referente aos materiais localizados paralelamente ao eixo x (piso e teto), a segunda, paralelamente ao eixo y (paredes laterais), e a terceira, paralelamente ao eixo z (paredes frontal e posterior); V é o volume da sala em m³; ln é o logarítmico neperiano; α_x é a média aritmética dos coeficientes de absorção das superfícies do piso (S_{x1}) e do teto (S_{x2}) $\alpha_x = \frac{(\alpha_{x1}S_{x1} + \alpha_{x2}S_{x2})}{S_x}$; α_y e α_z são a média aritmética dos coeficientes de absorção das superfícies das paredes laterais, e das paredes frontal e posterior, respectivamente; S é o somatório da área de todos os materiais da sala; S_x , S_y e S_z são os somatórios das áreas dos materiais que estão paralelos aos eixos x, y e z respectivamente; 4mV corresponde a absorção acústica do ar, onde V é o volume da sala e m é o coeficiente de absorção do ar, expresso em Sabins/m, ver tabela 3.

Bistafa e Bradley (2000) observaram que para locais onde a absorção sonora total é elevada, a predição do tempo de reverberação através da fórmula de Sabine resulta em valores mais longos que os valores alcançados com a predição através da fórmula de Eyring, mas a diferença torna-se menor conforme a absorção sonora total é reduzida.

Em estudos realizados pelos mesmos autores, os tempos de reverberação calculados em uma sala de aula com volume de 153 m³ através das fórmulas de Sabine e Eyring foram praticamente os mesmos. Já a fórmula de Arau-Puchade resultou em tempos mais elevados. Já em estudo realizado por Dance e Shield (1999), foi observado que as fórmulas de Eyring e Sabine têm a mesma precisão, quando utilizados coeficientes de absorção apropriados.

Bistafa e Bradley (2000) verificaram que quando o tempo de reverberação é obtido através de uma média entre as várias frequências, o erro dos valores calculados em relação aos medidos é menor que quando é tomada apenas uma frequência. Isso mostra que a qualidade dos valores obtidos através de cálculo não é uniforme nas várias frequências.

As fórmulas apresentadas para a determinação do tempo de reverberação são algumas das que existem para esse cálculo. Outras fórmulas são: de Fritzroy, de Tohyama e Suzuki, de Kuttruff, de Pujolle, de Nilsson, entre outras. Dessa forma, há uma grande dúvida em qual

fórmula deve ser utilizada. Essas fórmulas produzem melhores resultados de acordo com as características do ambiente avaliado.

Em relação à medição do tempo de reverberação, segundo a norma ISO 3382 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1997), é apropriado introduzir a resposta impulsiva como base das medições normalizadas. A resposta impulsiva de uma sala fornece diversos parâmetros acústicos, entre eles o tempo de reverberação.

Para comparação do tempo de reverberação obtido com valores ideais, segundo Batista (1998), o T_r ideal depende do volume, da absorção da sala e da sua função.

A norma NBR 12179 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) fornece um gráfico retirado de Bolt, Beranek e Newman que estabelece relações entre o tempo de reverberação ótimo na frequência de 500 Hz, o volume e a função da sala.

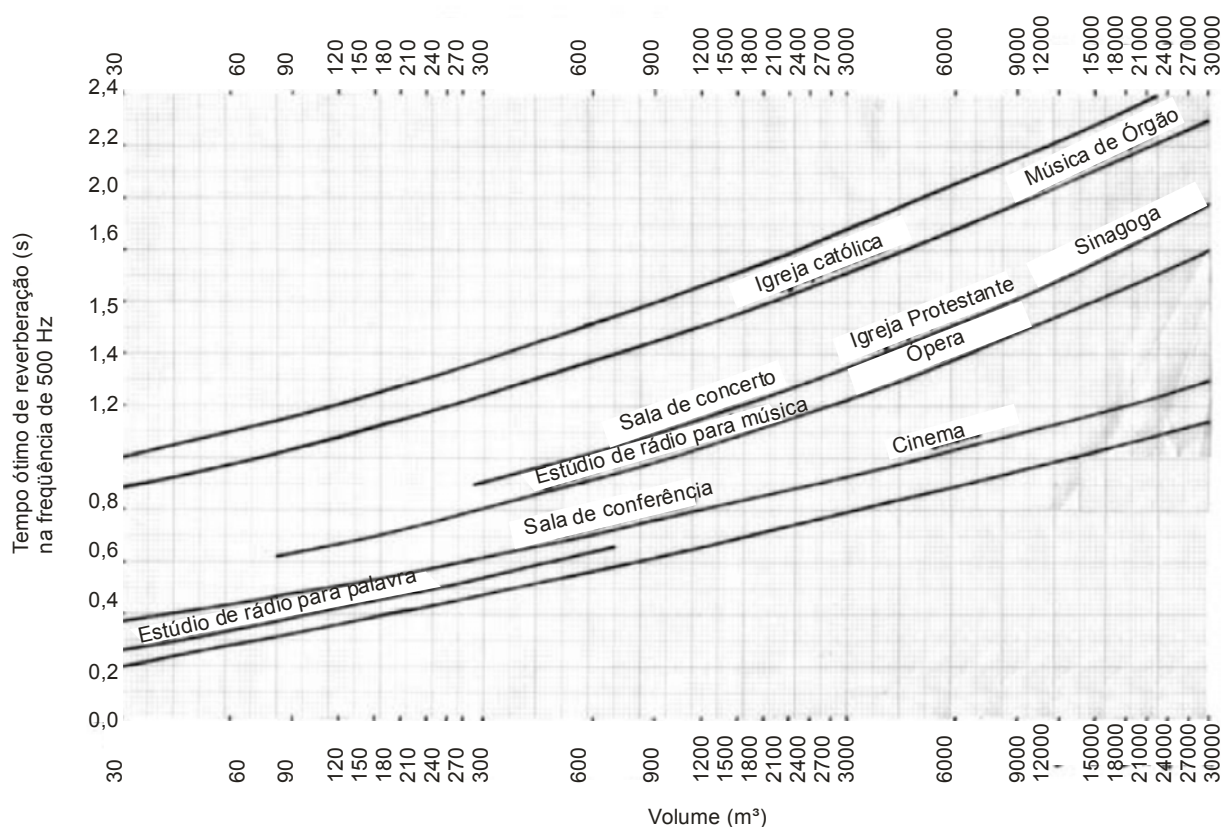


Gráfico 7. Tempo de reverberação ideal relacionado ao volume e função da sala. Fonte: NBR 12179 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, p.9)

Observando-se o gráfico 7, pode-se perceber que não existe a função escritório panorâmico. A norma brasileira NBR 12179 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), apresenta recomendações para tempos de reverberação ótimos em ambientes como: 1) estúdio de rádio para a palavra, 2) sala de conferência, 3) cinema, 4)

estúdio de rádio para a música, 5) sala de concerto, 6) igreja protestante, 7) sinagoga, 8) igreja católica, 9) ópera, 10) música de órgão.

Em relação ao tempo de reverberação ideal em escritórios panorâmicos Chigot (2007) apresenta um quadro com valores de referência para o T_r contidos na Legislação Nacional dos seguintes países: Noruega, Finlândia, Suécia e Austrália/Nova Zelândia. Esse quadro está reproduzido a seguir.

País	Noruega	Finlândia	Suécia	Austrália/Nova Zelândia
Norma ou regulamentação	NS 8175	SFS 5907	SS 025268	AS/NZS 2107
Ano de publicação	2005	2004	2001	2000
Expressão do descritor acústico	Tempos ideais em bandas de oitava.	Máximo valor médio da sala em cada banda de oitava.	Maior valor em cada banda de oitava.	Máximo valor médio da sala em cada banda de oitava.
Frequência abrangente (Hz)	125 – 2000	250 – 4000	250 – 4000	500 ou 1000
Condições da sala		Sala mobiliada.	Sem ocupação e mobiliada.	
Variações		Variação $\pm 0,1$ s 125 Hz: $\pm 0,3$ s	Em 125 Hz: permitido +20%	
T_r para salas com mais de 300 m ³ (s)	0,60 – 0,80	0,35 – 0,55	0,40	0,40 – 0,60

Quadro 2. Valores ideais de T_r em escritórios panorâmicos. Fonte: Chigot (2007, p. 1, tradução nossa).

Além dessas legislações apresentadas, a norma alemã VDI 2569 -1990- Schallschutz und Akustische Gestaltung im Büro (Associação de Engenheiros Alemães - Controle de ruído e tratamento acústico em escritórios) recomenda um valor $\leq 0,5$ s para o tempo de reverberação médio das frequências de 500, 1000 e 2000 Hz (FREYMUTH et al. 2002). A norma francesa NF S31-080, publicada em 2006, especifica valores de T_r conforme a exigência de nível de desempenho dos funcionários (CHIGOT, 2007). Segundo essa norma, para uma exigência de desempenho normal, $T_r \leq 1,2$ s, já para um desempenho eficiente, $T_r \leq 1,0$ s, para um alto desempenho, o T_r deve ser menor ou igual 0,8 s, isso é válido se o volume do edifício for superior a 250 m³. Entretanto, essa norma privilegia a utilização da DL_2 (taxa de decaimento por dobro da distância- ver capítulo 2.1.6), esclarecendo que o tempo de reverberação deve

ser obrigatoriamente utilizado para a avaliação de um escritório apenas se a distância entre as paredes for inferior a 6m.

Segundo Chigot (2007), existem limitações no uso do tempo de reverberação para a avaliação acústica de escritórios panorâmicos. A variação de valores na medição do tempo de reverberação é um problema já conhecido: medições em uma mesma sala podem apresentar resultados diferentes e o mesmo ocorre para várias medições na mesma posição da sala. Esses resultados são correlatos ao fato que esquemas de medições acústicas em recintos foram originalmente criados com base em geometrias cúbicas, com boa dispersão da energia sonora (difusão). Entretanto, parecem não ser adequados para condições acústicas especiais existentes em escritórios panorâmicos, com campo sonoro não difuso, geometria complexa, multiplicidade de receptores e fontes e propagação sonora complexa. Segundo o mesmo autor, escritórios panorâmicos devem ser avaliados através de outros parâmetros, além do tempo de reverberação, para uma avaliação mais completa das suas características acústicas.

Em relação à simulação computacional do tempo de reverberação, segundo Dance e Shield (1999), uma predição acurada é aquela em que os valores de tempo de reverberação resultantes têm diferença igual ou menor a 14% em relação aos valores obtidos através das fórmulas de Eyring e Sabine, isso quando o coeficiente de absorção médio da sala for de aproximadamente 0,2. Dance e Shield (1999), em um estudo, testaram três programas computacionais de predição acústica. Nesses, obtiveram erro de 3,5, 9,6 e 14,4%.

Já quando comparado à medição, Christensen (2003) indica que para uma simulação ser considerada acurada, a diferença entre o dado medido e simulado deve ser menor que o limiar da percepção subjetiva. Ou seja, para o tempo de reverberação, segundo Bork (2000), esse limiar da percepção subjetiva é de 5%. Assim, para o T_r , uma diferença de 5% não é percebida subjetivamente. Entretanto, segundo Christensen (2003), muitas vezes é muito difícil ou até impossível alcançar tal precisão, sendo, algumas vezes, satisfatórios valores menos precisos.

2.1.6 Curva de Distribuição Espacial do Som.

Conforme a lei do inverso do quadrado, em um espaço sem reflexões, campo aberto, o som emitido por uma fonte pontual decresce 6dB a cada dobro da distância dessa fonte (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). Ou seja, em condições ideais de campo aberto,

se uma medição do nível de pressão sonora a 2 m da fonte resultar em 45 dB, a 4 m da fonte essa medição irá resultar em 39 dB.

Em uma sala, onde existem reflexões das superfícies, o campo sonoro é dividido em campo livre e campo reverberante. Na região de campo livre, mais próximo à fonte, o decaimento sonoro em relação à distância da fonte segue a lei dos quadrados inversos (6dB a cada dobro da distância). Em regiões mais afastadas da fonte, no campo reverberante, o decaimento sonoro depende da quantidade de absorção existente na sala. Salas com maior absorção possuem um maior decaimento sonoro em relação à distância da fonte. Quando são alcançadas distâncias maiores da fonte, o decaimento sonoro se torna constante, não há variação com a distância, evidenciando que o som reverberante é predominante (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

Segundo a norma ISO 14257 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001), a curva de distribuição espacial do som apresenta o decaimento do nível de pressão sonora de uma fonte de referência conforme o ponto de recepção se afasta dessa fonte.

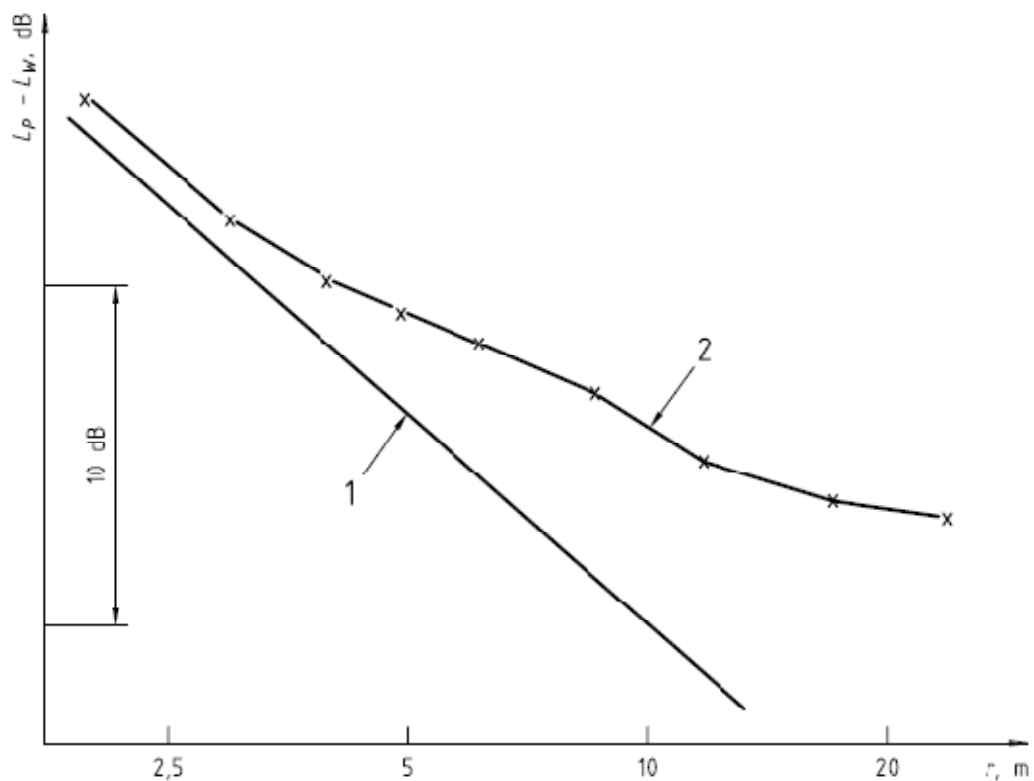


Gráfico 8. Representação da curva de distribuição espacial do som (1: curva de distribuição sonora em campo aberto; 2: curva de distribuição sonora espacial; eixo x (m): distância da fonte ao receptor (escala logarítmica); eixo y (dB)- diferença entre L_p (nível de pressão sonora no ponto de medição) e L_w (nível de potência sonora da fonte)). Fonte: ISO 14257 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001, p. 5).

Essas curvas dependem da frequência e caracterizam as propriedades acústicas da sala. Em alguns casos são necessárias várias curvas de distribuição espacial do som para caracterizar uma sala. Um dos principais objetivos da medição das curvas de distribuição espacial do som é avaliar a qualidade acústica de um ambiente de trabalho (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001).

Através dessas curvas, para uma dada faixa de distâncias da fonte, duas grandezas são determinadas: a taxa de decaimento dos níveis de pressão sonora por dobro da distância (DL_2) e o excesso de nível de pressão sonora (DL_f) (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001). Essas duas grandezas são úteis para avaliar a qualidade acústica de uma sala.

Segundo a norma ISO 14257, a taxa de decaimento dos níveis de pressão sonora por dobro da distância (DL_2) é o declive, em decibéis por dobro da distância, da curva de distribuição espacial do som para uma dada faixa de distâncias. Já o excesso de nível de pressão sonora (DL_f) é a diferença média, em decibéis, ao longo de uma faixa de distância dada, entre a curva de distribuição espacial do som da sala e a curva de distribuição espacial do som para o campo aberto.

Segundo Ondet e Suer (1995), a redução do nível sonoro por dobro da distância da curva de decaimento espacial (DL_2) é independente da potência da fonte. Esse parâmetro é bastante dependente da reverberação da sala: um valor de 0 dB corresponde ao caso de uma sala muito reverberante; enquanto um valor de 6dB corresponde ao caso de uma sala tratada de forma ideal, correspondente ao campo aberto.

Quando uma curva de distribuição espacial do som é avaliada, as seguintes faixas de distância podem ser distinguidas (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001):

- a) a região próxima: essa região varia de 1m até a distância d_1 . Nessa região, a curva de distribuição do som é dominada pelo som direto da fonte utilizada para o teste. Essa região é utilizada para a avaliação das propriedades acústicas de salas pequenas;
- b) a região média: essa região varia da distância d_1 a d_2 . A região média é de importância particular para caracterizar a qualidade acústica de uma sala para aspectos de saúde e segurança;
- c) a região distante: essa região inicia da distância d_2 . Nessa região, a distribuição sonora é fortemente influenciada pelas superfícies de reflexão e espalhamento sonoro da sala. Essa região é importante para a avaliação acústica de espaços de trabalho distantes da fonte, em relação a aspectos de saúde e segurança.

Valores típicos de d_1 e d_2 são 5m e 16m respectivamente. Os valores de DL_2 devem ser determinados no mínimo para a região média. Essa determinação deve ser realizada no mínimo com $d_1=5m$ e $d_2=16m$ se for pretendida uma comparação de dados em nível internacional. Os valores de DL_2 podem ser dados como médias de pontos obtidos dentro de uma mesma região, relacionados a uma frequência em banda de oitava. Por exemplo: $DL_{2,1000}(1;5)$ é o valor médio de DL_2 na banda de oitava de 1000 Hz para a região próxima de 1m a 5m da fonte. Ainda, o DL_2 pode ser apresentado para um espectro de referência do ruído rosa ponderado em A, existindo um valor único para cada faixa de distância (próxima, média, distante) (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001).

Ondet e Suer (1995) utilizaram a redução do nível sonoro por dobro da distância para a obtenção de critério para avaliar a qualidade acústica de edifícios industriais. Esse parâmetro foi obtido através de um software de simulação acústica baseado na técnica de traçado de raios.

Pop e Rindel (2005) afirmam que quando uma sala é grande e plana, como um escritório panorâmico, a taxa de decaimento espacial do som é recomendada para caracterizar as condições acústicas, ao invés do tempo de reverberação.

Para Chigot (2007), o DL_2 , originalmente aplicado em ambientes de trabalho, mostrou-se um descritor consistente e realista das condições acústicas de escritórios panorâmicos. Segundo o mesmo autor, o DL_2 vem sendo incluído em normas da qualidade acústica de edifícios. A norma francesa NF S31-080, publicada em 2006, propôs a utilização do DL_2 para avaliar grandes escritórios (volume superior a $300m^3$). Essa norma limita o uso do DL_2 para escritórios com distâncias entre paredes inferior a 6m, sendo que, nesse caso, deve ser utilizado o tempo de reverberação. Essa norma especifica valores de DL_2 conforme a exigência de desempenho dos funcionários: desempenho padrão, $DL_2 > 2dB(A)$; desempenho eficiente, $DL_2 > 3dB(A)$; alto desempenho, $DL_2 > 4dB(A)$ (CHIGOT, 2007).

2.1.7 Inteligibilidade e Privacidade da Fala

A fala consiste de uma sucessão de sons variando rapidamente a cada instante em intensidade e frequência (FRENCH; STEINBERG, 1947). Segundo Steinberg (1929), os sons da fala são caracterizadas por três grandezas: amplitude, frequência e fase, todas essas são essenciais para um reconhecimento correto dos sons pelo ouvinte. Assumindo que vários

componentes são recebidos pelo ouvido na sua fase inicial e ao longo do tempo, o sucesso do ouvinte em reconhecer e interpretar esses sons depende da intensidade desses sons no seu ouvido e a intensidade de sons indesejáveis que possam estar presentes, em função da frequência de ambos os sons (FRENCH; STEINBERG, 1947).

Pesquisas mostram que, se considerada com esforço normal, tanto para homens como para mulheres, a voz humana possui concentração de maior nível na frequência de 500 Hz (HARRIS, 1998). A média do nível de pressão sonora equivalente para esse esforço é de 58 dB(A) para homens e de 55 dB(A) para mulheres. Quando considerado alto esforço vocal, os níveis sonoros e frequências dominante são de 88 dB(A) e 1250 Hz para homens e 82 dB(A) e 1250 a 1600Hz para mulheres. Esses níveis podem variar conforme o orador e as condições ambientais, ruído de fundo e reverberação. A maioria das pessoas com audição normal pode se comunicar razoavelmente bem se o nível da voz estiver de 7 a 11 dB acima do nível sonoro ambiente (HARRIS, 1998).

Em geral, ocorrem distorções na fala se existirem mudanças relativas em uma ou mais das grandezas que a caracterizam no processo de transmissão das ondas sonoras desde o orador até o ouvinte (STEINBERG, 1929). Makrinenko (1994) afirma que a inteligibilidade da fala é determinada por características acústicas tais como: o nível do sinal da fala, o nível de ruído de fundo, o tempo de reverberação e o padrão das reflexões do som, portanto a boa inteligibilidade é determinada pelo alto nível da fala, baixo nível de ruído, menor tempo de reverberação e padrão de reflexão breve e sem atraso acentuado de reflexões iniciais.

Steinberg (1929) afirma que existe dificuldade de se entender não apenas sons muito fracos, mas também sons muito intensos. Segundo Knudsen (1929), a intensidade sonora ótima para a compreensão da fala é de 70 dB, entretanto, o nível sonoro equivalente, a uma distância de 1 metro do orador, normalmente está entre 50 e 65 dB(A), para uma conversa em nível normal da voz (HARRIS, 1998).

French e Steinberg (1947) comentam que, normalmente, uma pessoa tende a ajustar sua voz pela intensidade que a escuta. Assim, a intensidade da fala também depende da intensidade dos sons indesejáveis, como o ruído ambiente no local onde está o orador. Segundo Knudsen (1929), o ruído interfere na audição da fala, produzindo o efeito chamado mascaramento, sendo dependente da intensidade do ruído comparado à intensidade da fala. Steinberg (1929) complementa afirmando que o efeito principal do ruído na interpretação de sons da fala está intimamente associado ao mascaramento ou mais convenientemente à dificuldade de entender ou escutar os sons da fala.

A reverberação e a distância entre orador e ouvinte também interferem na comunicação (STEINBERG, 1929). Em estudo realizado por Knudsen (1929) em auditórios de aproximadamente 5.500 a 8.500 m³, foi encontrado que a inteligibilidade da fala reduzia em média 6% a cada aumento de um segundo no tempo de reverberação.

Em relação a distorções do som causadas pela ressonância, sons que tenham frequências importantes na região de ressonância sofrem distorções (STEINBERG, 1929). Já, sons que tenham frequências importantes fora da região de ressonância sofrem atenuação ou redução no nível.

Assim, utilizando como exemplo um auditório apenas para o propósito da fala, segundo Knudsen (1929), o ideal é que ele seja pequeno e sem ruído, que as superfícies sejam revestidas com material perfeitamente absorvente. Isso porque, em uma sala pequena o orador estará próximo ao ouvinte e assim a voz do orador será ouvida em intensidade adequada. Além disso, não existirá interferência pelo ruído, reverberação ou reflexões tardias.

Apesar de em auditórios o objetivo do projeto acústico seja maximizar a inteligibilidade da fala, o oposto ocorre em espaços destinados a escritórios (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). Nesses locais, o objetivo do projeto é alcançar a menor inteligibilidade possível, assim, um orador em uma estação de trabalho não será entendido pelo colega na estação de trabalho adjacente. Segundo Mehta, Johnson e Rocafort (1999) e Long (2006), uma baixa inteligibilidade da fala implica em alta privacidade da fala. Cavanaugh et al. (1962) reforça a importância da privacidade da fala em edifícios, afirmando que apesar do incômodo e o nível de pressão sonora estarem associados para alguns sons, como o som de ar-condicionado e o ruído de tráfego; para sons que trazem alguma informação, como a fala de intrusão (fala de fundo, ou seja, a fala de outros ocupantes do ambiente que não o orador principal), o incômodo é determinado pela inteligibilidade desses sons. Chigot (2007) comenta que o conceito de privacidade da fala está relacionado ao nível de incômodo da fala entre dois indivíduos que não estão conversando entre si. Segundo Schlittmeier et al. (2007), trabalhadores em escritórios frequentemente se queixam do ruído, em particular da fala de fundo, como conversas entre colegas ou ruído de outras pessoas falando ao telefone. Assim, a redução da inteligibilidade da fala de fundo é considerada uma solução para esse problema.

A inteligibilidade dessa fala é destruída quando os picos da fala são submersos em ruído de fundo (CAVANAUGH et al., 1962). Egan (1988) afirma que a privacidade da fala em planos abertos ou fechados depende da relação sinal-ruído entre a fala de intrusão (sinal) e

o nível de som de fundo (ruído). Assim, em ambientes de escritório, onde a privacidade tem grande importância, é necessário alcançar uma relação sinal- ruído adequada (LONG, 2006).

O nível da fala de intrusão é largamente determinado pelo esforço vocal do orador e a redução do som entre salas fechadas ou entre estações de trabalho em planos abertos (EGAN, 1988). Além da fala de intrusão, a privacidade da fala será determinada pelo nível de ruído de fundo no ambiente. Egan (1988) afirma que ocupantes de salas com níveis de ruído de fundo muito baixos têm problemas sérios com a fala de intrusão se comparado aos ocupantes com sala que possuem adequado ruído de mascaramento.

Assim, conforme estudo realizado por Egan (1988), se a relação sinal-ruído entre a fala de intrusão e o ruído de fundo for de -10 dB, ou seja, se a fala dos colegas de trabalho estiver 10 dB abaixo do ruído de fundo, existe 100% de satisfação em relação à privacidade. Já se essa relação sinal-ruído for de +5dB, ou seja, se a fala dos colegas estiver 5 dB acima do ruído de fundo, existe total insatisfação (EGAN, 1988).

Long (2006) apresenta uma tabela que relaciona valores de relação sinal-ruído entre a fala (sinal) e o ruído de fundo (ruído) e avaliações subjetivas de inteligibilidade e privacidade da fala. Essa tabela está reproduzida a seguir.

Tabela 4. Relação entre inteligibilidade e privacidade da fala e relação sinal-ruído.

Inteligibilidade/Privacidade	Relação sinal-ruído (dB)
Muito boa / Nenhuma	> 0
Boa / Pobre	-3
Fraca / Fraca	-6
Pobre / Normal	-9
Muito pobre / Confidencial	-12

Fonte: Long (2006, p. 544, tradução nossa)

Nessa tabela percebe-se que para se obter uma inteligibilidade muito boa, a fala deve ter nível superior ao ruído de fundo. Já para se obter uma privacidade a nível confidencial, a fala deve estar pelo menos 12 dB abaixo do ruído de fundo.

Entretanto, Cavanaugh et al. (1962) afirmam que o grau de privacidade da fala requerido pelo ocupante de uma sala depende da sua atividade. Como exemplo, pode-se considerar o caso de um engenheiro ou de um técnico. Durante a maior parte do seu dia de trabalho, seu desejo por isolamento da fala é definido pelo seu desejo de redução de distrações, essa pode ser chamada “privacidade normal” (CAVANAUGH et al., 1962).

Entretanto, se esse trabalhador for chamado à sala de seu supervisor para discutir questões salariais ou problemas pessoais, a necessidade por isolamento da fala será diferente. Não existe mais apenas desejo de redução de distrações, mas o desejo da certeza que seus colegas não estejam ouvindo sua conversa. Segundo Cavanaugh et al. (1962), esse tipo de privacidade é chamada confidencial. Geralmente, essa diferença de necessidade de inteligibilidade acarreta na necessidade de redução da relação sinal-ruído em 6 dB.

Schlittmeier et al. (2007) realizaram um experimento para verificar a interferência da inteligibilidade da fala de fundo nas seguintes funções cognitivas básicas: 1) a memória verbal de curto prazo, 2) a manutenção da atenção e 3) o raciocínio verbal e lógico. Como resultado os autores encontraram que o desempenho dessas funções cognitivas é significativamente dimensionado pela combinação da redução do nível e da inteligibilidade, enquanto uma redução apenas do nível não é suficiente. Os dados alcançados no estudo evidenciam a necessidade de reduzir a inteligibilidade da fala de fundo para um melhor desempenho cognitivo, já que sua redução corresponde à melhoria no desempenho da tarefa comparada às condições de trabalho nas quais a fala de fundo é altamente inteligível (SCHLITTMEIER et al., 2007).

A inteligibilidade e a privacidade da fala podem ser mensuradas subjetivamente através de um teste de articulação. Nesse teste, um orador profere vários sons da fala e um observador escreve os sons que está escutando (STEINBERG, 1929). Os sons observados são comparados aos sons ditos e é obtida a percentagem de sons que foram corretamente reconhecidos. Essa percentagem, que é chamada articulação, é tomada como uma medida da habilidade de reconhecimento dos sons da fala. Knudsen (1929) complementa afirmando que a percentagem de articulação corresponde à percentagem de sons típicos da fala que podem ser ouvidos corretamente na avaliação de um observador. A percentagem de articulação depende do nível da fala que chega até o ouvido do observador (STEINBERG, 1929), que, por sua vez, está relacionado ao tamanho do recinto, às características de reverberação, à quantidade de sons indesejáveis e à forma da sala (KNUDSEN, 1929). Segundo Steeneken e Houtgast (1980) a avaliação através de testes de articulação tem a grande vantagem de avaliar a influência do direcionamento do orador em relação ao ouvinte, entretanto, possui sérios inconvenientes, como a necessidade de um grande número de ouvintes e oradores treinados e a obtenção de informação reduzida do tipo de degradação do sinal.

Em relação à caracterização objetiva, segundo Hongisto, Keranen e Larm (2004), existem duas formas principais de se calcular a inteligibilidade da fala. A primeira é o método audiológico, descrito na norma ANSI S3.5 de 1997, que gera o índice de inteligibilidade da

fala (SII) ou o índice de articulação (AI). A segunda é o método de função de transferência de modulação (MTF), especificado na norma IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003), o qual gera o índice de transmissão da fala (STI). Segundo Bradley (2007), em condições acústicas mortas, com pouca reverberação, os valores de STI são similares aos valores de AI. Entretanto, quando existem significantes sons reverberantes, os valores de STI são sistematicamente reduzidos em relação aos valores de AI, indicando redução na inteligibilidade da fala.

Em publicação de French e Steinberg (1947) foi apresentada uma formulação de dados alcançados em estudos que expressa a inteligibilidade da fala. Esses estudos e essa formulação foram desenvolvidos nos “Bell Telephone Laboratories” ao longo de muitos anos. Segundo esses autores, a inteligibilidade dos sons da fala recebidos é relacionada a uma grandeza chamada índice de articulação (AI). O AI é uma fração ponderada que representa, para um dado canal da fala e condição de ruído, a porção efetiva do sinal da fala normal que está disponível a um ouvinte para transmissão da inteligibilidade da fala (KRYTER, 1962). Long (2006) apresenta a relação entre impressões subjetivas da privacidade e a inteligibilidade da fala e valores objetivos de AI.

Tabela 5. Relação entre a inteligibilidade e a privacidade da fala e o Índice de Articulação (AI).

Inteligibilidade/Privacidade	Índice de Articulação (AI)
Muito boa / Nenhuma	> 0,4
Boa / Pobre	0,3
Fraca / Fraca	0,2
Pobre / Normal	0,1
Muito pobre / Confidencial	< 0,05

Fonte: Long (2006, p. 544, tradução nossa)

O AI é computado através de medições acústicas ou estimativas, no ouvido de um espectador, do espectro da fala e do mascaramento efetivo de qualquer ruído que esteja presente (KRYTER, 1962). Segundo Steeneken e Houtgast (1980) o método do AI é particularmente apropriado para canais com distorções no domínio da frequência, como ruído de interferência e limite de passagem de banda, e não é aplicável quando estão envolvidas distorções não lineares (picos) ou distorções no tempo dominante (reverberação e ecos).

Segundo French e Steinberg (1947) o processo geral para computar o índice de articulação envolve a determinação de um valor de W para 20 bandas de frequência,

realizando a média desses valores. O valor W em cada frequência é a contribuição da melhoria na faixa de frequência da fala para o incremento do índice de articulação (FRENCH; STEINBERG, 1947). Qualquer incremento nessa faixa pode levar a um valor máximo do índice de articulação. Os autores complementam que o valor particular de W para qualquer banda de frequência da fala depende de uma grandeza chamada nível de sensação efetiva da banda de frequência no ouvido (E), a qual é simplesmente o nível de sensação da banda menos o mascaramento total. O nível de sensação de um som da fala em determinada frequência é a atenuação necessária para reduzir o som naquela frequência ao limite da audição na ausência de som e é determinado através da intensidade dos componentes da fala dentro da banda de frequência no ouvido e a acuidade da audição. O mascaramento total é a mudança no limiar devido à presença de ruído e é o resultado de três tipos de mascaramentos: a) mascaramento residual, devido aos componentes que precedem os sons da fala dentro da banda de frequência; b) mascaramento entre bandas, devido aos componentes da fala em bandas de frequência adjacentes; c) mascaramento devido aos componentes de ruído estranhos. O fator W é igual a $1/8$ de segundo do intervalo de tempo no qual a intensidade da fala na banda de frequência particular é suficientemente intensa para ser ouvida, ou seja, é a fração desse intervalo no qual a intensidade da fala na banda excede a intensidade que corresponde ao nível de sensação efetiva de 0 dB (FRENCH, STEINBERG, 1947).

Aproximadamente quinze anos após a publicação de FRENCH e STEINBERG (1947), KRYTER (1962) realizou uma publicação revisando o método desenvolvido por esses autores e sugerindo um novo método.

Segundo Kryter (1962) o AI pode ser calculado através de dois métodos:

- a) método das 20 bandas de oitava: esse método, desenvolvido por French e Steinberg (1947), é baseado na medição ou estimativa do nível em frequência da fala e do ruído presente em cada uma das 20 bandas de frequência que, em igual relação sinal-ruído, contribuem igualmente para a inteligibilidade da fala (KRYTER, 1962);
- b) método de banda de $1/3$ de oitava e de banda de oitava: esse método deriva do método de 20 bandas, mas requer medições ou estimativas da fala e do ruído presente em certas bandas de $1/3$ de oitava ou de 1 oitava. Segundo Kryter (1962), o método de banda de oitava não é tão sensível a variações na fala e no espectro de ruído quanto o método de 20 bandas ou de $1/3$ de oitava e, portanto, não é tão preciso. O método de banda de oitava não pode ser utilizado, por exemplo, em situações onde uma fração considerável da energia do ruído de mascaramento está concentrada em bandas de

freqüência com largura de uma oitava ou menor. Nessa condição, o método de 1/3 de oitava ou preferencialmente de 20 bandas deve ser utilizado (KRYTER, 1962).

Em estudo realizado por Kryter (1962), o método de banda de oitava, utilizando filtros com freqüências centrais indicadas pela Associação de Normas Americanas (American Standard for Preferred Frequencies for Acoustical Measurements, S1.6- 1960) mostrou-se, em relação aos outros métodos, o de menor precisão, provavelmente pelo número restrito de bandas de freqüência do ruído de mascaramento utilizado e pelo fato de serem empregadas apenas cinco bandas de freqüência na medição do espectro da fala.

Kryter (1962) afirma que os valores de AI devem sofrer algumas correções, pois testes de inteligibilidade da fala são influenciados por um grande número de situações de distorções e tensões impostas mediante o sinal da fala durante a sua transmissão. Esses fatores são: mascaramento por ruído constante, mascaramento por ruído variável, distorções na freqüência do sinal da fala, distorções na amplitude do sinal da fala, reverberação, esforço vocal, sinais visuais (lábios e expressões faciais). Kryter (1962) desenvolveu gráficos e tabelas para correções dos valores do AI conforme a variação desses fatores. Entretanto, apesar de realizar tais correções, Kryter (1962) afirma que nenhum valor único do AI pode ser especificado como critério de uma comunicação aceitável, pois a eficiência na comunicação é resultado da mensagem a ser transmitida e da proficiência dos oradores e ouvintes envolvidos. Assim, o nível do desempenho que deve ser requerido em um dado sistema é, com certeza, dependente dos fatores cujas importâncias podem ser avaliadas apenas pelos usuários do sistema de comunicação.

Houtgast e Steeneken (1973) sugerem que a relação entre o som da fala do orador (som de entrada) e o som percebido pelo ouvinte (som de saída) pode ser descrito por uma característica de filtro, efetivamente mediante o som emitido pelo orador. No caso de suavização do nível sonoro, o filtro é essencialmente em baixa freqüência. Essa característica, chamada Função de Transferência de Modulação (MTF), foi estudada por Houtgast e Steeneken (1973) para quantificar a inteligibilidade da fala em ambientes fechados, o resultado foi que os valores alcançados através da MTF possuem grande correlação com a avaliação através de testes subjetivos.

A MTF é um procedimento inicialmente utilizado para avaliar o desempenho de sistemas ópticos (HOUTGAST, STEENEKEN, 1985). A falta de nitidez é quantificada por uma medição de MTF com uma senóide espacial de padrões da luz modulada. A redução de profundidade de modulação como uma função da freqüência de modulação espacial tipicamente revela uma característica de baixa freqüência, refletindo a limitação do poder de

resolução do sistema de preservar os detalhes da figura original (HOUTGAST, STEENEKEN, 1985).

Segundo Houtgast e Steeneken (1985), quando a MTF é aplicada na transmissão do som em recintos, as análises podem ser realizadas por uma senóide temporária do sinal de teste modulado. A redução da profundidade de modulação como uma função da frequência de modulação constitui o MTF temporal.

Baseado nos estudos previamente realizados com a MTF, aplicada à acústica, e no método do AI, Steeneken e Houtgast (1980) apresentaram um método físico para a medição da qualidade dos canais de transmissão da fala. Essencialmente, o método representa uma extensão dos conceitos do índice de articulação (AI). O conceito inicial do estudo realizado por Houtgast e Steeneken (1973), baseado na Função de transferência de Modulação (MTF) de um canal de transmissão, foi adaptado para tornar possível identificar distorções não lineares (picos), assim como para distorções no tempo dominante (reverberação, ecos) (STEENEKEN; HOUTGAST, 1980). O índice resultante é o Índice de Transmissão da Fala (STI), o qual, quando comparado a resultados subjetivos apresentou desvio padrão de apenas 5%.

A norma IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003) define o STI como a “quantia física que representa a qualidade de transmissão do discurso em relação à inteligibilidade” (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003, p. 6, tradução nossa). A mesma norma caracteriza o STI como uma medida objetiva, baseada no peso da contribuição de um número de bandas de frequência dentro da faixa de frequência dos sinais da fala, sendo que essas contribuições são ajustadas pela relação sinal- ruído efetiva. Segundo Harris (1998), O STI é similar ao índice de articulação (AI), porém tem aplicação mais geral, pois considera os efeitos do tempo de reverberação e do ruído para determinação da inteligibilidade da fala. Kang (2002) complementa afirmando que uma característica importante do STI é que os efeitos da reverberação, do ruído ambiente e a contribuição da direção da fonte, que são normalmente tratados individualmente, são combinados de maneira natural em um índice único. Ronsse (2006) afirma que o STI é a medida objetiva mais eficiente para a determinação da inteligibilidade da fala, que ganhou popularidade com o advento das técnicas de medição de alta velocidade e de fácil portabilidade dos equipamentos de medição.

Segundo Steeneken e Houtgast (1980), a determinação do STI consiste em duas etapas:

- a) medição da Função Transferência de Modulação (MTF) para sete bandas de oitava;

b) cálculo do STI através das MTF's.

Para cada banda de oitava a degradação do sinal de teste é medida através da redução do índice de modulação para 14 frequências moduladas (STEENEKEN; HOUTGAST, 1980). O método do STI, descrito no anexo A da norma IEC 60268- 16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003), é baseado na determinação da função de transferência de modulação para 98 pontos de dados, obtidos para 14 frequências de modulação em intervalos de 1/3 de oitava de 0,63 Hz a 12,5 Hz e para sete bandas de oitava com frequência central entre 125 Hz e 8 kHz. Esse procedimento oferece uma medição seletiva da flutuação rítmica e de banda de oitava da relação sinal- ruído após a transmissão do ruído (STEENEKEN; HOUTGAST, 1980).

Após a medição da relação sinal- ruído nas sete bandas de oitava e modulações, o STI é calculado através de (STEENEKEN; HOUTGAST, 1980):

- a) cálculo do mascaramento sonoro introduzido por baixa frequência em relação às altas frequências adjacentes;
- b) cálculo da relação sinal-ruído efetiva para cada banda de oitava e para cada frequência de modulação;
- c) transformação dessas relações sinal- ruído em índices de transmissão (TI);
- d) cálculo de índices específicos em banda de oitava para cada oitava em uma faixa de frequência de modulação específica;
- e) cálculo do índice final, o qual é a média ponderada das Funções de Transferência de Modulação (MTF's) da contribuição de todas as sete bandas de oitava.

Existe uma simplificação do método STI, chamado RASTI, o qual possui um número reduzido de bandas de oitava no seu cálculo. A análise é restrita em apenas duas bandas de oitava com frequências centrais de 500 Hz e 2 kHz, e apenas 4 e 5 frequências de modulação respectivamente nessas bandas (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003). Segundo Houtgast e Steeneken (1985), medições obtidas através do método RASTI tiveram boa correlação a dados obtidos através de testes subjetivos de articulação em várias línguas.

Steeneken e Houtgast (2002) propuseram uma revisão do STI, a qual foi nomeada STI_r. Os melhoramentos incluem a aplicação de uma correção entre bandas de frequência adjacentes, a extensão para a fala feminina e a expansão para predição da inteligibilidade para grupos específicos de fonemas (STEENEKEN; HOUTGAST, 2002). Segundo esses autores, o STI revisado gera uma predição melhor da inteligibilidade da fala para condições com

transferência de frequência descontínua. Todas essas melhorias estão incluídas na norma IEC 60268- 16.

A norma IEC 60268- 16 relaciona parâmetros subjetivos da inteligibilidade da fala a valores objetivos alcançados através do método do STI. Essa correlação pode ser vista na tabela 6.

Tabela 6. Correlação subjetiva dos valores de STI.

Escala subjetiva	Valores de STI
Ruim	0,00-0,30
Fraco	0,30-0,45
Regular	0,45-0,60
Bom	0,60-0,75
Excelente	0,75-1,00

Fonte: IEC 60268- 16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003, p. 27, tradução nossa).

Ronsse (2006) obteve o STI em anfiteatros através de medições utilizando um programa computacional de acústica que gera e capta o som no recinto a ser analisado. Nesse estudo, primeiramente, a autora classificou subjetivamente as salas, através de observações das características arquitetônicas do local, como tendo boa, regular, pobre e muito pobre inteligibilidade da fala. Como resultado da comparação dos valores subjetivos a valores medidos de STI, Ronsse (2006) chegou aos seguintes resultados:

- a) os anfiteatros classificados como bom e regular não tiveram valores de STI diferenciados, variando de 0,64 a 0,75;
- b) os anfiteatros classificados subjetivamente como pobre tiveram STI aproximado de 0,55;
- c) o anfiteatro classificado como tendo inteligibilidade muito pobre teve STI de 0,44.

Para o caso específico de escritórios, considerando estações de trabalho adjacentes, Hongisto (2005) apresentou uma tabela que relaciona os valores de STI com a inteligibilidade e a privacidade da fala. Essa tabela apresenta exemplos de quando pode ocorrer tal STI em escritórios reais. Essa tabela está reproduzida a seguir.

Tabela 7. Sensação subjetiva e exemplo de ocorrência em escritórios, correlacionado a valores de STI entre estações de trabalho adjacentes.

Inteligibilidade / Privacidade / Exemplo em escritórios	STI
Muito ruim / Confidencial / Entre dois escritórios fechados, com grande isolamento entre eles.	0,00-0,05
Ruim / Boa / Entre dois escritórios fechados, com isolamento normal entre eles.	0,05-0,20
Fraco / Razoável / Entre estações de trabalho em um escritório panorâmico bastante ruidoso.	0,20-0,40
Regular / Fraca / Entre mesas em um escritório panorâmico bem projetado.	0,40-0,60
Bom / Muito fraca / Entre mesas em um escritório panorâmico razoavelmente projetado.	0,60-0,75
Excelente / Nenhuma / Entre mesas em um escritório panorâmico sem nenhum projeto acústico.	0,75-0,99

Fonte: Hongisto (2005, p. 459, tradução nossa)

2.2 Medição de Parâmetros Acústicos

O propósito de muitos dos estudos atuais na área de acústica arquitetônica é o desenvolvimento de métodos para avaliar, modelar, prever e simular parâmetros acústicos nos edifícios (CAVANAUGH; WILKES, 1999). Esses estudos permitem quantificar as características sonoras da sala para que seja projetada conscientemente, sendo a acústica considerada um elemento importante, contribuindo na experiência multi-sensorial da arquitetura.

Segundo Everest (2001), as medições sempre foram de grande importância para cientistas, pois elas permitem testar, em relação à realidade, pressupostos, teorias e equações. Como resultado, sempre se procurou por maneiras de melhorar a precisão das medições. Para o mesmo autor, a medição é o modo mais preciso para quantificar acusticamente salas. Atal et al. (1966) espera que, através da utilização de métodos para medição de parâmetros acústicos, seja possível um melhor entendimento das correlações entre as medições físicas e as qualidades subjetivas do ambiente.

Muitos profissionais da acústica estão familiarizados com os medidores de nível sonoro (EVEREST, 2001). Esses medidores são provavelmente um dos dispositivos de medição mais básicos e são úteis para uma variedade de tarefas nas quais os níveis de pressão

sonora devem ser medidos. O medidor de nível sonoro é um instrumento acústico fundamental que se tornou incrivelmente sofisticado, contendo freqüentemente processos internos que automatizam muitas das funções de medição (LONG, 2006). Os controles básicos permitem a seleção de ponderação no tempo: rápida, lenta e impulsiva; sendo que cada uma delas representa uma constante de tempo balístico diferente. Várias ponderações de freqüência são disponibilizadas: linear (sem ponderação), ponderação em A e ponderação em C. O comprimento de banda de freqüência pode ser selecionado como passagem total, banda de oitava e de terço de oitava (LONG, 2006).

Os medidores sonoros são classificados em três grupos diferentes conforme a sua precisão. Cada classe possui uma ligeira diferença de tolerância permitida em sua precisão. Essas tolerâncias e classes de medidores são definidas pela ANSI S1.4-1983 e estão listadas a seguir (LONG, 2006).

Tabela 8. Classe, utilização e tolerância de precisão dos medidores de nível sonoro.

Classe / Utilização	Tolerância de precisão
Classe 0 / Laboratórios	$\pm 0,2\text{dB}$ - 22,4 a 11200 Hz
Classe 1 / Medições de precisão	$\pm 0,5\text{dB}$ - 22,4 a 11200 Hz
Classe 2 / Usos gerais	$\pm 1,0\text{dB}$ - 22,4 a 11200 Hz

Fonte: Long (2006, p. 122, tradução nossa).

Apesar de sua grande sofisticação e de seus recursos, um medidor do nível sonoro não gera o indicador da qualidade do som tipicamente requerida na maioria das aplicações de áudio (EVEREST, 2001). A medição da qualidade sonora, no mínimo, requer também a medição da resposta em freqüência. Quando um grupo de filtros de freqüência opera simultaneamente e gera um conjunto de níveis em um gráfico de barras em tempo real, o medidor é chamado analisador espectral ou analisador em tempo real (LONG, 2006).

Outro requisito importante para a medição da qualidade sonora é a resposta no domínio do tempo (EVEREST, 2001). Essa é freqüentemente utilizada para medição do tempo de reverberação, inteligibilidade da fala, e outros fenômenos de domínio do tempo. Conforme Everest (2001), existe uma grande quantidade de instrumentos utilizados para a medição desse fator do som.

A resposta impulsiva pode ser utilizada para calcular todos os parâmetros lineares de um sistema. Isso inclui as várias formas de medição de resposta em freqüência e medições no domínio do tempo (EVEREST, 2001). Ela é bastante utilizada para caracterizar campos

acústicos tanto em modelos computacionais, modelos em escala e salas em tamanho real (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

A intensidade, conteúdo de frequência, tempo de chegada, direção do som direto e de todas as reflexões das superfícies arquitetônicas estão contidos na medição da resposta impulsiva (CAVANAUGH; WILKES, 1999). A contribuição do som direto e reflexões de cada uma das paredes, teto e outros elementos arquitetônicos está retratada nessa resposta. Assim, ela pode ser utilizada como base para a sugestão de abordagens arquitetônicas possíveis no projeto de uma sala ou para auxiliar na determinação das modificações que devem ser realizadas em uma sala existente.

Para Cavanaugh e Wilkes (1999), a resposta impulsiva é semelhante a um eletrocardiograma de um coração batendo, que o médico utiliza para avaliar a saúde de um paciente. Através da observação da amplitude relativa e periodicidade de uma seqüência de pulsos, o médico pode realizar diagnósticos e prescrever tratamentos para o paciente. Um consultor acústico pode observar uma resposta impulsiva e realizar diagnósticos sobre a “saúde acústica” do recinto e recomendar alterações de projeto. Assim, a resposta impulsiva auxilia no entendimento conceitual entre as qualidades acústicas percebidas e os elementos arquitetônicos de uma sala (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

Cavanaugh e Wilkes (1999) afirmam que a resposta impulsiva varia em cada assento de uma sala. Ela representa a única assinatura do som que chega de uma dada fonte a um ouvinte específico. Em uma sala grande, a resposta impulsiva irá variar significativamente conforme a localização, assim como ocorre com a percepção das qualidades acústicas.

Para a medição de diversos parâmetros acústicos é utilizada a curva de decaimento, a qual é definida pela norma ISO/DIS 3382-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006) como o decaimento do nível de pressão sonora em função do tempo em um ponto da sala após a fonte sonora ser cessada.

O gráfico 9 representa a obtenção dos parâmetros T_{20} e T_{30} a partir da curva de decaimento.

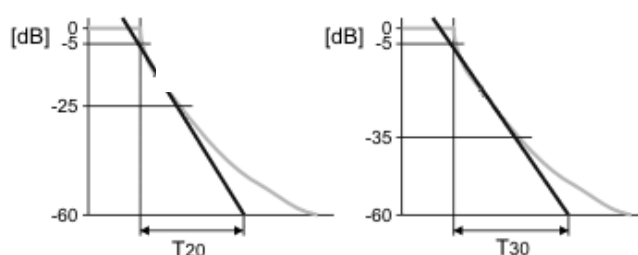


Gráfico 9. Obtenção de T_{20} e T_{30} a partir da curva de decaimento. Fonte: Instruction...(2003, p.).

Para a medição do T_{30} , o nível da fonte sonora deve ser no mínimo 45 dB acima do nível do ruído de fundo na banda de frequência correspondente. Se apenas T_{20} for medido, é suficiente criar um nível no mínimo 35 dB acima do ruído de fundo (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006).

O método de decaimento do ruído é realizado através da excitação de uma sala através de um ruído randômico por alguns segundos, então, é observado o decaimento do som registrado em um nível gravado (CHU, 1978). Esse método possui limitações na aplicação de acústica de salas, pois a natureza do decaimento é freqüentemente obscura pelas flutuações randômicas nas curvas de decaimento.

Em 1965, Schroeder apresentou um novo método para a medição do tempo de reverberação. Esse método utilizou um estouro ou um tiro de pistola para excitar a sala (SCHROEDER, 1965a). Segundo Atal et al. (1966), já que a resposta impulsiva entre dois pontos em um recinto contém todas as informações sobre as características de transmissão sonora entre esses pontos, pequenos impulsos podem ser utilizados como sinal de teste para medições acústicas em uma edificação.

Nesse método, chamado método de integração do ruído impulsivo, uma única medição resulta em uma curva de decaimento que é idêntica a uma média de infinitas curvas de decaimento obtidas com a excitação da sala através do ruído com filtro de passagem de banda, ou seja, método de decaimento do ruído, utilizado até então (SCHROEDER, 1965a).

Schroeder (1965b) afirma que as curvas de decaimento resultantes desse novo método aumentam a precisão das medições de T_r e facilitam a observação de decaimentos não-exponenciais.

Sumariamente, o método de integração do ruído impulsivo é composto por ruídos impulsivos com espectro que cubra as bandas de frequência desejadas, emitidos em um recinto através de um alto-falante (SCHROEDER, 1965a). A resposta desse recinto a cada ruído impulsivo é capturada por um microfone, sendo a gravação dos dados realizada em uma fita magnética. A gravação da fita é tocada em tempo reverso. O sinal de saída da gravação é elevado ao quadrado e integrado através de uma rede de integração (SCHROEDER, 1965a).

A principal vantagem do método de integração impulsiva é que uma única medição é equivalente a um conjunto de médias de curvas de decaimento, se utilizado o método de decaimento do ruído (CHU, 1978). Uma diferença importante entre as curvas de decaimento obtidas através do método de decaimento do ruído e do método de integração do ruído impulsivo é que as flutuações irrelevantes causadas pela aleatoriedade do sinal de ruído de excitação são excluídas no método de integração do ruído impulsivo (SCHROEDER, 1965b).

A curva de decaimento resultante desse método revela a precisão da medição do tempo de reverberação e possibilita a detecção de decaimentos não- exponenciais (CHU, 1978). Assim, o método é particularmente adequado para a avaliação da acústica de salas. Com esse método é possível observar diferenças em relação à posição de fonte e receptor na sala.

Entretanto, Atal et al. (1966) afirmam que existem dificuldades práticas na medição da resposta de um recinto a pulsos de duração muito curta. Pela limitação de potência dos picos, um alto-falante pode emitir apenas pouca energia durante pequenos pulsos. Assim, Chu (1978) comenta que, como em qualquer técnica impulsiva, o método de integração do ruído impulsivo exige requisitos rigorosos na instrumentação para provimento de uma faixa dinâmica razoavelmente boa. É importante igualar a duração do impulso à banda de frequência a ser analisada. A duração do impulso deve ser menor que o período da frequência central do filtro de passagem de banda para produzir uma resposta impulsiva verdadeira do filtro para o sinal de condução. Entretanto, o sinal não pode ser muito curto, senão a sua força será insuficiente, resultando em uma redução da relação sinal-ruído (CHU, 1978). Segundo Schroeder (1979), um problema do método de integração do impulso para medição do decaimento sonoro, e de outros métodos de teste impulsivo, é a necessidade de se emitir um impulso suficientemente potente com espectro plano. Faíscas elétricas, estouros de balões e pistolas e tiros de canhão, apesar de fontes sonoras potentes, não possuem espectro suficientemente plano para algumas aplicações. Alto-falantes, entretanto, normalmente não emitem potência suficiente para alcançar a relação sinal-ruído necessária (SCHROEDER, 1979).

Segundo Atal et al. (1966) esses problemas podem ser superados restringindo as frequências nas medições. Isso é realizado medindo a resposta do recinto a sons impulsivos com espectro de banda restrita contínuo. Esse procedimento possui outra vantagem: geralmente é necessário determinar as propriedades acústicas diversas do recinto em função da frequência, com sons impulsivos com espectro de banda restrito isso ocorre automaticamente (ATAL et al., 1966).

Para suprir o problema de reduzida relação sinal-ruído, existente no método de Schroeder, Chu apresenta um novo método. Esse foi nomeado método da média da curva de decaimento e implica em tomar um conjunto de número finito de curvas de decaimento de uma fonte e receptores fixos e realizar a média dessas curvas (CHU, 1978). Por utilizar um sinal randômico contínuo com comprimento de banda de 1/3 de oitava, o método da média da curva de decaimento produz melhor faixa dinâmica para curvas de decaimento que o método

de integração do impulso. Pelo fato de, na média, desconsiderar flutuações randômicas, não afetando as características gerais da curva de decaimento, o método pode ser utilizado para a avaliação acústica de salas, com a desvantagem de ser gasto um tempo de teste maior (CHU, 1978).

Estudos mostraram que tanto o método de integração do impulso como o método da média da curva de decaimento são precisos e superiores ao método de decaimento do ruído. Os dois primeiros métodos são complementares, sendo o primeiro mais adequado para investigar as variações espaciais na sala e o segundo, aconselhável para a normalização de testes de ruído, já que utiliza um sinal contínuo (CHU, 1978).

A fim de suprir a deficiência gerada pela utilização do impulso na medição utilizando o método de integração do ruído impulsivo, Schroeder sugeriu a utilização de ruído pseudo-randômico como sinal de excitação. Segundo a norma ISO/DIS 3382-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006), a utilização desse tipo de ruído em medições da resposta impulsiva aumenta a relação sinal-ruído durante a medição. Entretanto, o uso de ruído pseudo-randômico, em substituição a um único impulso, necessita de processamento digital para recuperar a resposta do impulso único (SCHROEDER, 1979). Então, Schroeder (1979) testou as seqüências de máximo comprimento (MLS).

Para a norma ISO/DIS 3382-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006) a utilização de um período de sinal do tipo seqüência de comprimento máximo (MLS), ou outro sinal de espectro contínuo determinado, transformando a resposta de retorno da medição em uma resposta impulsiva, é uma técnica de medição alternativa à utilização de ruídos impulsivos.

Schroeder (1979) define MLS como seqüências periódicas de integrais. A técnica MLS foi desenvolvida nos anos de 1980 e foi considerada por muitos pesquisadores como sendo um método avançado para medição de acústica de salas. Segundo Everest (2001), as medições MLS utilizam uma seqüência binária pseudo-randômica para excitar um sistema e/ou uma sala com um sinal de teste. O espectro de freqüência do MLS é semelhante ao do ruído branco, enquanto a função de auto-correlação é aproximadamente uma série de pulsos Dirac (VOLÄNDER; KOB, 1997).

Para Schroeder (1979), as propriedades principais da MLS são aquelas alcançadas através de uma Transformação de Fourier: o sinal gerado possui mesma magnitude em todos os componentes de freqüência. Assim, seu espectro é igual ao do impulso, denominado independente de freqüência. Então, faz-se necessário apenas correlacionar a resposta do sistema com a mesma MLS que foi utilizada para excitá-lo, a fim de obter a resposta

impulsiva desejada. Essa operação é também referenciada na literatura de processamento do sinal como deconvolução (SCHROEDER, 1979).

As capacidades de rejeição ao ruído da técnica MLS são tais que o ruído de excitação pode ser emitido em nível baixo mantendo uma boa relação sinal-ruído e a precisão da medição (EVEREST, 2001). Voländer e Kob (1997) afirmam que os benefícios da técnica MLS, interpretada basicamente como uma técnica de medição do impulso sem a utilização desse, combina as vantagens teóricas da resposta impulsiva utilizada em acústica de salas com o notável ganho da precisão e confiabilidade das medições e testes. Com isso, o problema de reduzida relação sinal-ruído discutida por Chu (1978), quando utilizado impulsos como sinal de teste, está aparentemente resolvido com a utilização do sinal MLS para excitação da sala em medições acústica de recintos (SCHROEDER, 1979).

A técnica MLS é utilizada em várias medições acústicas pela rapidez e precisão da determinação de banda larga (VOLÄNDER; KOB, 1997). Muitas companhias utilizaram as capacidades de medição de técnica MLS para a criação de software que são utilizados para transformar um computador multimídia em um sistema de medição eletroacústica (EVEREST, 2001). Para Voländer e Kob (1970), as limitações da técnica MLS, na prática, são causadas por não-linearidades e variação no tempo do sistema em teste.

Segundo Farina (2000), para a medição da resposta impulsiva, as técnicas mais empregadas são a MLS (Seqüência de Máximo Comprimento) e a TDS (Espectrometria de Atraso do Tempo). No final dos anos de 1960, Richard C. Heyser desenvolveu um método de medição conhecido como espectrometria de atraso do tempo (TDS) (EVEREST, 2001). Esse método é utilizado para isolar medições, até mesmo em um ambiente reverberante. Long (2006) comenta que o TDS foi desenvolvido para medir a curva de resposta espectral de um alto-falante.

O princípio operacional básico do TDS consiste de um sinal de excitação de varredura com frequência variável e um receptor com ajuste de varredura sincronizado àquele sinal (EVEREST, 2001). Esse sinal possui um espectro branco, apresentando maior energia na região aguda (MASIERO; IAZZETTA, 2005). Segundo Long (2006), a técnica TDS é baseada no fato de que quando uma fonte emite um sinal ele irá chegar ao microfone receptor após certo tempo. Todas as reflexões associadas com o som original chegam com algum tempo de atraso, uma vez que viajam através de caminhos diferentes. Se a medição for realizada durante um tempo restrito centralizado no tempo de chegada do som direto, os sons posteriores são excluídos e um resultado anecóico recente é obtido. Isso é realizado para converter o atraso do tempo em mudança de frequência (LONG, 2006).

A técnica TDS tem duas grandes vantagens:

- a) o processamento posterior permite rejeitar harmônicos indesejáveis da medição, tornando a precisão da medição menos dependente do sistema de linearidade. Dispositivos que adicionem grande componente de distorção podem ser medidos através da resposta em frequência;
- b) O sinal de varredura pode ser utilizado por longa duração de tempo, injetando energia suficiente na sala.

Esses dois itens resultam no aumento da relação sinal-ruído na medição (EVEREST, 2001). Entretanto, o sistema TDS tem uma grande desvantagem: a necessidade da alteração do tempo de resolução desejado a cada medição. Se for desejado obter a medição anterior com outra janela temporal, outra medição deve ser realizada utilizando uma taxa de varredura diferenciada (EVEREST, 2001).

Os métodos TDS e MLS são baseados na suposição de linearidade perfeita e invariância no tempo do sistema. Esses métodos resultam em imprecisões quando essas suposições não são encontradas. Farina (2000) comenta que a técnica MLS é mais delicada, pois é intolerante a não-linearidades ou variações no tempo.

Assim, Farina (2000) emprega uma nova técnica com o objetivo de superar as limitações da MLS através de características da TDS. A TDS utiliza como sinal uma varredura linear de frequência, esse sinal possui um espectro branco, apresentando maior energia na região aguda e podendo causar uma relação sinal-ruído reduzida nas baixas frequências (MASIERO; IAZZETTA, 2005). O método de seqüência de máximo comprimento (MLS) utiliza uma seqüência aleatória, fornecendo assim uma melhor relação sinal-ruído. Esse método é bastante vulnerável a não-linearidades do meio, sendo seu uso inadequado em medições de grandes espaços abertos. Assim como a TDS, a MLS possui um espectro branco. A nova técnica, método de varredura logarítmica, é semelhante ao MLS, entretanto utiliza como sinal de excitação uma varredura logarítmica, a qual possui um espectro rosa, com boa distribuição da energia (MASIERO; IAZZETTA, 2005).

Nos últimos seis anos, vários grupos de pesquisa e consultores profissionais começaram a utilizar varreduras logarítmicas para medição de parâmetros acústicos (FARINA, 2007). Empregando um sinal sinusoidal com variação exponencial da frequência, sinal de varredura logarítmica, é possível deconvolucionar simultaneamente a resposta impulsiva linear do sistema e separar as respostas impulsivas para cada ordem de distorção harmônica (FARINA, 2000). Na prática, após a deconvolução da resposta, surge uma seqüência de respostas impulsivas claramente separadas ao longo do eixo do tempo. Pela

Transformação de Forier analisando cada uma delas, pode ser obtida a resposta de frequência linear e o espectro correspondente de distorções (FARINA, 2000).

Assim, quando é utilizado o sinal de varredura logarítmica, é possível isolar a resposta impulsiva das componentes existentes no sinal causadas por não-linearidades (MASIERO; IAZZETTA, 2005). Por isso, e por apresentar boa distribuição da energia também nas baixas frequências, a técnica de medição acústica que utiliza como sinal de excitação a varredura logarítmica apresenta bons resultados no que diz respeito ao aumento da relação sinal-ruído (PAULO, MARTINS, COELHO, 2005).

Como resultado de medições em edifícios, Farina (2000) observou que a técnica de varredura logarítmica produziu estimativas robustas da resposta impulsiva do sistema, sem artefatos resultantes de não-linearidades, e com uma faixa dinâmica aproximadamente 20 dB melhor que a técnica MLS. Masiero e Iazzetta (2005) verificaram que o método de excitação por varredura logarítmica com deconvolução via Transformação de Forier (FFT), nomeado método FFT de varredura logarítmica (LSF), é o método mais indicado para medições acústicas em salas atualmente.

Apesar das vantagens significantes do método de varredura logarítmica sobre todos os métodos precedentes, alguns problemas ainda podem ser encontrados, listados e descritos por Farina (2007). Se o ruído de fundo no local da medição for muito elevado, os resultados das análises acústicas utilizando o método da varredura logarítmica podem ser comprometidos, mesmo decorrendo a técnicas que utilizam médias temporais. Paulo, Martins e Coelho (2005) propõem um método baseado na varredura logarítmica, chamado segmentação híbrida da varredura logarítmica, o qual gera maior relação sinal-ruído nas medições e conseqüentemente menores erros. O método consiste em dividir cada emissão acústica em segmentos, analisar cada segmento por banda de frequência através da aplicação de um banco de filtros, ou seja, é realizada uma análise detalhada da energia no domínio do tempo e da frequência.

Em estudos realizados por Katz (2004), as variações dos valores de T_r obtidos através de medições acústicas utilizando o método de integração da resposta impulsiva foram de 2% a 4% para a frequência de 1000 Hz. Considerando os dados nas demais frequências, essa variação chegou a 14 %. Essa variação dos valores de T_r é devido ao ruído de fundo presente nas medições. Em baixas frequências o ruído de fundo provoca maior interferência nas medições, gerando maiores imprecisões.

Finalmente, Farina (2007) conclui que qualquer esquema de medição da resposta impulsiva pode ser utilizado com confiança apenas após uma série de testes preliminares e

ajustes. Sem isso, os resultados tendem a ser no mínimo suspeitos e erros devem ser encontrados nos testes experimentais.

Viveiros (1995) comenta que, apesar de teoricamente as medições impulsivas serem bastante elaboradas, a utilização de equipamentos digitais de aquisição e análise dos dados e a redução do custo desses equipamentos impulsionou o desenvolvimento de pesquisas através de medições acústicas. Atal et al. (1966) afirmam que, utilizando um computador digital para análises acústicas de edificações, é possível combinar a geração do sinal, a avaliação acústica dos dados e apresentar os resultados através de um método geral. O computador digital foi introduzido como ferramenta para avaliações acústicas na segunda metade dos anos 50 (SCHROEDER, 1969). Para Atal et al. (1966) o método computacional, em conjunto com equipamentos de gravação e de reprodução adequados, permite medições precisas e com reprodutibilidade das características de transmissão sonora do ambiente.

Segundo a norma ISO/DIS 3382-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006), para a medição do T_r , os equipamentos devem seguir os requisitos para medidor de nível de pressão sonora do tipo 1 de acordo com a IEC 61672-1. Os filtros de oitava ou 1/3 de oitava devem estar conforme IEC 61260. Nessas medições, a fonte deve ser o mais próximo de onidirecional e deve produzir a curva de decaimento com a escala dinâmica mínima requerida sem contaminação pelo ruído de fundo (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006). Embora a fonte onidirecional não corresponda ao padrão de diretividade das fontes sonoras reais, como instrumentos musicais ou a boca humana, a utilização de uma fonte onidirecional evita efeitos adversos da sala, como pode ocorrer se utilizada uma fonte direcional. Esses efeitos são: energização anormal e ecos e focalização para orientações selecionadas a fonte (FARINA; TRONCHIN, 2004). Uma fonte sonora dodecaédrica pode ser utilizada para representar uma fonte onidirecional (CAVANAUGH; WILKES, 1999).

A posição da fonte na medição deve ser a mesma das fontes sonoras naturais (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006). Um mínimo de duas posições de fonte deve ser utilizado. A altura do centro acústico da fonte deve ser 1,5 m acima do chão. As posições de microfone devem estar nas posições representativas dos ouvintes. Para a medição do tempo de reverberação é importante que as posições de medição representem todo o espaço. Em salas para fala e música a altura do microfone acima do chão deve ser de 1,20m, correspondendo à altura média da orelha de ouvintes em cadeiras típicas (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006).

Os resultados medidos de T_r para um número de posições de fonte e microfone podem ser combinados tanto para áreas identificadas separadas, como para a sala como um todo, resultando em valores de média espacial (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006). Essa média espacial deve ser alcançada através de uma média aritmética dos tempos de reverberação. A média espacial é dada tomando a média dos tempos de reverberação individuais para todas as posições de microfone. O desvio padrão deve ser determinado para gerar uma medição precisa e determinar a variação espacial do tempo de reverberação. Para utilização de médias espaciais únicas do tempo de reverberação, alguns critérios devem ser observados (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006). Deve-se verificar se os materiais das superfícies são, em termos das suas propriedades de absorção e difusão, uniformemente distribuídos na sala. Além disso, deve-se observar se todas as partes do volume da sala se comunicam razoavelmente bem.

Para a medição do STI, a norma IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003) especifica que um sinal de teste deve ser transmitido por uma fonte sonora situada na posição do orador para um microfone posicionado no local do ouvinte. Para a fonte sonora, as características importantes são o tamanho físico, a direção, a posição e o nível de pressão sonora. Conforme a norma IEC 60268-16, pelo STI depender fortemente da directividade da fonte, um simulador da boca, que tem características de directividade semelhantes à boca ou à cabeça humana, deve ser utilizado como fonte sonora para uma maior precisão. Müller (2007) concorda comentando que se for utilizado um alto-falante com características distintas às de um simulador da boca, os níveis de reflexões que chegam ao receptor serão irrealistas. Para San Martín et al. (2007), a directividade da fonte provoca influência significativa nos resultados obtidos para parâmetros derivados da resposta impulsiva, especialmente nas altas frequências. Bozzoli, Viktorovitch e Farina (2005) afirmam que a forma do balão de directividade da fonte sonora é importante para a determinação de valores corretos e comparáveis de STI. Algumas vezes, bocas artificiais diferentes resultam em valores distintos de STI em situações idênticas. Quanto maior a proximidade entre orador e ouvinte, maior será a influência da directividade da fonte nos valores de STI. Em estudos realizados por Bozzoli, Viktorovitch e Farina (2005), a boca artificial produzida pela empresa Brüel e Kjaer apresentou bons resultados de directividade quando comparada à boca humana.

Na obtenção do STI, para a determinação representativa da relação sinal-ruído, a intensidade média do sinal de teste deve ser equivalente ao nível da fala normal

(INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003). O espectro do sinal de teste é especificado por banda de oitava e níveis médios. Os níveis em banda de oitava são normalizados para um nível ponderado em A de 0 dB. Para a fala masculina, 7 bandas de oitava e para a feminina, 6 bandas de oitava são incluídas no sinal de teste (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003).

Tabela 9. Ponderação do nível de pressão sonora por frequência, em banda de oitava, para voz masculina e feminina.

Voz Humana	Nível de Pressão Sonora (dB)						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
Masculino	2,9	2,9	-0,8	-6,8	-12,8	-18,8	-24,8
Feminino	-	5,3	-1,9	-9,1	-15,8	-16,7	-18,0

Fonte: IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003, p. 23, tradução nossa)

Segundo a norma IEC 60268- 16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003), antes de se iniciarem as medições do STI, o nível sonoro deve ser calibrado em 65 dB(A) a uma distância de um metro da fonte. Além disso, os níveis sonoros do sinal utilizado, em todas as frequências de 125 a 8000 Hz, devem ser ajustados para que as diferenças entre eles sejam inferiores a ± 1 dB. Após a medição do STI, para simular o ruído provocado pela presença de pessoas, o nível sonoro com a mesma distribuição espectral daquele ruído de ocupação do local, medido ou predito, deve ser mixado ao sinal gravado (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003). Com isso, a medição resultante terá relação sinal-ruído real do ambiente ocupado.

Para a medição do STI, os métodos mais utilizados são o método de Modulação do Ruído e o método de Resposta Impulsiva (INSTRUCTION..., 2003). O método de Modulação do Ruído é um método direto. Nesse, uma fonte produz um sinal de excitação básico composto de 7 (125 a 8000Hz em banda de oitava) por 14 (0,63 a 1,25Hz em banda de 1/3 de oitava) frequências centrais, resultando em 98 sinais sonoros somados, filtrados e 100% modulados. Um receptor captura o sinal na posição do ouvinte e é medida a redução da modulação, MTF, para cada banda de oitava e modulação de frequência. Nesse método, a fonte e o receptor são independentes e separados, o que é vantajoso para longas distâncias medidas (INSTRUCTION..., 2003). Entretanto, devido ao método do sinal de excitação utilizado, leva-se longo período para se obter resultados durante a medição, aproximadamente trinta segundos. Durante esse tempo, o ruído de fundo pode variar e o receptor pode

interpretar erroneamente essa mudança como sinal de modulação e estimar a inteligibilidade da voz em valores baixos da relação sinal- ruído. Se utilizado o método de resposta impulsiva, a medição levará menos tempo que a medição pelo método anterior, aproximadamente cinco segundos (INSTRUCTION..., 2003).

2.3 Simulação de Parâmetros Acústicos

O desenvolvimento de pequenos computadores no início do século 20 tornou possível a criação de modelos matemáticos de espaços acústicos e a reprodução sonora de uma sala antes da sua construção (LONG, 2006). Segundo Schroeder (1969), na acústica arquitetônica as simulações baseadas em “acústica geométrica” desempenhavam até então um papel importante ao longo dos anos. Assim, a precisão oferecida pelos computadores digitais gerou um estímulo à importância do fenômeno da reverberação em recintos.

As simulações podem ser utilizadas para a avaliação acústica do projeto de novos edifícios antes de sua construção. Se a simulação apontar qualidade acústica insatisfatória, o projeto pode ser alterado até se alcançar as condições acústicas desejáveis (SCHROEDER, 1969).

No início e meados do século 19, modelos de sala em escala tridimensional eram utilizados para prever as condições acústicas (LONG, 2006). Com o advento de grandes computadores digitais, as técnicas clássicas com modelos em escala utilizando raios de luz e ondas ultra-sônicas foram substituídas por simulações digitais das condições acústicas dos recintos (SCHROEDER, 1969). Os computadores se tornaram tão potentes que modelos matemáticos de espaços tridimensionais se tornaram possíveis (LONG, 2006). Para isso, uma metodologia usual é a criação de um modelo em superfícies de um espaço fechado utilizando polígonos ou outras superfícies de fácil representação. Uma malha de polígonos contínuos é formada e cada um deles é descrito por uma lista de vértices, conectados por arestas. Uma superfície é caracterizada por suas arestas, vértices, angulação e as propriedades dos materiais, como coeficientes de absorção e difusão sonora (LONG, 2006). Para Rindel (2000), os modelos computacionais acústicos possuem diversas vantagens, comparados aos modelos em escala. Assim, se tornaram uma ferramenta de projeto confiável e eficiente para consultores acústicos.

Softwares de simulação acústica têm crescentemente substituído o uso de modelos em escala no planejamento e melhoramento da acústica em recintos (BORK, 2000, 2005a). Rindel (2000) afirma que um modelo computacional é muito mais flexível que um modelo em escala. No modelo computacional, existe grande facilidade em se modificar a sua geometria e os materiais das superfícies podem ser alterados modificando os coeficientes de absorção.

A maior vantagem dos modelos computacionais perante os modelos em escala é que naqueles os resultados podem ser visualizados e analisados mais detalhadamente, pois um modelo computacional contém mais informações que um conjunto de medições realizadas em um modelo em escala com pequenos microfones (RINDEL, 2000).

Em acústica, assim como em outras áreas da física, uma questão comum é quando um fenômeno deve ser descrito por partículas e quando deve ser descrito por ondas. Um modelo de onda para a propagação sonora equivale a métodos mais ou menos eficientes para resolver a equação da onda, como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC) (RINDEL, 2000). Modelos de onda são caracterizados pela obtenção de resultados muito precisos em frequência única, de fato muito precisos para serem utilizados em ambientes arquitetônicos, onde os resultados em bandas de oitava são normalmente preferíveis (RINDEL, 2000). Além disso, a predição através da técnica de elemento finito resulta em substancial tempo de computação (VAN DER VOORDEN et al., 1999).

Segundo Brooks (2003), o MEF e o MEC só podem ser utilizados se os elementos forem pequenos comparados ao comprimento de onda do som estudado, ou seja, no uso prático, são tipicamente restritos para baixas frequências e recintos pequenos (RINDEL, 2000). Assim, esses métodos são utilizados na análise do interior de dutos e de carros, não sendo utilizados na avaliação de grandes espaços, como no interior de edificações (BROOKS, 2003).

Outra possibilidade, além do modelo de onda, é descrever a propagação sonora a partir de partículas movendo-se ao longo de raios sonoros (RINDEL, 2000). Para a simulação em grandes recintos existem dois métodos geométricos clássicos, nomeados método de traçado de raios e método de imagem da fonte. Para os dois métodos, o maior problema é que o comprimento de onda ou a frequência do som não estão inclusos no modelo. Uma forma de introduzir a natureza da onda sonora nos modelos geométricos é através da atribuição de um coeficiente de espalhamento para cada superfície da sala. Dessa forma, a reflexão de uma superfície pode ser modificada de um ambiente puramente especular a um ambiente mais ou menos difuso. Isso se mostrou essencial para o desenvolvimento de modelos computacionais com resultados confiáveis (RINDEL, 2000).

Na simulação por traçado de raios, do inglês “ray tracing”, simula-se a emissão de raios por uma fonte (LONG, 2006). Esse método segue o caminho das partículas sonoras, ou raios, que são emitidas pela posição da fonte (BRADLEY; WANG, 2007). A energia acústica emitida por essa fonte pontual é considerada composta por uma grande quantidade de energia, ou pulsos, concentrada ao longo dos raios em todas as direções possíveis (VAN DER VOORDEN et al., 1999; RINDEL, 2000). Uma vez que um número finito de raios é emitido, cada raio, na verdade, representa um feixe de energia cônico ou piramidal, radiado da fonte (LONG, 2006). Toda vez que um raio se choca com uma superfície da sala, a energia contida nos pulsos é reduzida (VAN DER VOORDEN et al., 1999). Além disso, quando uma partícula encontra uma superfície, ela é refletida, adotando outra direção de propagação, por exemplo, de acordo com a lei de Snell, conhecida da óptica, dita reflexão especular (RINDEL, 2000). Assim, cálculos da reflexão sonora são realizados com base no ponto de impacto, utilizando o ângulo de encontro, a área e as propriedades do material da superfície (LONG, 2006).

O resultado de um programa de traçado de raios inclui a resposta impulsiva da sala em um receptor, da qual podem ser calculados diversos parâmetros acústicos (LONG, 2006). Quando ocorre o encontro do raio com um receptor, é armazenado o tempo de chegada, a direção e a amplitude do raio em função da frequência. O ângulo de incidência e a amplitude de cada raio permitem uma reprodução precisa do comportamento do som no espaço (LONG, 2006).

O outro método, método de imagem da fonte, pode ser aplicado para vários fins, como para a derivação de equações do tempo de reverberação, para o estudo teórico do ambiente acústico de recintos e para o estudo da acústica arquitetônica e as propriedades de percepção nas salas (ALLEN; BERKLEY, 1979).

O método de imagem da fonte é baseado no princípio que uma reflexão especular pode ser construída geometricamente pelo espelhamento da fonte no plano da superfície de reflexão (RINDEL, 2000). Ou seja, no método de imagem da fonte, cada superfície do modelo é tratada como um espelho pelo qual a fonte é refletida para criar uma fonte virtual (BRADLEY; WANG, 2007). Esse método utiliza a imagem espalhada da fonte como o ponto de origem para um novo raio, traçado no ponto de interseção da superfície (LONG, 2006). Imagens de imagens são traçadas até que a quantidade de reflexões desejada seja alcançada.

A construção do modelo por esse método é simples para uma sala retangular, entretanto se torna mais complicada se a forma da sala for complexa (LONG, 2006), assim, é utilizado para salas retangulares simples ou nos casos onde um pequeno número de reflexões

seja suficiente (RINDEL, 2000). Esse método é relativamente preciso desde que nenhuma superfície seja esquecida, mas o número de cálculos necessários é muito grande.

Os dois métodos, traçado de raios e imagem da fonte, podem ser utilizados combinados, referenciado como método híbrido, tendo vantagens em relação aos métodos individuais (BRADLEY; WANG, 2007). Rindel (2000) afirma que métodos híbridos combinam as melhores características dos métodos de imagem da fonte e de traçado de raios e possuem uma redução significativa no tempo de cálculo. Quando comparados diversos métodos de simulações computacionais, foi encontrado que programas que utilizam método híbrido produzem os melhores resultados (BRADLEY; WANG, 2007).

Para Rindel (2000), o princípio desse método é que uma forma eficiente de encontrar imagens de fontes com grande possibilidade de serem válidas é traçando raios da fonte e verificar as superfícies nas quais se chocam. As seqüências de reflexões geradas são testadas de forma a verificar os resultados em uma posição de receptor escolhida. Esse é chamado teste de visibilidade e é alcançado através de um traçado de retorno do receptor em direção à fonte (RINDEL, 2000).

Os modelos híbridos dividem o tempo de decaimento do som de uma sala em um período inicial, que as reflexões individuais são computadas, e um período tardio, que apenas a cauda reverberante estática permanece (LONG, 2006). Essa divisão pode ser baseada na seleção pelo usuário do programa computacional da taxa de reflexão, após as reflexões se tornarem difusas, ou na utilização de coeficientes de difusão, ou em ambos. Em uma reflexão difusa, a superfície de impacto se transforma em uma nova fonte, em vez de um refletor do som. A intensidade de som espalhado é baseada em um padrão de diretividade adotado (LONG, 2006). Utilizando números randômicos, a direção de uma reflexão difusa é calculada através de uma função de probabilidade de acordo com a lei do cosseno de Lambert, enquanto a direção de uma reflexão especular é calculada através da lei de Snell (RINDEL, 2000). Um coeficiente de espalhamento entre 0 e 1 é então utilizado como um fator de ponderação das coordenadas dos dois vetores direcionais, que corresponde a uma reflexão difusa ou especular. Isso simplifica os requisitos de cálculo e reduz o tempo de processamento, mas causa a perda de reflexões múltiplas (LONG, 2006).

Uma resposta impulsiva do espaço é simulada através do modelo para posições de receptores específicas, características de fonte sonora e parâmetros arquitetônicos do ambiente (BRADLEY; WANG, 2007). Os parâmetros acústicos são então calculados através da integração da curva de decaimento utilizando a soma da energia (RINDEL; CHRISTENSEN, 2003).

A transição ótima entre as reflexões difusas e especulares, em um primeiro momento, parece ser alcançada através de um maior número de reflexões (LONG, 2006). Entretanto, não é isso que ocorre. A probabilidade de uma imagem ser visível por um receptor é proporcional ao tamanho da superfície. Em um grande número de reflexões, ocorre um maior número de imagens perdidas e, com isso, ocorre um decréscimo da precisão do programa de simulação. À medida que o número de reflexões aumenta, aumenta o raio do cone ou da área do feixe da superfície de reflexão, isso superestima a contribuição de energia especular (LONG, 2006).

Para uma imagem da fonte ser obtida, é necessário no mínimo um raio para seguir a seqüência que a define (RINDEL, 2000). Um número finito de raios utilizado aponta o limite da utilização do reflectograma com precisão. Após isso, algum outro método deve ser utilizado para gerar a cauda reverberante. Um método que se mostrou eficiente é o método da fonte secundária utilizado pelo programa computacional Odeon. Em um cálculo completo, as últimas reflexões iniciais, de uma imagem da fonte, irão chegar tipicamente após a primeira reflexão tardia, de uma fonte secundária, assim, existirá um intervalo de tempo em que os dois métodos irão se sobrepor (RINDEL, 2000).

Na versão atual do Odeon, versão 9.0, o espalhamento do som para reflexões iniciais é também considerado (RINDEL; CHRISTENSEN, 2003).

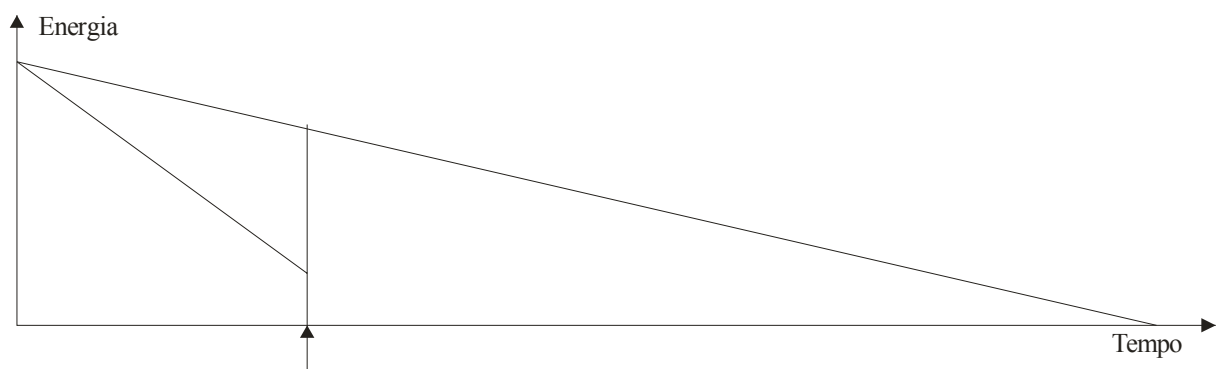
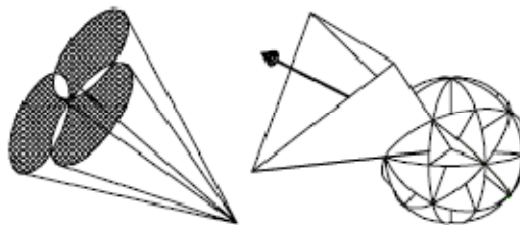


Gráfico 10. Síntese do método de cálculo híbrido utilizado pelo software Odeon. Fonte: Rindel e Christensen (2003, p. 2, tradução nossa)

O gráfico 10 sintetiza o método de cálculo híbrido utilizado pelo software Odeon. Reflexões recentes antes da seleção da ordem de transição (TO), representada no gráfico pela flecha no eixo das abscissas, são calculadas utilizando uma combinação do método de imagem da fonte e raios espalhados iniciais. Após a TO, as reflexões são calculadas utilizando o método de traçado de raios, o qual inclui o espalhamento. Valores típicos de TO são 1, 2 e

3, mas em alguns casos o valor de zero pode ser mais adequado. No caso especial onde a TO for zero, o método se transforma em um modelo de traçado de raios (RINDEL; CHRISTENSEN, 2003). Como uma regra, poder-se-ia assumir que quanto maior a complexidade do modelo, menor é a ordem de transmissão (NAYLOR; RINDEL, 1992). Ordens de transmissão acima de 4 não devem ser utilizadas, exceto quando se quer investigar ordens superiores de ecos.

Outros programas, como o Ramsete, removem a porção de energia difusa de cada reflexão e calculam a sua contribuição no receptor. Nesse sistema, toda a energia que permanece em uma pirâmide de feixes é assumida como reflexão especular da superfície limitada pelo centro do raio, até mesmo quando a área da pirâmide é muito maior que a área de reflexão (LONG, 2006). Esse método superestima a quantidade de energia refletida especularmente, mas reduz significativamente o tempo de computação. O Ramsete utiliza como técnica de modelagem computacional o traçado de pirâmide, enquanto o Odeon utiliza o traçado cônico e o Epidaure, outro software de simulação acústica, o traçado de raio gaussiano circular (FARINA, 1995). A figura exemplifica a técnica de traçado cônico e de traçado piramidal.



Desenho 8. Técnica de traçado de raio cônico (esquerda) e traçado piramidal (direita). Fonte: Farina (1995, p. 1)

Segundo Farina (1995), criador do software Ramsete, a esse software devem ser incorporados efeitos de espalhamento e difusão, a fim de torná-lo mais preciso.

Em estudo realizado por Vorländer (1995), para a precisão dos programas computacionais, mostrou-se necessária a inclusão das reflexões difusas nos algorítmicos, no mínimo as reflexões de 2ª a 4ª ordem. Quando avaliados 14 programas computacionais, os algorítmicos com abordagens especulares pobres se mostraram mais imprecisos se comparados aos com algum tipo de reflexão randômica ou caudas reverberantes estatísticas (VORLÄNDER, 1995).

Sobre a comparação entre valores de parâmetros acústicos medidos e simulados, segundo Nijs et al. (2002), uma igualdade perfeita entre os valores nunca será encontrada. Assim, deve-se tomar cuidado na utilização desses modelos, pois não se tem a certeza que

sejam a representação perfeita da realidade (LONG, 2006). As simplificações necessárias para tornar possível a realização dos cálculos em tempo hábil tornam as simulações imperfeitas, entretanto, à medida que aumenta a sofisticação das técnicas e a habilidade computacional, os modelos são aperfeiçoados. Assim, é importante realizar a calibração do modelo computacional, sendo a medição *in situ* tipicamente utilizada para verificar a precisão do modelo (BRADLEY; WANG, 2007).

O usuário dos programas de simulação acústica, algumas vezes, não pode checar os dados calculados através de medições, tendo que confiar na exatidão dos dados, ou estimar o tempo de reverberação através das fórmulas de Sabine e Eyring (BORK, 2005a). Entretanto, estudos detalhados mostram que os parâmetros acústicos, como o tempo de reverberação, dependem da forma e da localização do material de absorção, fato verificado em situações de campo e em simulações computacionais (SCHROEDER; GEALACH, 1974). Assim, algumas vezes, não é adequado que a precisão dos programas de simulação computacional seja avaliada através de fórmulas que desconsideram a forma da sala, a localização do material absorvente e o grau de difusão sonora.

No caso do STI, esse parâmetro acústico pode ser predito através de simulações computacionais ou métodos estatísticos. Segundo Houtgast e Steeneken (1985), a predição do STI através de simulações computacionais considera fatores existentes no recinto que não são relevados quando o STI é obtido através de método estatístico. Esses fatores são, por exemplo, a proporção entre as dimensões da sala (altura x comprimento x largura), a distribuição da absorção e a forma específica do recinto.

A precisão dos cálculos geralmente é influenciada e dependente de vários parâmetros que não apenas aqueles inerentes ao software (BORK, 2000, 2005a). Dependendo do software, alguns parâmetros de cálculo devem ser ajustados pelo usuário, por exemplo, número de raios (representa precisão), ordem de reflexão, inclusão de reflexões difusas, comprimento das partes iniciais, finais e reverberantes do cálculo da resposta impulsiva, ordem de transmissão, método a ser utilizado, entre outros (BORK, 2000). A escolha de todos esses parâmetros certamente determina o tempo de processamento dos resultados, portanto, não podem simplesmente ser ajustados a valores que gerem os resultados mais precisos. Para alcançar um resultado num tempo hábil, o usuário deve otimizar esses parâmetros. Para a precisão da simulação, esse fato faz com que os resultados sejam dependentes da sensibilidade do usuário e alguma experiência é requerida para encontrar valores ótimos a serem utilizados. Além disso, não é necessário, nem possível, modelar cada uma das arestas de um recinto. Sendo de responsabilidade do usuário limitar o número de superfícies sem

negligências severas, as quais são limitadas pela capacidade do software. Uma resolução geométrica muito elevada pode reduzir a precisão de cálculo (BORK, 2000). O nível de detalhamento pode ser quantificado pelo número de superfícies em relação ao volume do modelo computacional (BRADLEY; WANG, 2007). Um nível médio de detalhamento, quantificado através desse raciocínio, produz os maiores níveis de precisão quando comparado a espaços existentes. Alta fidelidade geométrica produz imagens da fonte desnecessárias, aumentando o tempo de cálculo e confundindo os resultados nessa porção do procedimento de cálculo (BRADLEY; WANG, 2007). Segundo estudo realizado por Naylor e Rindel (1992), quando modelos computacionais são utilizados, no caso o software Odeon, deve-se evitar superfícies muito pequenas e desnecessárias, ao invés disso, deve-se optar por uma aproximação geral das formas do ambiente.

Comparando a precisão dos resultados de diferentes softwares, observou-se que as simulações que apresentaram os melhores resultados não necessitaram dos maiores tempos de cálculo, nem de detalhes extremos de geometria da sala (VORLÄNDER, 1995). O maior número de superfícies no modelo com maior detalhamento não apresenta uma melhora significativa nos valores dos parâmetros calculados em comparação aos parâmetros medidos (BORK, 2005b). Conforme a experiência realizada por usuários de programas de simulação computacional, não são necessários muitos detalhes modelados para uma precisão dos resultados. Ao invés disso, é aconselhável modelar superfícies difusas através de poucos planos, mas com dados de absorção e espalhamento efetivos. Isso significa que o detalhamento na modelagem de elementos das superfícies com alto espalhamento sonoro não é necessário, ao invés disso, um coeficiente de espalhamento adequado deve ser aplicado para descrever seu ambiente de reflexão e sua influência no espalhamento no campo sonoro da sala como um todo (BORK, 2005b).

Durante a calibração do modelo, as variáveis muitas vezes manipuladas são os coeficientes de absorção e de difusão (ou espalhamento) das superfícies do modelo (BRADLEY; WANG, 2007; KATZ; WETHERILL, 2007). O pré-requisito mais importante para uma simulação de sala bem sucedida é um conhecimento preciso sobre o material das superfícies, como suas propriedades de absorção e difusão (BORK, 2000). Rindel (2000) afirma que, pela natureza da onda sonora, é necessário calcular os efeitos do espalhamento sonoro nos modelos.

As imprecisões encontradas entre valores medidos e simulados computacionalmente podem ser atribuídas, em parte, às incertezas dos coeficientes de absorção utilizados (BORK, 2005a). Um valor confiável de tempo de reverberação só será obtido se os coeficientes de

absorção utilizados na simulação da maioria das superfícies forem bastante aproximados em relação aos valores reais (NAYLOR; RINDEL, 1992). Adicional a isso são as incertezas relativas à estimação dos coeficientes de absorção dos componentes da sala que não são totalmente conhecidos, mas que são de relevância acústica, como o mobiliário e objetos (BORK, 2005a).

Os dados publicados para os coeficientes de absorção normalmente diferem conforme a fonte de pesquisa. As variações desses dados são em função de discrepâncias nas configurações de teste e diferenças nas propriedades dos materiais (BRADLEY; WANG, 2007). Infelizmente, os processos de medição *in situ* utilizados atualmente não permitem avaliações precisas em diversas condições de impacto (como diferentes ângulos de incidência) do ambiente de absorção e espalhamento sonoro de todas as superfícies e objetos existentes na sala, principalmente nas baixas frequências, não permitindo que os dados de absorção dos materiais sejam obtidos no local (BORK, 2005a). Assim, a maioria desses dados é obtida através de medições em câmeras reverberantes, a qual apresenta condições diferenciadas das salas reais.

O processo de calibração se avanteja dessas variações dos coeficientes de absorção, ajustando os valores dos coeficientes até que os resultados simulados se assemelhem aos resultados medidos no espaço real (BRADLEY; WANG, 2007). Segundo Katz e Wetherill (2007), procedimento de calibração em simulações significa o refinamento das propriedades acústicas dos materiais.

Outras fontes de incertezas que devem ser adequadamente quantificadas, e que são de difícil exclusão do processo de modelagem, incluem a diretividade precisa da fonte e as características das imediações de fonte e receptor (NAYLOR; RINDEL, 1992). Ronsse (2006) chama a atenção para o fato que, para se alcançar valores de STI semelhantes em dados medidos e simulados, as características do alto-falante utilizado nas simulações computacionais devem ser as mesmas do alto-falante utilizado nas medições. Além disso, fonte e receptor devem ser localizados nos mesmos pontos tanto nas medições como nas simulações. Isso porque o STI é fortemente influenciado pela posição do ouvinte em relação ao orador (HOUTGAST; STEENEKEN, 1985).

Em estudo apresentado por Vorländer (1995), a avaliação da precisão de simulações computacionais foi realizada através de um número médio único. Esse valor foi derivado das diferenças absolutas entre o resultado da simulação e da medição das combinações de fonte e receptor, na frequência de 1000 Hz. Os resultados dos programas avaliados como precisos diferiram dos resultados das medições na ordem de magnitude do desvio padrão do resultado

médio das medições. Essa ordem de magnitude é aproximadamente a mesma dos limiares de diferença subjetiva dos parâmetros acústicos, indicados na ISO/DIS 3382-1 (VORLÄNDER, 1995).

Em outro estudo, na avaliação da precisão das simulações computacionais, para apresentar os resultados, duas maneiras foram adotadas:

- a) os dados foram calculados para cada parâmetro em relação à posição fonte-receptor, em uma banda de oitava, a fim de comparar a alteração do parâmetro ao longo da sala;
- b) os dados foram calculados em relação à frequência em uma posição de fonte-receptor, a fim de comparar as respostas nas frequências calculadas (BORK, 2000).

Uma vez que a variação do tempo de reverberação em diferentes posições é pequena (BORK, 2000, 2005b), a dependência na frequência mostrou ser mais significativa para representar a precisão dos resultados calculados para esse parâmetro. A resposta em frequência do tempo de decaimento se mostrou dependente da localização do ponto medido apenas nas baixas frequências, podendo ser considerada equilibrada, em relação à localização, nas outras frequências (BORK, 2005a). No estudo apresentado por Bork (2000), os valores medidos e simulados foram comparados ao limiar de percepção subjetiva. Para o tempo de reverberação, esse limiar é de 5%.

Outros autores utilizaram esse valor de 5% como limiar de percepção subjetiva para o T_r , como Bradley e Wang (2007). Já para Bork (2005b) esse limiar é de 0,05s, sendo esse o valor limite da diferença entre dados medidos e simulados a fim de representar a precisão do modelo computacional em relação aos limites da audição. Naylor e Rindel (1992) indicam que o desvio padrão de 0,04s entre os valores medidos e simulados de T_r é o mínimo que se pode esperar. Esse valor representa a variação do T_r quando fonte ou microfone são movidos em um raio de 30 cm em uma medição. Uma precisão de ± 30 cm na transferência de dados da medição para a simulação é considerada muito boa, sendo normalmente essa variação maior (NAYLOR; RINDEL, 1992).

Já para o STI, segundo Bork (2000), esse limiar da percepção subjetiva é de 0,05. Então, se existir uma diferença de 0,05 entre o STI medido e simulado, essa diferença não será percebida subjetivamente.

Van der Voorden et al. (1999) afirmam que as ferramentas de simulação existentes no campo da acústica de salas foram desenvolvidas para a predição de parâmetros acústicos em salas de espaço único, como salas de concerto. A modelagem computacional de espaços

acoplados apresenta peculiaridades em relação à modelagem de espaços únicos. Mezaninos, áreas de escritórios semi-abertas e salas de exposições são exemplos de espaços acoplados.

Em geral, a curva de decaimento de um espaço acoplado irá diferenciar da curva de decaimento de um espaço único. Entretanto, com ajustes na especificação dos parâmetros de projeto, as características do decaimento dos espaços acoplados e dos espaços únicos podem ser idênticas (VAN DER VOORDEN et al., 1999).

Quando utilizada simulação computacional, o número de raios necessários para encontrar resultados adequados em volumes acoplados é 1000 vezes maior que aquele requerido para volumes únicos (VAN DER VOORDEN et al., 1999). O grande número de raios é necessário para permitir a exploração adequada da porção do volume acoplado da geometria (BRADLEY; WANG, 2007). Em um volume único, os raios recentes são normalmente dizimados para a redução do tempo de cálculo, em espaços acoplados, isso não deve ser realizado. Além disso, quando simulados volumes acoplados, correções nos coeficientes de absorção devem ser aplicadas (NIJS et al., 2002). Coeficientes de absorção medidos em câmaras reverberantes podem exceder o valor 1,0 e não trazem qualquer informação sobre a dependência angular. Então, uma conversão adicional deve ser realizada para utilizar os coeficientes em modelos computacionais. Esses valores devem ser “traduzidos” em valores para esse fim, especialmente se os valores encontrados excederem o coeficiente de absorção 1,0. Em câmaras reverberantes, a absorção é superestimada devido ao campo sonoro não difuso e o efeito se torna ainda pior se forem utilizados difusores. Uma redução de 20% dos resultados de absorção obtidos em câmaras reverberantes é uma boa correção preliminar para os dados de entrada em programas computacionais para simulação de espaços acoplados (NIJS et al., 2002).

As diferenças encontradas entre valores de T_r calculados através das fórmulas clássicas e através do método da ISO 3382 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1997) podem ser explicadas pelo fato de que quando apenas o teto e o piso são absorvedores, caso que ocorre em escritórios panorâmicos, o campo sonoro se divide em um campo vertical, o qual possui decaimento sonoro muito rápido, e campo horizontal, onde o decaimento sonoro é bastante lento. O tempo de reverberação, resultante de simulações computacionais, pode variar de diferentes posições de receptores (NIJS et al., 2002).

Existe um consenso que maior difusão em uma sala com distribuição não homogênea da absorção leva a uma curva de decaimento que se assemelha a uma curva de uma sala com distribuição uniforme (NIJS et al., 2002). Versões mais recentes do software Odeon (a partir

da versão 6.5) utilizam um método híbrido mais sofisticado e mais adaptado na predição do decaimento não-exponencial, encontrado em sistemas com volumes acoplados (BRADLEY; WANG, 2007). Assim, em estudo realizado pelos mesmos autores, os resultados das comparações entre valores medidos e simulados utilizando o software Odeon demonstraram boa precisão do software nos valores calculados de T_r para ambientes acoplados.

2.4 Escritórios Panorâmicos

A cada dia, locais de trabalho devem absorver e desenvolver avanços tecnológicos com mais rapidez, se adequar a mudanças na dinâmica organizacional e às necessidades dos trabalhadores a privacidade, a interação e a diferentes processos de trabalho (LEE; BRAND, 2005). O projeto de escritórios deve ter como objetivo: estimular novas formas de trabalho, melhorar a produtividade e reduzir os custos, sem reduzir a satisfação do funcionário (VAN DER VOORDT, 2004b).

Segundo Van der Voordt (2004a), nos diferentes espaços de trabalho, para diversos tipos de atividades, as empresas buscam, em relação ao ambiente do escritório:

- a) uso mais eficiente do espaço;
- b) melhora do desempenho e aumento da produtividade dos funcionários;
- c) a satisfação do usuário;
- d) transmitir uma imagem positiva para os clientes;
- e) o aumento da flexibilidade e, conseqüentemente, a redução do tempo e do incômodo no caso de mudanças na organização do espaço;
- f) melhora no uso dos recursos: na forma do espaço, na redução do consumo de energia, na menor utilização de materiais de construção e acabamento do edifício, no menor custo de acomodação dos funcionários.

As empresas têm como prioridade alcançar um melhor desempenho dos funcionários com baixos custos, enquanto que para os funcionários, o fator de maior importância é o prazer no trabalho (VAN DER VOORDT, 2004b). Estudos mostraram que trabalhadores preferem escritórios mais fechados (privativos), enquanto gerentes preferem possuir vigilância visual sobre seus funcionários (HUCHINGSON, 1981). Entretanto, quando relacionado à produtividade, a opinião comum, empresa e funcionário, é que uma estrutura aberta propicia uma maior comunicação e facilita a troca de conhecimentos e habilidades (VAN DER

VOORDT, 2004b). Dessa forma, os escritórios panorâmicos surgiram para solucionar a necessidade de flexibilidade, uma vez que oferecem acesso inter-pessoal e facilidade na comunicação, se comparados aos convencionais escritórios de planta fechada. Além disso, os escritórios de planta aberta, em substituição aos convencionais, intensificam a densidade de trabalhadores de 100 a 200%, reduzindo gastos financeiros, em curto prazo (HONGISTO; KERANEN; LARM, 2004).

A produção em linha de muitos escritórios americanos do início do século 20 resultou em um espaço de trabalho arranjado de forma linear e em grandes salas. Várias empresas seguiam os princípios Tayloristas de divisão das tarefas em ações repetitivas específicas. A organização do espaço permitia um fluxo de trabalho ininterrupto e supervisão visual constante dos gerentes. Um dos primeiros edifícios com esses princípios, o Larkin Administration Building, foi projetado por Frank Lloyd Wright em 1904, nos Estados Unidos, e abrigava cerca de 1800 funcionários (PEJTERSEN et al., 2006).



Fotografia 3. Larkin Administration Building, projetado por Frank Lloyd Wright, 1904, Estados Unidos, princípios Tayloristas. Fonte: Pfeiffer (2004, p. 23)

Entretanto, o padrão de escritórios panorâmicos, ou “Bürolandschaft”, foi criado pelos irmãos Schnelle, na Alemanha, por volta do ano de 1955 (DUFFY, 1980). Esse tipo de escritório surgiu baseado em alguns fundamentos, os quais relacionam os princípios de

desenho com os princípios de organização. O primeiro fundamento é que os escritórios, comparados a fábricas, necessitam de grandes espaços abertos. Os escritórios são fábricas no sentido que a informação transmitida no escritório é a matéria bruta do processo de produção. Esse era o argumento preferido dos primeiros defensores dos escritórios panorâmicos. O segundo fundamento diz respeito à igualdade entre os usuários do escritório. Tradicionalmente, a hierarquia ordenava a estrutura de organização do espaço. Era comum manifestar o “status” individual através de maior quantidade de espaço ou uma mesa maior. Essa hierarquização se tornou incompatível com as organizações modernas, as quais tinham como princípio a democracia. Assim, o espaço não mais deveria ser organizado segundo bases hierárquicas, mas conforme a real necessidade de comunicação. O terceiro fundamento é que tudo deve ser móvel, ou seja, relacionado com a teoria de que as empresas estão em constante modificação, é aconselhável que ocorra facilidade na mudança da organização do espaço físico. Assim, com o espaço sem divisórias internas fixas, há maior facilidade de mudanças, havendo apenas a movimentação do mobiliário. Certamente, os escritórios panorâmicos estimularam a introdução de inovações no desenho de mobiliário para escritórios. Sem paredes, muitas vezes o mobiliário tem que fazer a função de dividir espaços (DUFFY, 1980). O escritório panorâmico original era um espaço totalmente aberto (sem divisões entre os postos) nem sequer para os gerentes. Os espaços de trabalho eram arranjados em pequenos grupos para o fluxo de trabalho e comunicação convenientes. Apenas os primeiros escritórios alemães não possuíam partições ou divisórias entre os grupos ou estações de trabalho, a característica do mobiliário dos escritórios panorâmicos logo assumiu divisórias a meia altura (PEJTERSEN et al., 2006).



Fotografia 4. Osram Offices, projetado por Walter Henn, 1963, Alemanha, princípios do “Bürolandschaft”. Fonte: http://www.carusostjohn.com/artsCouncil/artwork/history_osram_int_218.jpg (acesso em 13 nov. 2008)

Na década de 1970 e início de 1980, relatórios de ocupantes de escritórios panorâmicos relatavam a falta de privacidade e incômodo pelo ruído provocado por colegas de trabalho (PEJTERSEN et al., 2006). Muitos estudos identificaram queixas da falta de privacidade e relacionado ao fato do funcionário não poder controlar a temperatura e a quantidade de luz artificial. Mesmo quando medições objetivas mostraram que o ruído de fundo das conversas no recinto não estava excessivamente elevado (aproximadamente 50 dB), esse ruído causava distração aos funcionários (VAN DER VOORDT, 2004b). Pejtersen et al. (2006) afirmam que ocupantes de escritórios panorâmicos são mais perceptíveis ao desconforto térmico, a má qualidade do ar e ao ruído. Assim, todo o projeto de escritório deve encontrar um equilíbrio entre desejos particulares conflitantes e necessidades reais. O resultado desse processo de equilíbrio é largamente variável, uma vez que não existe um edifício ideal para todos os casos. Para Duffy (1980), o escritório panorâmico é um raro exemplo de conceito de desenho do tipo geral, com uma idéia organizacional. O problema fundamental dos escritórios panorâmicos é o de ser o único conceito nesse campo.

2.4.1 Acústica em Escritórios Panorâmicos

Qual é a diferença entre uma Casa de Concerto e um Escritório Panorâmico?
Uma casa de concerto requer uma acústica maravilhosa.
Um escritório panorâmico requer uma boa acústica.
Em uma casa de concerto, o carpete pode ser minimizado.
Em um escritório panorâmico, o carpete é absolutamente essencial.
Em uma casa de concerto queremos ser cercados por uma riqueza de sons reverberantes.
Em um escritório, não queremos ser cientes a qualquer tipo de som.
Em uma casa de concerto queremos tempos de reverberação bastante longos.
Em um escritório, a acústica ideal é a de campo aberto (reverberação mínima).
Em uma casa de concerto queremos ser capazes de ouvir sons suaves a longas distâncias com clareza.
Em um escritório, não queremos ser capazes de entender uma conversa ao telefone vinda da mesa vizinha...
Em uma casa de concerto, queremos a exclusão completa do ruído de fundo, nenhum som deve ser ouvido com exceção daquele criado pelo espetáculo.
Em um escritório, necessitamos de ruído de fundo para garantir a privacidade e nos proteger de distrações.
Em uma casa de concerto, queremos uma linha direta de visão do espetáculo.
Em um escritório, queremos ficar escondidos atrás de uma barreira. Qualquer espetáculo é ignorado...
Uma casa de concerto é projetada para aproveitarmos o som.
Um escritório é projetado para ignorarmos o som... (BROOKS, 2003, p. 92, tradução nossa)

Assim, escritórios panorâmicos são exatamente o oposto de casas de concerto. Uma casa de concerto é projetada para reforçar sons suaves para ouvintes concentrados a uma distância. Em um escritório panorâmico, o ideal é que não seja possível escutar o colega falando ao telefone.

Como uma consequência do desenvolvimento de escritórios panorâmicos durante as décadas de 1950 e 1960 nos países ocidentais, numerosos estudos foram realizados dos efeitos do ruído em escritórios, em relação ao ruído de máquinas e equipamentos e da presença de vários trabalhadores em um mesmo ambiente (CHIGOT, 2005).

A maior parte do trabalho intelectual é realizada em escritórios e a distração provocada por conversas indesejáveis é um sério problema mundial. Um estudo realizado pela ASID (Sociedade Americana de Design de Interiores) verificou que 71% das distrações nas estações de trabalho são atribuídas ao ruído de intrusão (ruído indesejável) (ROY, 2007).

Chigot (2003) enfatiza que dois tipos de atitudes dos funcionários são requisitados quando utilizados planos abertos:

- a) o empregado pode participar freqüentemente e imediatamente de uma mudança de informação. Para isso é necessário que o empregado seja receptivo ao que ocorre no escritório. Nesse caso, o ambiente aberto é adequado;
- b) por outro lado, o empregado deve possuir grande responsabilidade no conteúdo do trabalho e a forma que é conduzido. Para essa tarefa, o empregado deve ter a capacidade de ignorar algumas informações externas ao trabalho, vindas do escritório, para alcançar seus objetivos. Nesse caso, ambientes abertos possuem implicações negativas.

Essas atitudes requisitadas são contraditórias, uma vez que intensa comunicação pode ser fonte de perturbação.

Segundo Wang e Bowden (2006), a percepção do ruído de fundo pode impactar significativamente na produtividade dos trabalhadores de escritórios. O ruído é freqüentemente apontado como o fator de maior incômodo no ambiente interno de escritórios. Em estudo realizado por Helenius et al. (2007) em oito escritórios, com um total de 633 questionários respondidos, o ruído e as condições térmicas foram apontados como os fatores de maior incômodo no ambiente de trabalho. Para a realização desse estudo, na maioria das questões, foi utilizada uma escala ordinal de cinco pontos, onde 1- nunca, 2- raramente, 3- algumas vezes, 4- freqüentemente, 5- muito freqüentemente. Os valores foram apresentados através de médias com desvios padrões ou distribuições percentuais. O ambiente acústico dos escritórios panorâmicos foi apontado como mais insatisfatório que o ambiente acústico dos escritórios de planta fechada. As fontes sonoras apontadas como de maior distração foram a fala, sons da campainha do telefone e o ruído causado pela movimentação de pessoas (HELENIUS et al., 2007; HONGISTO; VIRJONEN; KERÄNEN, 2007). A fala e risadas próximas à mesa foram apontadas como as fontes de ruído de maior incômodo em escritórios panorâmicos (HELENIUS et al., 2007).

Hongisto, Virjonen e Keränen (2007) afirmam que não é o nível sonoro da fala que determina os seus efeitos de distração, mas a sua inteligibilidade. A fala é a fonte sonora de maior distração, pois ocorre de forma imprevista, seu volume é variável e possui a maior possibilidade de conteúdo de informação dos sons existentes no escritório. Em estudo realizado por Kjellberg (1996), o grau de distração dos funcionários se mostrou mais relacionado aos eventos sonoros, capacidade de controle do ruído e previsibilidade do ruído que aos níveis sonoros. Krajcarz (2007) afirma que para um escritório ser considerado um ambiente aceitável pelos usuários, eles devem ter a certeza que estão sendo entendidos e que

suas conversas permaneçam confidenciais, características que tendem a ser requisitos paradoxais.

Tang e Wong (1998) observaram, ao realizar medições físicas em escritórios de planta aberta, que a maior parte da energia sonora estava concentrada na faixa de frequência da voz humana. Além disso, os autores observaram alto nível de inteligibilidade da fala nesses locais. Segundo Egan (1988), a privacidade da fala é influenciada por três fatores: fonte, meio e receptor. Em relação ao meio, o ambiente acústico de escritórios panorâmicos pode ser incrementado tecnicamente por três fatores principais:

- a) a absorção da sala, a qual evita a reverberação e reflexões recentes;
- b) as barreiras, que controlam o som direto;
- c) o mascaramento artificial do som, o qual proporciona um ambiente sonoro uniforme e reduz o incômodo causado por estações de trabalho próximas (HONGISTO; KERANEN; LARM, 2004).

Segundo a Norma E 1374-02 (INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE, 2002) o alcance da privacidade entre estações de trabalho é determinado pela influência que um local de trabalho exerce sobre o outro. Esse grau de interferência depende da amplitude, direção e orientação da fonte sonora, da atenuação do som pela distância e proteção por barreiras, da absorção do ambiente e do nível de pressão sonora no local do ouvinte. Além disso, a disposição do mobiliário e orientação do orador e ouvinte influencia na privacidade nesses ambientes.

Segundo Kang (2002), a direção dos oradores é considerada apenas no campo próximo, pois as fontes no campo distante são consideradas onidirecionais, uma vez que o nível de pressão sonora é dominado por múltiplas reflexões. Egan (1988) enfatiza que quando se avalia a inteligibilidade nas proximidades de um orador, a orientação da fonte é um fator importante em escritórios panorâmicos, tendo uma diferença de 10 dB no nível da fala entre a frente e as costas do orador.

Para Asselineau (2007), a relação sinal-ruído é um parâmetro importante para a avaliação da qualidade acústica de escritórios panorâmicos. Enquanto um ocupante, na maior parte do tempo, quer estar protegido da fala de intrusão de conversas indesejáveis, ele também quer entender facilmente o sinal da fala de um membro da sua equipe. Bradley (2007) salienta que, se o ruído ambiente tiver nível muito baixo, a relação sinal ruído será elevada e a privacidade da fala, inadequada. Por outro lado, se os níveis de ruído ambiente forem muito elevados, existirá um alto nível de privacidade da fala, mas os níveis de ruído ambiente irão

gerar incômodo e fazer com que os ocupantes falem com maior intensidade de voz. Assim, estudos recomendam como ótimo o ruído ambiente de 45 dB(A) em escritórios panorâmicos.

Em estudo realizado por Krajcarz (2007), foi proposta a utilização de um modelo que caracterize a inteligibilidade e a privacidade da fala através da relação sinal-ruído. O sucesso de uma instalação acústica em um espaço coletivo de trabalho requer que dois itens contraditórios sejam alcançados: fácil comunicação entre estações de trabalho adjacentes e privacidade, ausência de interferência, entre as mesmas estações de trabalho.

Os parâmetros que interferem no ruído ambiente (parcela do ruído na relação sinal-ruído) são: o número de fontes sonoras (equipamentos, pessoas, ruído externo), a distância entre as fontes e a reverberação da sala. Já para o sinal, os parâmetros a se considerar são: a distância entre fonte e receptor e a reverberação nesse mesmo trajeto (KRAJCARZ, 2007).

Através da simulação, utilizando a relação sinal-ruído, podem ser criados diferentes cenários para avaliação das condições acústicas em escritórios. Entre eles, o cálculo da relação sinal-ruído para diferentes posições de oradores, modificação das dimensões dos obstáculos (mobiliário, divisórias), modificação do coeficiente de absorção das paredes e alteração do ruído ambiente (KRAJCARZ, 2007).

Kang (2002), em estudo realizado, observou que se a densidade de trabalhadores é constante, a diferença de inteligibilidade entre volumes diferentes de salas não é significativa. Uma razão importante para isso é que com o aumento do tamanho da sala, a redução da relação sinal-ruído causada por mais oradores é aproximadamente compensada pelo aumento da absorção total.

A privacidade da fala e o incômodo, causados pela fala dos colegas, podem ser descritos pela inteligibilidade da fala entre estações de trabalho. Alguns estudos em laboratório e em campo avaliaram apenas estações de trabalho vizinhas, entretanto, segundo Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), a avaliação deve abranger todo o espaço do escritório, uma vez que o incômodo ao ruído não está restrito às estações mais próximas. Asselineau (2007) afirma que a inteligibilidade da fala deve ser boa localmente, a fim de promover a conversação de membros de um mesmo grupo. Entretanto, conforme aumenta a distância do orador, a inteligibilidade deve se tornar mais pobre.

Segundo Bradley (2007), enquanto medições do índice de articulação (AI) são utilizadas para indicar a privacidade da fala em escritórios norte americanos, normalmente são utilizados valores do índice de transmissão da fala (STI) nos escritórios europeus.

Pop e Rindel (2005) afirmam que para se alcançar condições de privacidade da fala em escritórios panorâmicos, os valores de STI devem estar abaixo de 0,45. Uma condição

razoavelmente boa corresponderia a um valor de STI de aproximadamente 0,3, já para uma condição de confidencialidade, são recomendados valores de STI de aproximadamente 0,15. Hongisto (2007) desenvolveu um modelo, baseado em estudos realizados em laboratório, que compara valores de STI e a redução do desempenho de trabalhadores em escritórios panorâmicos. O desempenho no trabalho começa a reduzir quando o STI excede o valor de 0,20. Reduções consideráveis no desempenho do trabalho são percebidas quando os valores de STI excedem 0,60.

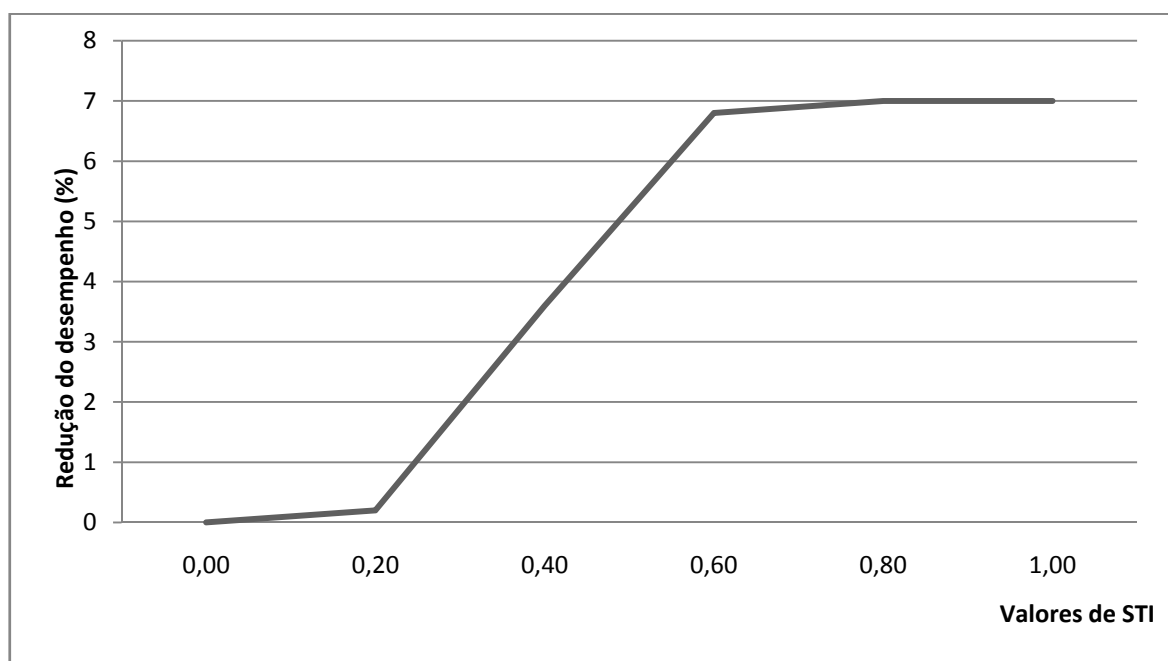


Gráfico 11. Relação entre a redução do desempenho no trabalho e aumento dos valores de STI.

Em estudo realizado por Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), dois descritores principais foram determinados através de dados de medição para a avaliação de escritórios:

- a) raio de distração, r_D ;
- b) taxa de decaimento espacial da fala, DL_2 .

O DL_2 , definido pela norma ISO 14257 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001), não foi descrito para cada banda de oitava no escritório, uma vez que a fonte sonora primária é sempre a fala. Assim, o decaimento espacial do nível da fala ponderado em A por dobro da distância, DL_2 , foi selecionado para utilização como parâmetro resultante das medições de nível da fala. Através das medições do STI, pode ser obtido o raio de distração, r_D (m). O raio de distração foi definido como a distância do orador onde o STI é menor que 0,5. Além disso, o raio de privacidade, r_P , foi determinado como a distância do orador onde o STI é menor que 0,2. Os dados de tempo de reverberação e níveis sonoros

ambiente foram apresentados como uma média aritmética dos valores nas bandas de frequência de 250 a 4000 Hz e de todos os pontos medidos na sala (HONGISTO; VIRJONEN; KERÄNEN, 2007).

O DL_2 descreve a quantidade de amortecimento acústico na posição do ouvinte nas estações de trabalho. Para Asselineau (2007), quanto maior for o DL_2 , melhores são as condições acústicas, pois o ruído das atividades realizadas no local será mais atenuado. Segundo Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), os escritórios podem ser organizados em uma ordem de qualidade acústica de acordo com seus valores de DL_2 . Em estudo realizado por esses autores, os maiores valores de DL_2 foram obtidos em escritórios com grande absorção sonora, tanto nos planos horizontais como nos verticais, além disso, em escritórios com divisórias altas. Os menores valores de DL_2 foram associados a escritórios com divisórias baixas, ou sem divisórias, e absorção sonora reduzida no plano horizontal ou vertical. Apenas o teto com material de alta absorção não é suficiente para garantir atenuação sonora adequada. Hongisto, Virjonen e Keränen (2007) observaram que valores elevados de DL_2 não garantiam alta privacidade da fala, ou seja, baixo valor de STI. Além disso, não foi encontrada qualquer correlação entre a taxa de decaimento da fala e os tempos de reverberação médios. Assim, os autores não recomendam utilizar o tempo de reverberação como um parâmetro de projeto de acústica em escritórios panorâmicos.

Para Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), na maioria dos casos, DL_2 e r_D são suficientes para descrever as condições acústicas de um escritório panorâmico. Recomendações preliminares de estudos realizados por esses autores para DL_2 e r_D estão na tabela a seguir.

Tabela 10. Relação entre classificação acústica de escritórios panorâmicos e valores de DL_2 e r_D .

Classificação Acústica	DL_2 (dBA)	r_D (m)
Excelente	> 11	< 5
Bom	8 a 11	5 a 8
Regular	5 a 8	8 a 11
Pobre	< 5	> 11

Fonte: Hongisto, Virjonen e Keränen (2007, p. 6, tradução nossa)

Os requisitos para um bom projeto acústico podem ser determinados através das medições de privacidade da fala e dos níveis de ruído. Novas ferramentas computacionais, que auxiliam no projeto e medição da privacidade da fala em escritórios geram uma avaliação consistente dos resultados desejados (BRADLEY, 2007). Pop e Rindel (2005) desenvolveram o modelo computacional de um escritório utilizando o software de acústica de sala Odeon. Esse modelo permitiu uma investigação detalhada da influência possível de várias condições acústicas da privacidade da fala. Nesse estudo, foi encontrado que o STI é um bom descritor para a avaliação da privacidade da fala e que o DL_2 permite a avaliação das condições acústicas da sala e da eficácia do tratamento acústico. A fim de comparar as características acústicas do escritório real e do modelo computacional, foram realizadas medições in-situ em um escritório real. Para isso, foram realizadas medições utilizando o programa computacional Dirac, tornando possível a calibração do modelo computacional (POP; RINDEL, 2005).

No momento do planejamento do escritório, algumas considerações devem ser observadas, as quais reduzem a qualidade acústica do ambiente:

- a) atividades que geram ruído que não estão suficientemente separadas de atividades sensíveis ao ruído;
- b) integração desejada ocorrendo em locais que não foram planejados para isso;
- c) a predominância de superfícies rígidas facilitando a propagação do som entre espaços;
- d) áreas de corredores e circulações abrigando reuniões e discussões (CHIGOT, 2003).

A maioria da produtividade intelectual é realizada em escritórios. A quantidade relativa de escritórios panorâmicos é ainda crescente e tarefas de trabalho com demanda cognitiva são realizadas nesses escritórios. Assim, cada vez mais esforços devem ser tomados no projeto acústico de escritórios panorâmicos (HELENIUS et al., 2007). Otimizar o projeto acústico desses escritórios pode ser uma difícil tarefa, pois existem muitos parâmetros que devem ser considerados. Bradley (2003) apresenta dez parâmetros de projeto acústico de escritórios panorâmicos e valores ideais para esses parâmetros, considerando a privacidade da fala entre estações de trabalho adjacentes. Uma privacidade aceitável só será alcançada quando esses parâmetros, obtidos no escritório avaliado, estiverem próximos dos valores ideais.

A tabela a seguir apresenta seis desses parâmetros e valores ideais para eles. Os valores de absorção sonora são relativos à média da absorção sonora (SAA) do material. SAA

é a média dos coeficientes de absorção em banda de 1/3 de oitava de 200 a 3125 Hz (BRADLEY, 2003).

Tabela 11. Valores ideais de parâmetros de projeto em escritórios panorâmicos.

Parâmetro de projeto em escritórios.	Valor ideal.
Absorção do teto	SAA= 0,95
Altura da divisória entre estações	1,70 m
Absorção da divisória	SAA= 0,90
Absorção do piso	SAA= 0,19
Pé-direito dominante	2,70 m
Ruído ambiente	45 dB(A)

Fonte: Bradley (2003, p. 25, tradução nossa).

Conforme estudo realizado por Bradley (2003, 2007), desses parâmetros, os mais importantes para se alcançar uma privacidade aceitável são a absorção do teto e a altura da divisória entre estações de trabalho. Roy (2007) concorda afirmando que como solução para a falta de qualidade acústica em escritórios panorâmicos, a primeira indicação é a inclusão de materiais absorvedores acústico nas superfícies, principalmente forros acústicos suspensos. Quanto maior a absorção do teto, melhor a condição acústica em um escritório. Além de auxiliar no decaimento do nível sonoro espacial, ele aumenta a eficiência das barreiras (ASSELINEAU, 2007). Harris (1998) complementa afirmando que a fim de intensificar o desempenho das divisórias, é necessário que o material do teto tenha um alto coeficiente de absorção, especialmente nas frequências da fala, 500 a 2000 Hz.

Os valores de STI são reduzidos com o aumento da absorção sonora média do teto, aumentando a privacidade da fala. Além disso, em estudo realizado por Bradley (2007), os valores de STI se mostraram bastante influenciáveis pela variação na altura do painel entre as estações de trabalho. O aumento da altura desse painel acarreta na redução dos níveis de difração dos sons da fala das estações adjacentes, reduzindo os valores de STI e resultando em uma melhor privacidade da fala.

Segundo Harris (1998), para se conseguir nível de privacidade aceitável, o som refletido por superfícies horizontais e verticais deve ser reduzido. A importância do material do teto deve-se a geometria típica de ambientes panorâmicos, a qual é de grandes dimensões e tem a altura até o teto inferior a metade da menor dimensão horizontal da sala. Segundo Knudsen e Harris (1998), para ambientes com essas características, o teto é a melhor

superfície para o tratamento da absorção. Kang (2002) enfatiza que em salas de planta aberta a localização do material com maior absorção acústica deve ser o teto ou o piso, isso porque nesses locais as reflexões entre esses dois elementos dominam o campo acústico. As superfícies verticais também refletem o som, algumas vezes reduzindo a atenuação sonora. Por isso, as superfícies verticais e as próprias barreiras devem ser revestidas com material absorvente. Segundo a norma E1374-02 (INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE, 2002), em relação às reflexões sonoras em ambiente panorâmico, o ideal é aproximar às condições de campo aberto, onde não há superfícies refletoras.

Segundo Kang (2002), as barreiras podem ser projetadas não apenas para evitar o som direto de um orador para outros grupos de conversação, mas também para aumentar o nível do sinal, por manter a energia do som do orador em seu grupo de conversação. Subdividir grandes espaços em menores, criar compartimentos para trabalhadores afins, reduzir o nível de ruído e inserir células concentradas para conversas confidenciais ao telefone, tudo isso pode ajudar a reduzir as queixas de distração e falta de privacidade (VAN DER VOORDT, 2004b).

Uma distância razoável deve separar as estações de trabalho, especialmente estações de pessoas pertencentes a grupos diferentes. Deve-se analisar as necessidades dos ocupantes do espaço. Ou seja, deve ser realizada uma análise do trabalho a fim de verificar como as pessoas se comportam nas estações de trabalho (ASSELINEAU, 2007). Kang (2002) salienta que uma característica significativa em grandes salas é que, para um dado ouvinte, o som dos oradores do seu grupo de conversação é entendido como sinal, e o som vindo de outros oradores é entendido como som ambiente.

Para Roy (2007), é de grande importância que o foco dos projetos seja a forma como o ambiente interno está interferindo no conforto e desempenho dos ocupantes do local. Assim, as reações espontâneas dos usuários finais geram informações valiosas das questões que devem ser privilegiadas em novas instalações (CHIGOT, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODO

Para a validação do método utilizado para esta tese, foi realizado um estudo piloto em um escritório panorâmico real. Através da experiência adquirida durante esse estudo, para obter os dados pretendidos para esta tese, foram realizadas: medições no local, simulações computacionais e avaliações subjetivas através de questionários. Essas três etapas de trabalho tiveram por objetivo avaliar a qualidade acústica de escritórios panorâmicos e a influência de alguns elementos construtivos no ambiente acústico desses escritórios.

As medições no escritório avaliaram a realidade das construções e dos ambientes sonoros, referente ao tempo de reverberação, inteligibilidade da fala e nível de ruído ambiente. Além disso, os dados medidos permitiram a calibração do modelo computacional.

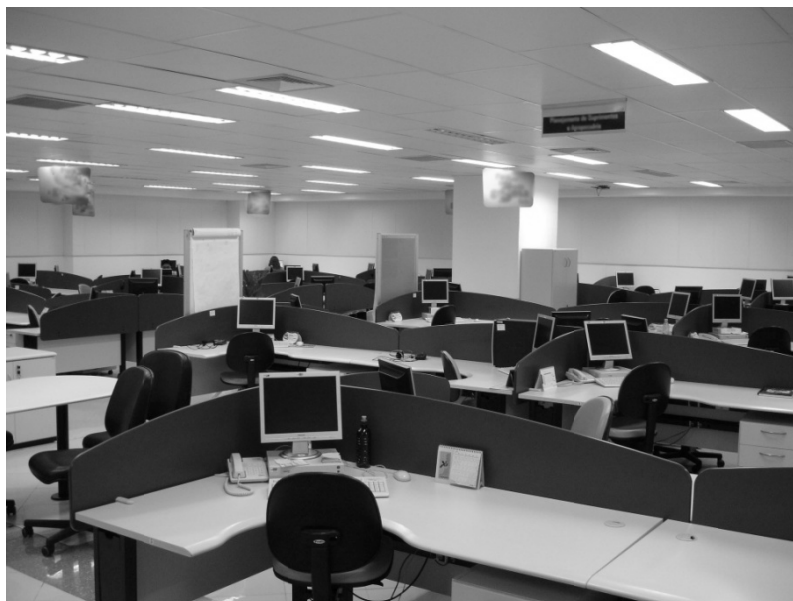
A simulação computacional resultou em um maior detalhamento da avaliação acústica dos escritórios, uma vez que com o modelo calibrado é possível obter milhares de pontos simulados (receptores) e vários parâmetros acústicos. Ainda, a simulação permitiu a avaliação da influência de elementos construtivos no ambiente acústico, através da alteração de materiais de acabamento (absorção sonora) e inserção ou retirada de divisórias (barreiras acústicas).

Através da análise subjetiva foi possível obter a impressão dos trabalhadores ao ambiente acústico dos escritórios. Os dados coletados por esse método foram confrontados com os dados medidos e simulados.

3.1 Estudo Piloto

Para o estudo piloto foi selecionado um escritório panorâmico semelhante aos utilizados como objeto de estudo para esta tese, fotografia 5. Nesse escritório foram realizadas medições acústicas, aplicação de questionários e simulações da situação original do escritório.

Teve-se como objetivo do estudo piloto avaliar e aperfeiçoar o método de obtenção e análise dos dados a ser utilizado neste trabalho de tese.



Fotografia 5. Vista geral do escritório utilizado no estudo piloto. Fonte: Autor.

Durante o estudo, foram realizadas medições acústicas do nível de pressão sonora, tempo de reverberação e índice de transmissão da fala. Essas medições foram úteis para aperfeiçoar o método de medição e adquirir maior familiaridade a ele, reduzindo erros e tempo de execução durante o trabalho em campo.

Foram aplicados questionários aos usuários desse escritório a fim de validar os questionários, verificar o retorno e estudar a forma de análise dos dados. Verificou-se que os questionários poderiam ser aplicados e que trariam dados complementares às análises objetivas, mas que não seriam o ponto principal do trabalho final.

Além de estudos em campo, foram realizadas simulações computacionais. Os parâmetros simulados foram o T_r e o STI. Durante as simulações verificou-se a dificuldade de calibração do modelo e a necessidade de aprofundamento bibliográfico sobre o assunto. Além disso, viu-se que a calibração do modelo é apenas uma parte do trabalho de simulação, sendo o estudo de modificações no ambiente para a avaliação dessas no comportamento acústico de escritórios panorâmicos parte principal do trabalho de tese. Assim, a revisão bibliográfica foi intensificada e novos parâmetros para avaliação de escritórios panorâmicos encontrados, r_D e DL_2 . Além disso, o trabalho foi aumentando, conferindo importância a simulações dos escritórios com alterações arquitetônicas e de ruído ambiente.

Outro ponto levantado durante o projeto piloto foi a possibilidade de criar categorias acústicas de escritórios panorâmicos conforme algumas propriedades acústicas e arquitetônicas. Gerando assim o problema de pesquisa e objetivo deste trabalho.

3.2 Objeto de Estudo

Como objeto de estudo deste trabalho, cinco escritórios panorâmicos foram selecionados. Esses escritórios estão localizados na capital do estado do Paraná, Curitiba, e região metropolitana.

Os escritórios selecionados apresentam volumes e características arquitetônicas diferenciadas. Essa heterogeneidade foi útil para avaliar a influência desses parâmetros no ambiente acústico dos escritórios. Como pré-requisito para a seleção, o local deveria ser caracterizado como um escritório panorâmico. Assim, optou-se por escritórios amplos, com divisórias a meia altura ou sem divisórias, que abrigassem mais que 50 estações de trabalho. A tabela a seguir apresenta as características principais de cada escritório estudado.

Tabela 12. Características principais dos escritórios panorâmicos estudados.

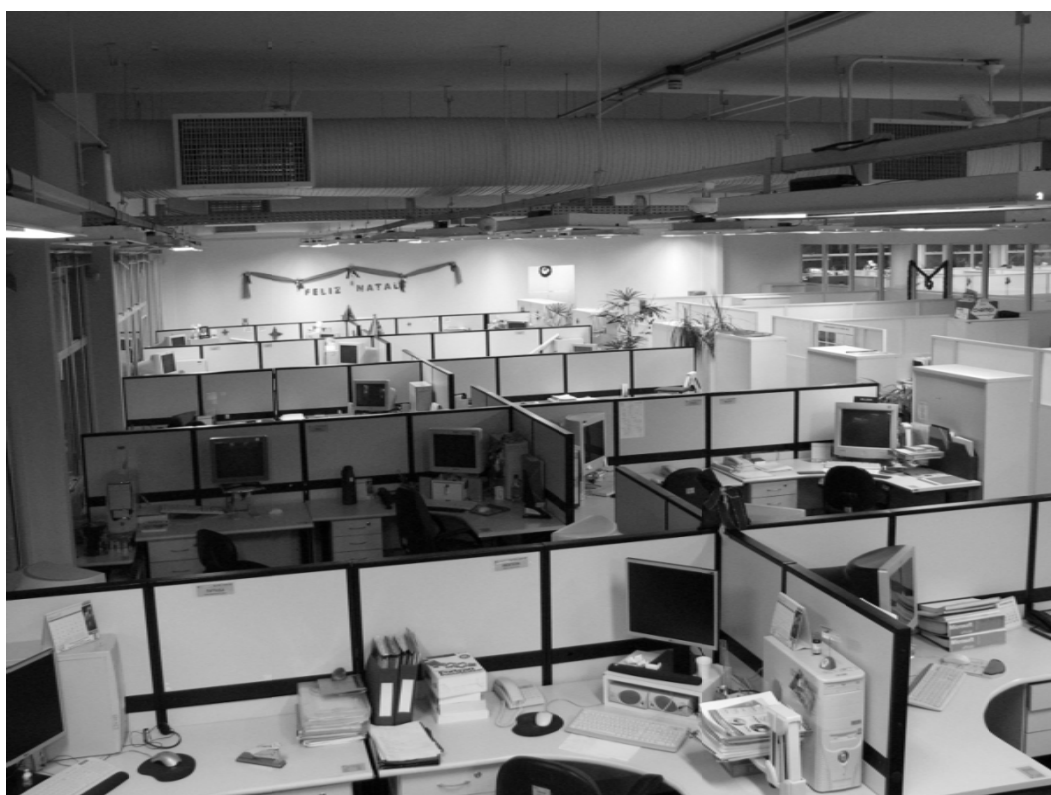
Características	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
Área (m ²)	613,03	1324,40	902,38	162,00	808,91
Volume (m ³)	1716,48	4922,02	2973,54	437,40	2022,28
Nº de estações de trabalho	147	242	117	62	109
Densidade (estações/m ²)	0,24	0,18	0,13	0,14	0,13
Pé-direito dominante (m)	2,80	3,60	2,80	2,70	2,50
Material do teto (1)	0,49	0,02	67% (2): 0,02 22% (2): 0,10	0,49	0,61
Material do piso (1)	85% (2): 0,18 15% (2): 0,01	0,18	11% (2): 0,49 86% (2): 0,31 14% (2): 0,03	0,03	89% (2): 0,03 11% (2): 0,31
Altura das divisórias entre estações (m)	-	1,30	1,15 (3)	1,20 (4)	-
Material das divisórias entre estações (1)	-	0,16	0,16	0,07	-

Fonte: Autor

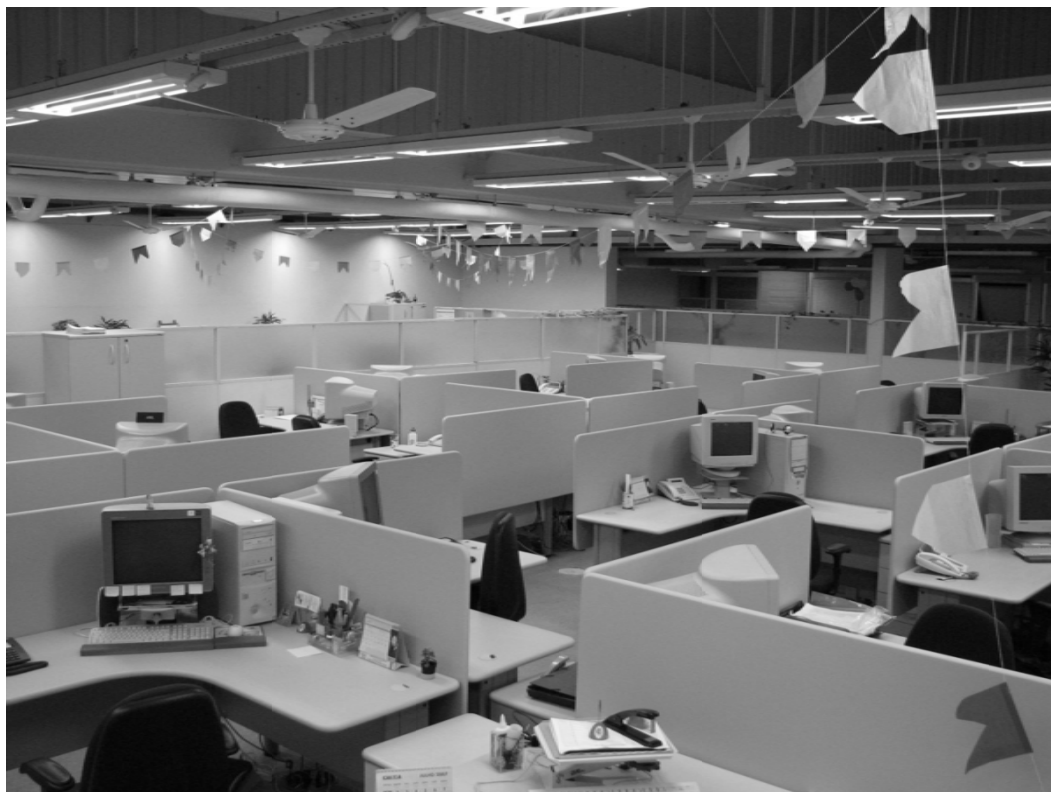
(1) α médio entre as frequências em banda de oitava de 125 a 4000 Hz. (2) Porcentagem da área total do piso ou teto coberta com material com tal α . (3) Apenas em algumas estações de trabalho, em outras estações não havia divisórias. (4) Divisória parcial, ocupando aproximando 1/3 da linha divisória entre as estações (fotografia 9).



Fotografia 6. Vista geral do escritório 1. Fonte: Autor.



Fotografia 7. Vista geral do escritório 2. Fonte: Autor.



Fotografia 8. Vista geral do escritório 3. Fonte: Autor.



Fotografia 9. Vista geral do escritório 4. Fonte: Autor.



Fotografia 10. Vista geral do escritório 5. Fonte: Autor.

3.3 Resposta Subjetiva

A fim de obter a impressão dos usuários em relação às condições acústicas do seu ambiente de trabalho, foram aplicados questionários.

O questionário foi dividido em três partes. A primeira parte apresenta perguntas pessoais, como idade, sexo, local onde trabalha e tempo de trabalho em escritórios panorâmicos. A segunda tem por objetivo caracterizar o trabalho realizado pelo questionado, principalmente no que diz respeito ao nível de concentração necessário para realização das tarefas e necessidade de integração com outros colegas. Já a terceira parte, a mais longa delas, faz menção ao incômodo provocado por diferentes tipos de fonte, ao sentimento do trabalhador em relação ao ambiente acústico e a quanto o ruído atrapalha as suas atividades no trabalho.

A maioria das questões é objetiva, o que facilita a análise e reduz o tempo necessário para cada trabalhador responder ao questionário. Somente algumas questões da primeira parte são subjetivas. As questões objetivas apresentam uma escala de 0 a 4, onde 0 representa nada

e 4 representa muito. Essa escala de cinco pontos foi utilizada por Helenius et al. (2007) para a avaliação das condições térmicas e acústicas em escritórios. Assim como no trabalho realizado por Helenius et al. (2007), neste trabalho, os resultados dessas questões foram apresentados através de médias aritméticas e desvios padrões. O questionário aplicado encontra-se no apêndice A.

Os questionários foram distribuídos para todos os trabalhadores presentes dos cinco escritórios. Após aproximadamente duas horas os questionários preenchidos pelos próprios colaboradores eram recolhidos. Optou-se por esse método, do questionado ler as perguntas e ele mesmo preencher as respostas, para o preenchimento dos questionários provocar pouca interferência no trabalho que estava sendo realizado no escritório e para o pesquisador não interferir nas respostas dos questionados.

Em relação ao número de estações de trabalho, o número de questionários respondidos corresponde a 48% a 78% do número total. Considerando que nem todas as estações de trabalho estavam ocupadas, estima-se que os questionários atingiram na média aproximadamente 70 % da população dos cinco escritórios.

3.4 Medição no local

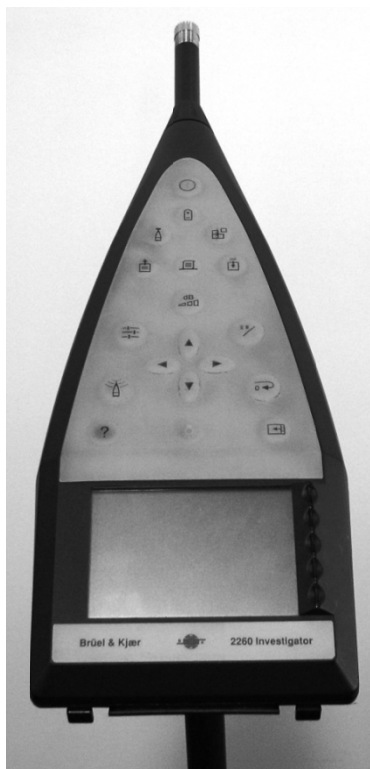
Para esta pesquisa, foram realizadas medições acústicas do nível de pressão sonora (NPS) tempo de reverberação (T_r) e do índice de transmissão da fala (STI) nos escritórios panorâmicos selecionados. As medições foram divididas em duas etapas. A primeira etapa foi realizada durante o horário normal de trabalho e o dado acústico obtido foi o NPS. Já a segunda etapa foi realizada após o expediente de trabalho ou finais de semana. Nessa etapa foi medido o tempo de reverberação e o índice de transmissão da fala.

3.4.1 Nível de Pressão Sonora

A medição do NPS teve por objetivo coletar dados do ruído ambiente do escritório durante o horário normal de trabalho. Os parâmetros medidos foram:

- a) nível de pressão sonora sem ponderação, em banda de oitava de 63 a 8000 Hz;
- b) nível de pressão sonora equivalente ponderado em A (LA_{eq})

Para a medição do nível de pressão sonora foi utilizado o analisador acústico modelo 2260 da empresa dinamarquesa Brüel e Kjaer. Conforme classificação da norma ANSI S1.4-1983 esse analisador pode ser considerado classe 1. Antes do início e após o término das medições o analisador foi calibrado, garantindo a precisão dos resultados.



Fotografia 11. Analisador acústico modelo BK 2260. Fonte: Autor.

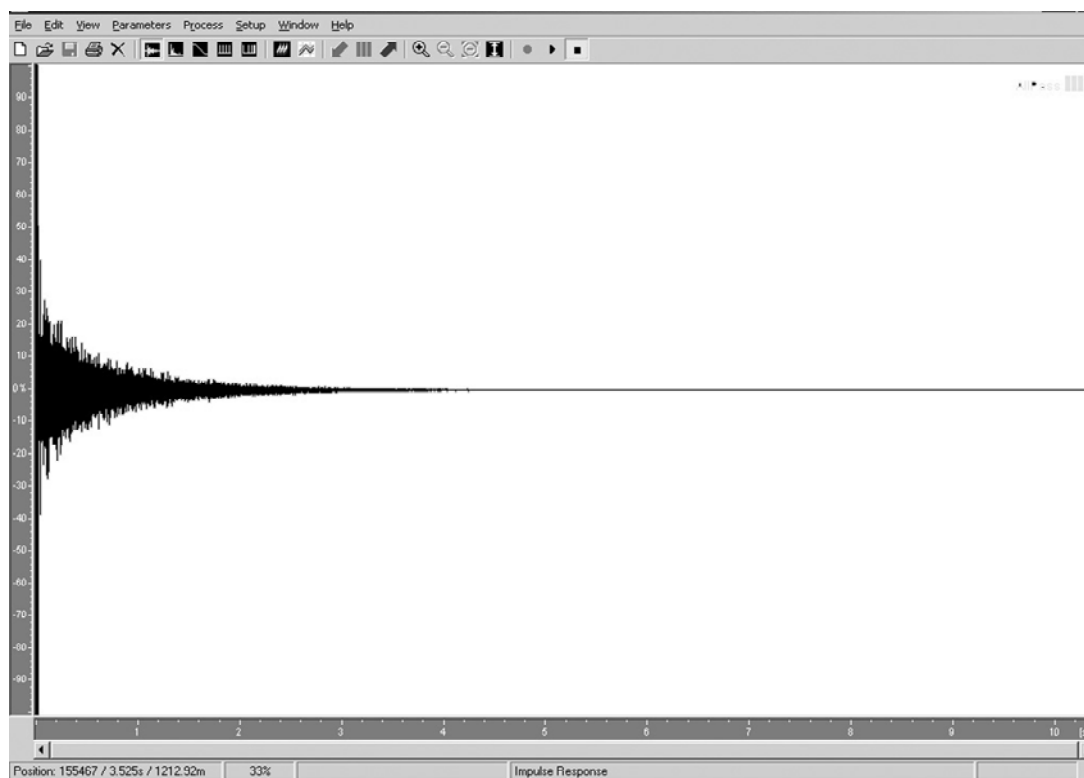
O tempo de medição em cada ponto foi de 5 minutos e os pontos foram selecionados de forma a abranger toda a extensão dos escritórios. Após a medição, em laboratório, os dados foram transferidos para o computador e foi realizada uma média espacial de todos os pontos medidos, para cada um dos parâmetros. Para isso foi utilizado o programa computacional Evaluator Type (Brüel e Kjaer 7820).

Os valores médios obtidos do nível de pressão sonora, sem ponderação e em banda de oitava, foram utilizados como ruído de fundo para o cálculo do STI. Já os valores médios de LA_{eq} foram utilizados para comparação com legislação pertinente.

Todas as medições do nível de pressão sonora foram realizadas seguindo o prescrito na norma NBR 10151 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

3.4.2 Tempo de reverberação

Na medição do tempo de reverberação foi utilizado o software Dirac 3.1 (Brüel e Kjaer 7841). Esse software calcula os parâmetros acústicos através da resposta impulsiva da sala a um ruído gerado em seu interior.



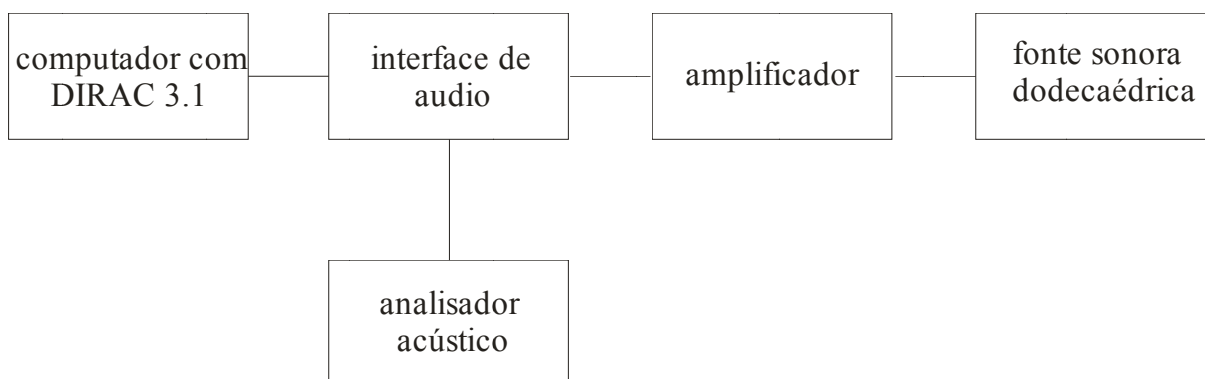
Retrato 1. Resposta impulsiva no software Dirac 3.1. Fonte: Autor.

Além do software Dirac 3.1, instalado em um computador portátil (Toshiba), foram utilizados os seguintes equipamentos para as medições:

- a) interface de áudio (Fireface 800);
- b) amplificador sonoro (Brüel e Kjaer 2716);
- c) fonte sonora dodecaédrica (Brüel e Kjaer 4296);
- d) analisador acústico (Brüel e Kjaer 2260).

A medição prosseguiu da seguinte forma: um sinal foi gerado pelo Dirac 3.1, esse sinal passou pela interface de áudio e foi amplificado pelo amplificador de potência e então distribuído pela sala através da fonte dodecaédrica, considerada uma fonte onidirecional. Então, ocorreu a captação da resposta impulsiva da sala a esse sinal através do microfone, conectado ao analisador acústico. Esse analisador estava conectado à interface de áudio, a

qual transferiu a resposta da sala ao computador para que, finalmente, o Dirac 3.1 pudesse processá-la e calcular os parâmetros acústicos desejados.



Esquema 1. Medição do tempo de reverberação. Fonte: Autor.



Fotografia 12. Fonte dodecaédrica (Brüel e Kjaer 4296). Fonte: Autor.

Optou-se, para a excitação da sala, o ruído do tipo varredura logarítmica, pois esse sinal permite isolar a resposta impulsiva das componentes causadas por não-linearidades (MASIERO; IAZZETTA, 2005). Assim, a utilização desse sinal apresentou bons resultados no que diz respeito ao aumento da relação sinal-ruído (PAULO, MARTINS, COELHO,

2005). Esse aumento da relação sinal-ruído foi de grande importância, pois, para se obter o T_{20} , a relação sinal-ruído deve ser no mínimo de 35 dB, já para o T_{30} , essa relação deve ser no mínimo de 45 dB (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006). Procurou-se em todas as medições do tempo de reverberação obter o T_{30} , ou seja, buscou-se uma relação sinal-ruído de no mínimo 45 dB. Para se obter essa relação com maior facilidade, sem necessitar de potência em excesso na fonte, as medições ocorreram fora do horário de expediente. Em todas as medições verificou-se a relação sinal-ruído e se essa fosse inferior a 45 dB entre as frequências em banda de oitava de 125 a 4000 Hz, a medição era repetida com alguma modificação, por exemplo, alteração do local do microfone ou mudança da intensidade sonora da fonte.

Um parâmetro que deve ser ajustado na medição é o comprimento da resposta impulsiva. Esse deve ser o mais próximo do tempo de reverberação, mas não pode ser inferior a ele. Caso o comprimento da resposta impulsiva não seja corretamente ajustado, a medição pode ser comprometida. Esse comprometimento é percebido na baixa relação sinal-ruído da medição.

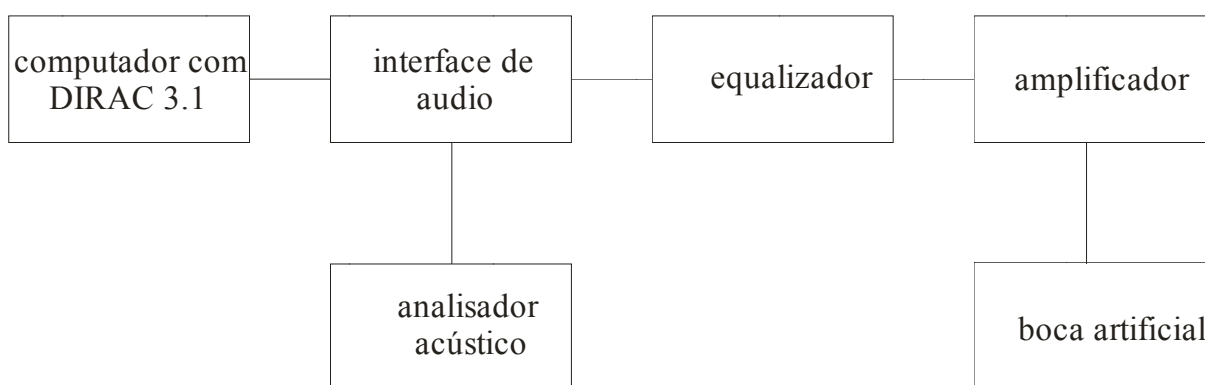
Em relação ao posicionamento e número de pontos de fonte e receptor, foi seguido o estabelecido pela norma ISO/DIS 3382-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006). Essa norma exige um mínimo de duas posições de fonte e três de receptor. A altura utilizada para todas as posições de fonte foi de 1,50 m e para as posições de microfone, de 1,20 m.

Observando-se que os materiais das superfícies eram, em termos das suas propriedades de absorção e difusão, uniformemente distribuídos nos escritórios; e que todas as partes do volume das salas se comunicam razoavelmente bem, após as medições, foram realizadas as médias espaciais dos pontos medidos em cada escritório. Essa média espacial, número único para cada frequência em banda de oitava de 125 a 4000 Hz, obtido para cada escritório, foi alcançada através de uma média aritmética dos tempos de reverberação individuais para todas as posições de microfone. O desvio padrão foi determinado para verificar a variação espacial do tempo de reverberação dentro de cada escritório (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006).

3.4.3 Índice de transmissão da fala

Assim como as medições de T_r , as medições do STI foram realizadas fora do horário de expediente. Isso para que essas medições tivessem menor influência do ruído de fundo.

Para a medição do STI foram utilizados praticamente os mesmos equipamentos utilizados para a medição do T_r . Apenas a fonte dodecaédrica foi substituída pela boca artificial (Brüel e Kjaer 4227) e ocorreu a inclusão de um equalizador (Behringer FBQ 800) de nível de pressão sonora por frequência em banda de oitava.



Esquema 2. Medição do índice de transmissão da fala. Fonte: Autor.



Fotografia 13. Boca artificial (Brüel e Kjaer 4227). Fonte: Autor.

Tais alterações nos equipamentos foram realizadas por prescrição da norma IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003). Essa norma estabelece que deve ser utilizada como fonte sonora uma boca artificial ou um alto-falante com no máximo 10 cm de diâmetro. Segundo Bozzoli, Viktorovitch e Farina (2005), a boca artificial produzida pela empresa Brüel e Kjaer apresentou bons resultados de diretividade quando comparada à boca humana.

Os níveis sonoros do sinal utilizado, em todas as frequências de 125 a 8000 Hz devem estar ajustados para que as diferenças entre eles sejam inferiores a ± 1 dB. (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003), por isso a necessidade do equalizador sonoro.

Para a medição do STI, primeiramente, foi realizada a equalização do sinal. Para isso, o computador com o software Dirac 3.1 foi conectado à interface de áudio e essa, por sua vez, conectou-se ao restante dos equipamentos. À interface de áudio foi conectado o equalizador e a esse o amplificador de potência, conectado a fonte sonora. O sinal do tipo “rosa+azul” foi gerado pelo Dirac 3.1, passou pelo equalizador, amplificador e foi emitido pela boca artificial. A equalização foi ajustada observando-se os valores medidos no analisador acústico, o qual faz a leitura em todas as frequências em tempo real. Esse analisador estava distante um metro da fonte. Então, ajustou-se o ganho no equalizador para cada uma das frequências centrais de 125 a 8000 Hz em banda de oitava. O sinal foi considerado aceitável quando os níveis estavam com diferenças próximas ou inferiores a ± 1 dB. Observou-se grande dificuldade de realizar essa equalização, pois havia a interferência do ruído de fundo o qual era bastante irregular.

Realizada a equalização do sinal, o ruído foi alterado para o tipo seqüência de máximo comprimento (MLS) com um filtro da fala masculina. Esse filtro é uma ponderação em frequência, prescrito pela norma IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003) que já estava gravado no próprio Dirac 3.1. Com esse sinal foi realizada a calibração do nível sonoro. Para isso, foi mantida a distância de 1 metro entre fonte e receptor e o nível de pressão sonora equivalente com ponderação em A foi ajustado em $LA_{eq} = 65$ dB .

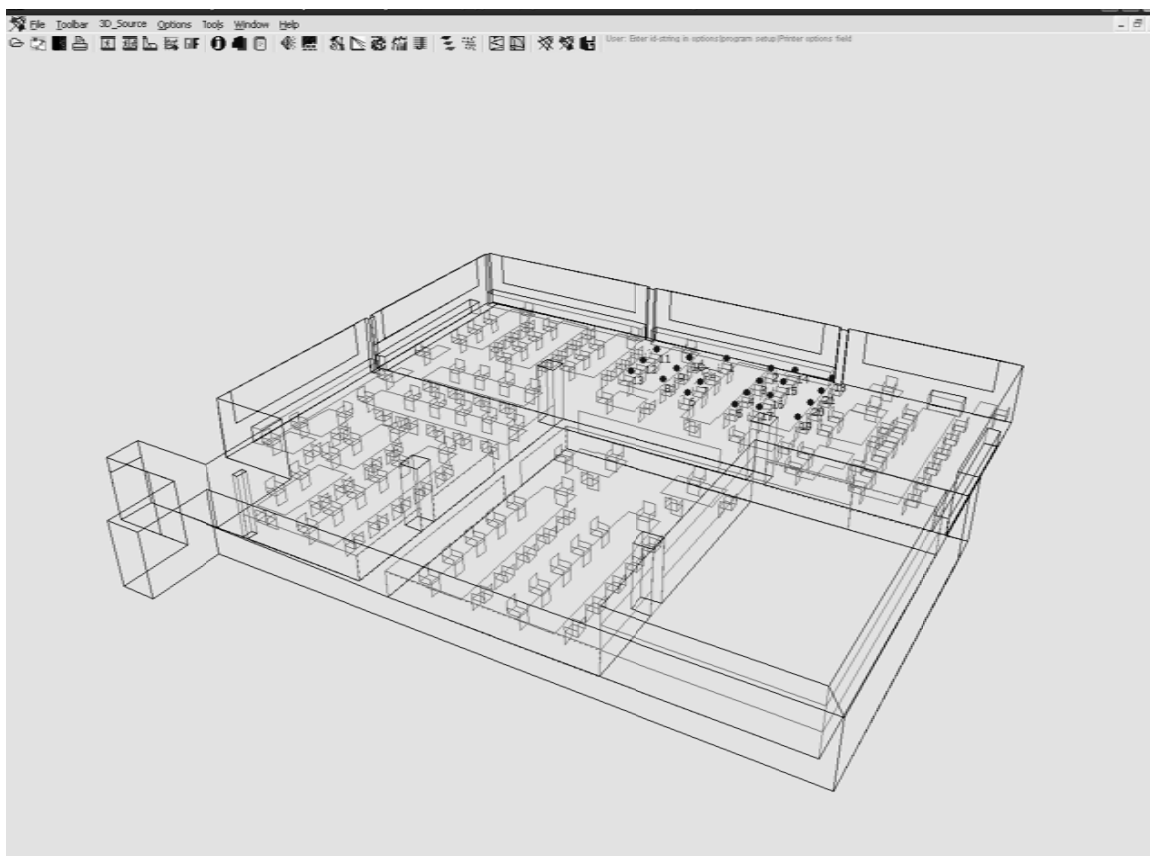
Após essas calibrações, foram iniciadas as medições do STI propriamente ditas. Em relação ao posicionamento de fonte e receptor a norma IEC 60268-16 estabelece apenas que devem estar na posição de ouvinte e orador. Como em escritórios panorâmicos todos os trabalhadores são ouvintes e todos são oradores, para cada posição de fonte estabelecida,

várias posições de receptor foram avaliadas. Com isso, foi possível avaliar a interferência desse orador sobre os ouvintes que estão em sua proximidade. Todos os outros oradores foram considerados como ruído de fundo e inseridos na simulação do STI, após a calibração utilizando os dados medidos desse parâmetro, através da inserção do ruído ambiente medido durante o horário de expediente.

A altura da fonte e receptor foi aquela considerada pela norma ISO/DIS 3382-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006) dos ouvidos de uma pessoa sentada, 1,20 m. A direção da fonte e receptor foi a de trabalho, ou seja, de frente para o monitor do computador do posto de trabalho que se estava avaliando. Como a fonte utilizada na medição não é onidirecional, sua direção altera os resultados da medição.

3.5 Simulação Computacional

As simulações computacionais foram realizadas através do software Odeon 9.0. Esse software utiliza o método híbrido, no qual as reflexões recentes são calculadas utilizando uma combinação do método de imagem da fonte e raios espalhados iniciais. Após a ordem de transmissão (TO), as reflexões são calculadas utilizando o método de traçado de raios.



Retrato 2. Área de trabalho do software Odeon 9.0. Fonte: Autor.

As simulações foram divididas em três etapas:

- a) calibração do modelo;
- b) simulação das situações reais dos escritórios;
- c) simulações dos ambientes com alterações arquitetônicas.

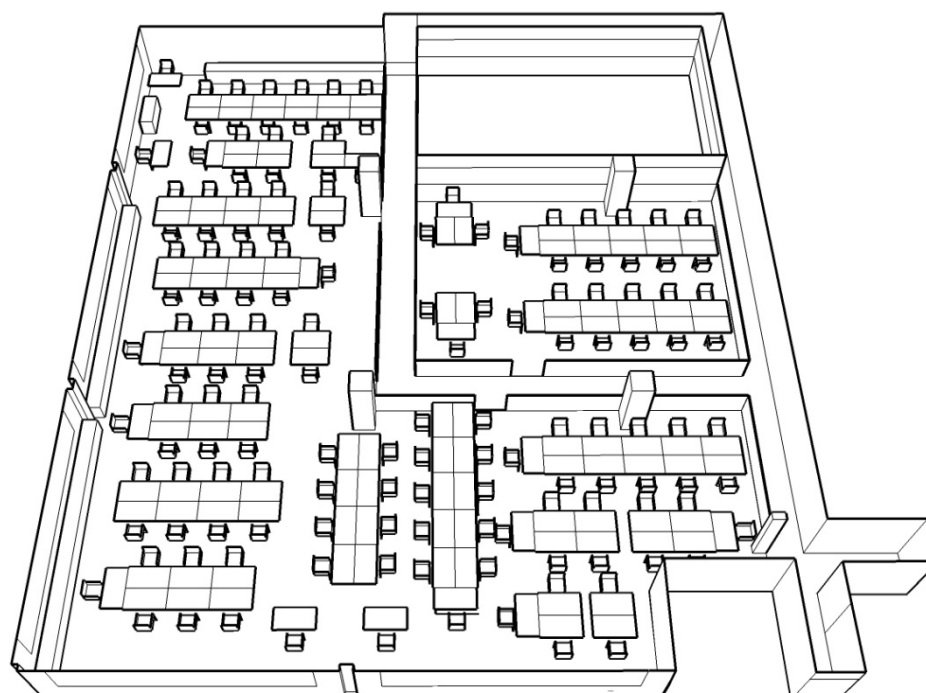
Nas etapas “a” e “b” foram simulados os cinco escritórios, já na etapa “c”, desses cinco, foram simulados três. O critério de seleção desses três escritórios foi o volume. Optou-se por avaliar escritórios com volumes bastante distintos a fim das dimensões dos escritórios constar como uma variável na análise das simulações. Assim, nessa etapa foram simulados o escritório 1, com 1716,48 m³; o escritório 2, com 4922,02 m³; e o escritório 4, com 437,40 m³. Os escritórios 3 e 5 não foram simulados nessa etapa, pois apresentavam volumes semelhantes ao volume do escritório 1.

Na calibração do modelo, os parâmetros simulados foram o T_r e o STI. Os valores desses parâmetros simulados foram comparados aos valores medidos. Já nas etapas “b” e “c”, além do T_r e do STI, foi simulado o DL_2 .

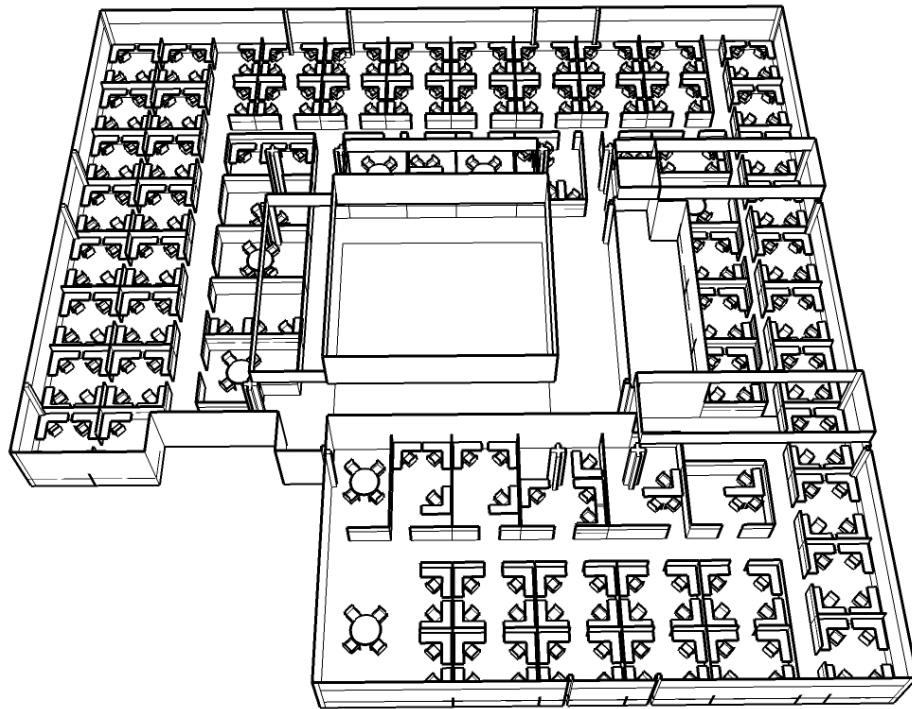
Para a simulação dos parâmetros acústicos, foi necessário, primeiramente, modelar os escritórios em três dimensões. Para isso, foi utilizado o programa computacional SketchUp 6 (Google). Os elementos modelados foram os seguintes: paredes, divisórias, piso, teto e

mobiliário. O mobiliário foi modelado de forma simplificada, pois, segundo Bork (2000), uma resolução geométrica muito elevada pode reduzir a precisão de cálculo. Além disso, em estudo realizado por Naylor e Rindel (1992) utilizando o software Odeon, os autores observaram que se deve evitar superfícies muito pequenas e desnecessárias, ao invés disso, deve-se optar por uma aproximação geral das formas do ambiente.

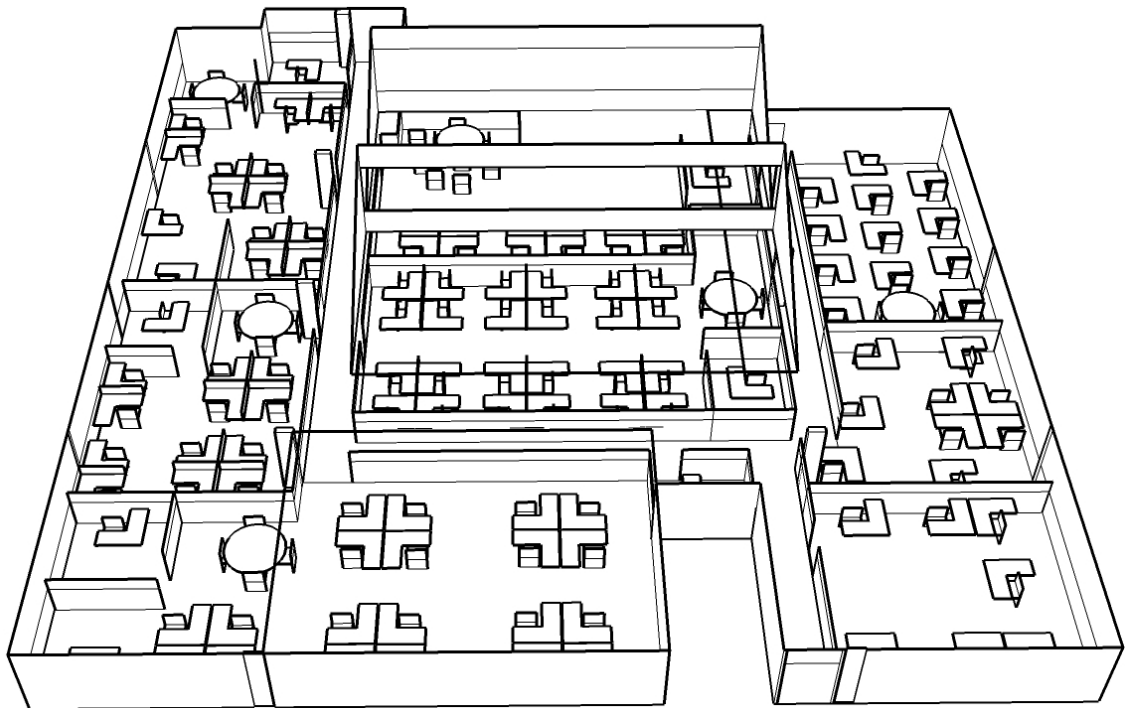
Os modelos em três dimensões foram realizados com base nos projetos fornecidos pelas empresas que utilizavam os escritórios selecionados e por observações feitas nos locais.



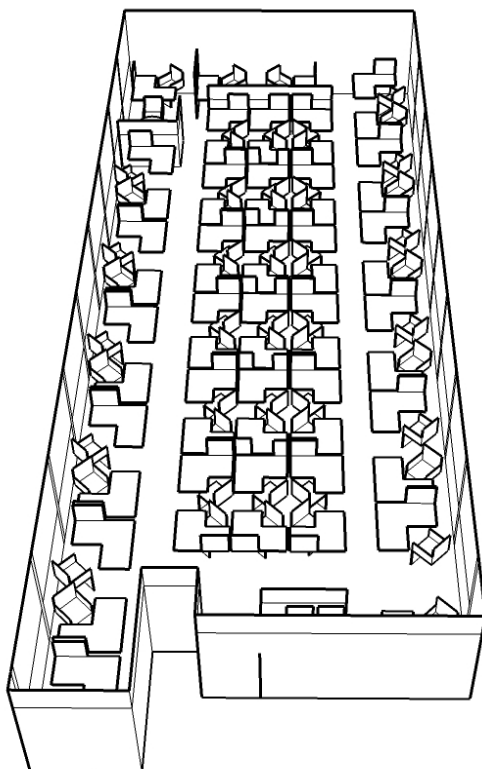
Desenho 9. Modelagem em 3D escritório 1. Fonte: Autor.



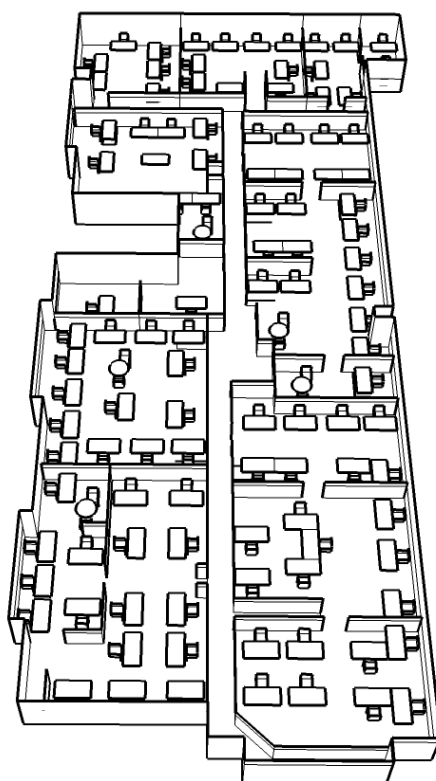
Desenho 10. Modelagem em 3D escritório 2. Fonte: Autor.



Desenho 11. Modelagem em 3D escritório 3. Fonte: Autor.



Desenho 12. Modelagem em 3D escritório 4. Fonte: Autor.



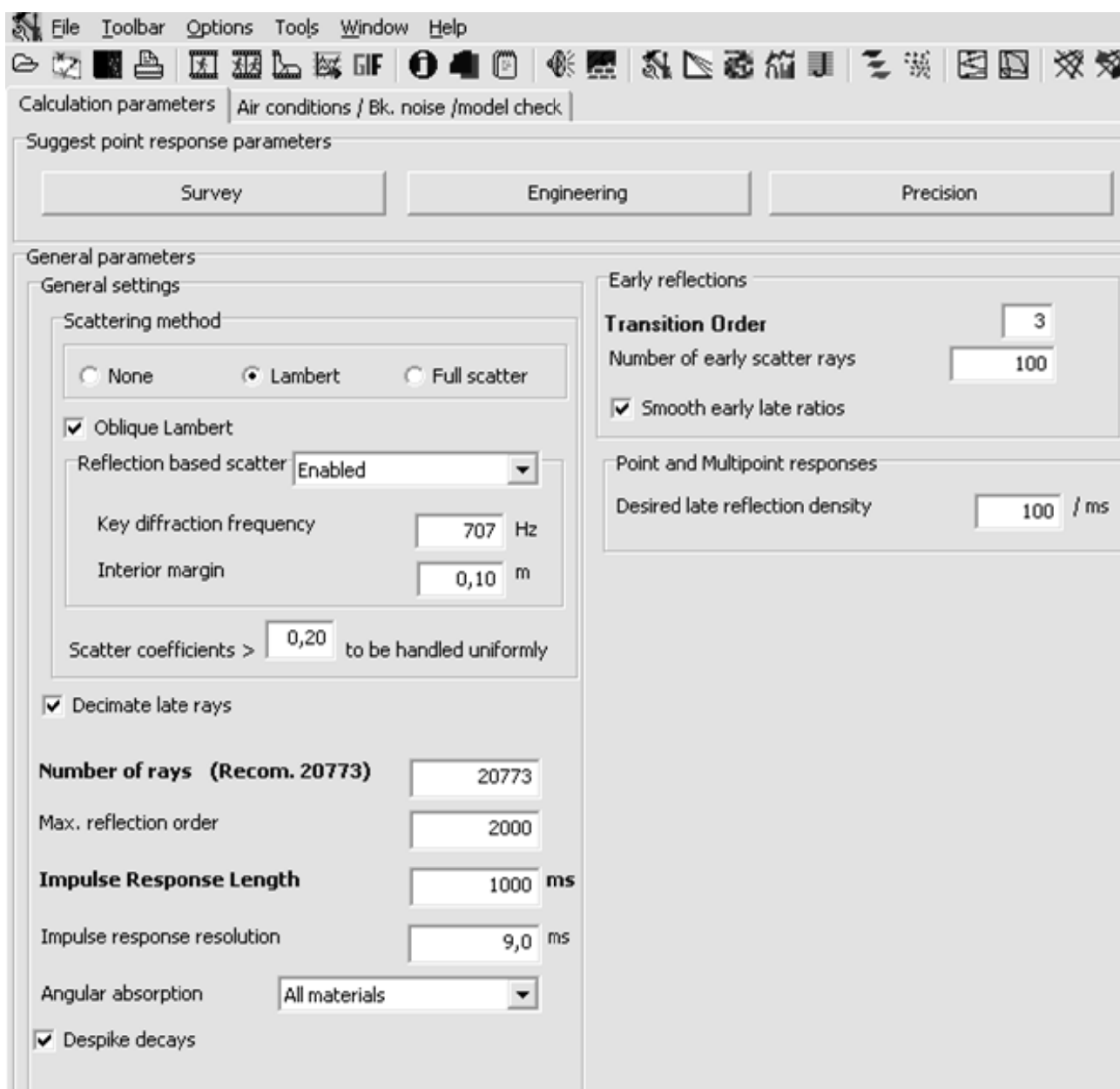
Desenho 13. Modelagem em 3D escritório 5. Fonte: Autor.

Para a simulação no Odeon 9.0, o modelo deve ser “aceito” por esse software. Assim, a sala foi modelada com certas particularidades. Por exemplo, o modelo deveria ser composto de superfícies, e não de sólidos, além disso, nenhuma superfície poderia estar sobreposta à outra. Ainda, para facilitar no momento da escolha de materiais, as superfícies foram divididas em grupos de mesmo material.

Após o aceite do modelo pelo Odeon 9.0, iniciou-se a simulação propriamente dita. Para se obter uma simulação precisa, era de grande importância a utilização de parâmetros de cálculo adequados. A maioria dos parâmetros de cálculo foi definida pelo próprio Odeon 9.0, restando a escolha parâmetros essenciais, como os materiais das superfícies (α), coeficientes de difusão das superfícies (δ), definições de fonte e receptor (localização e características), entre outros.

Um parâmetro muito importante que deve ser sempre especificado pelo usuário é o comprimento da resposta impulsiva. Esse comprimento deve cobrir pelo menos 2/3 da curva de decaimento, ou seja, ser próximo ao tempo de reverberação estimado. Assim, através dos valores medidos de T_r , foi especificado o comprimento da resposta impulsiva para cada escritório.

A maioria dos valores sugeridos para os parâmetros na página de “ajustes da sala” no Odeon 9.0 é considerada segura, isso se não existirem demandas especiais e se o modelo não tiver salas acopladas ou distribuição muito irregular da absorção. Quando existirem tais demandas, é aconselhável aumentar o número de raios emitidos e desativar a opção de “raios posteriores dizimados”. Essa opção traça um número menor de raios que foi especificado, mas ainda um número suficiente para proporcionar boa estimativa do ambiente de reverberação (CHRISTENSEN, 2003). A razão de se fazer isso é para o cálculo tornar-se mais rápido sem comprometer a resolução das reflexões recentes e gerar arquivos de histórico de raios menores. Para Bork (2000), a fim de alcançar um resultado num tempo hábil, o usuário deve otimizar os parâmetros de cálculo. Assim, nas simulações dos escritórios, foi mantido o número de raios emitidos indicado pelo Odeon 9.0. Para cada escritório, conforme o volume e número de superfícies, o software calculou o número de raios. Em todas as simulações foi ativada a opção “raios posteriores dizimados”.



Retrato 3. Página de “ajuste da sala” no software Odeon 9.0. Fonte: Autor.

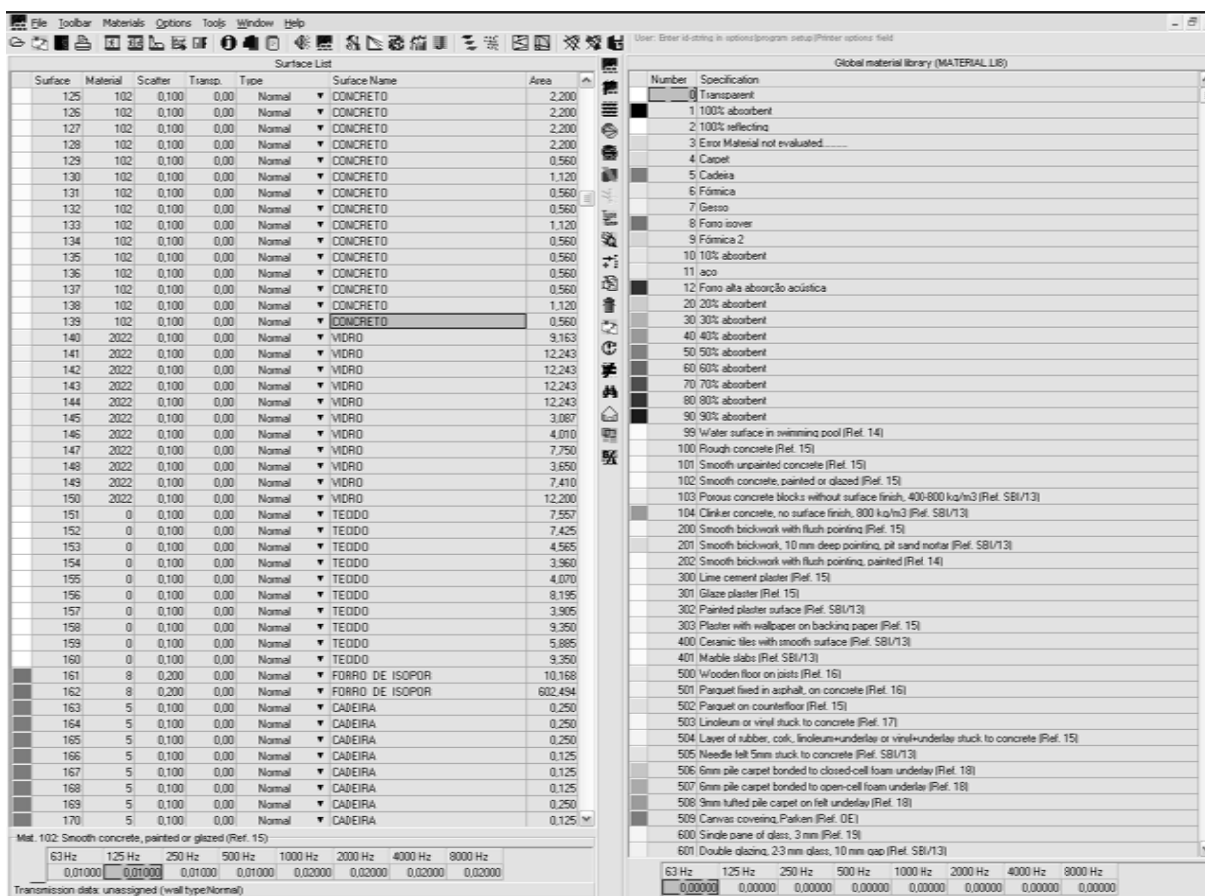
Outro parâmetro de cálculo que deve ser escolhido pelo usuário é o método de espalhamento. Para Rindel (2000) a atribuição de coeficientes de espalhamentos a superfícies em simulações computacionais se mostrou essencial para a obtenção de resultados confiáveis. Assim, optou-se pelo método de espalhamento de Lambert para todas as simulações neste trabalho, (retrato 3).

No Odeon 9.0, o coeficiente de espalhamento estipulado para uma superfície particular é válido para todas as frequências. Durante a calibração dos modelos foram realizadas experimentações com diferentes coeficientes de espalhamento. Após o modelo calibrado, para as outras simulações, os coeficientes de espalhamento de todas as superfícies

foram mantidos. No caso de inserção de novas superfícies, foi atribuído a essas o coeficiente de espalhamento da maioria das superfícies existentes no modelo.

Além do coeficiente de espalhamento, devem ser atribuídos a cada superfície coeficientes de absorção. Esses coeficientes são inseridos no Odeon 9.0 para cada frequência em banda de oitava de 63 a 8000 Hz. A incerteza na escolha dos coeficientes de absorção é um fator de erro muito comum nas simulações computacionais. Isso ocorre tanto por falta de precisão na medição dos dados de absorção ou por haver erros na seleção do material construtivo no momento da simulação. Assim, é aconselhável que os coeficientes incertos dos materiais sejam ajustados até que a simulação tenha valores próximos àqueles encontrados na medição (CHRISTENSEN, 2003). As propriedades de absorção dos materiais contidas na biblioteca do Odeon 9.0 podem ser consideradas confiáveis segundo seu autor (CHRISTENSEN, 2003). Para este trabalho, para a maioria dos materiais que compõe os escritórios, foram utilizados os coeficientes de absorção existentes na biblioteca do Odeon 9.0. Foram selecionados os materiais com descrição semelhante aos materiais existentes no escritório. Durante a calibração do modelo, alguns materiais, e seus coeficientes de absorção, foram substituídos por outros semelhantes a fim de se obter resultados próximos aos medidos. Assim como para os coeficientes de espalhamento, uma vez o modelo calibrado, os coeficientes de absorção foram mantidos para as outras simulações. Somente os materiais substituídos (materiais do teto, divisórias e piso) para verificação do comportamento do som no interior das salas, tiveram seus coeficientes de absorção alterados nas simulações realizadas após a calibração.

Os coeficientes de absorção e espalhamento são especificados na “lista de materiais” no Odeon 9.0.



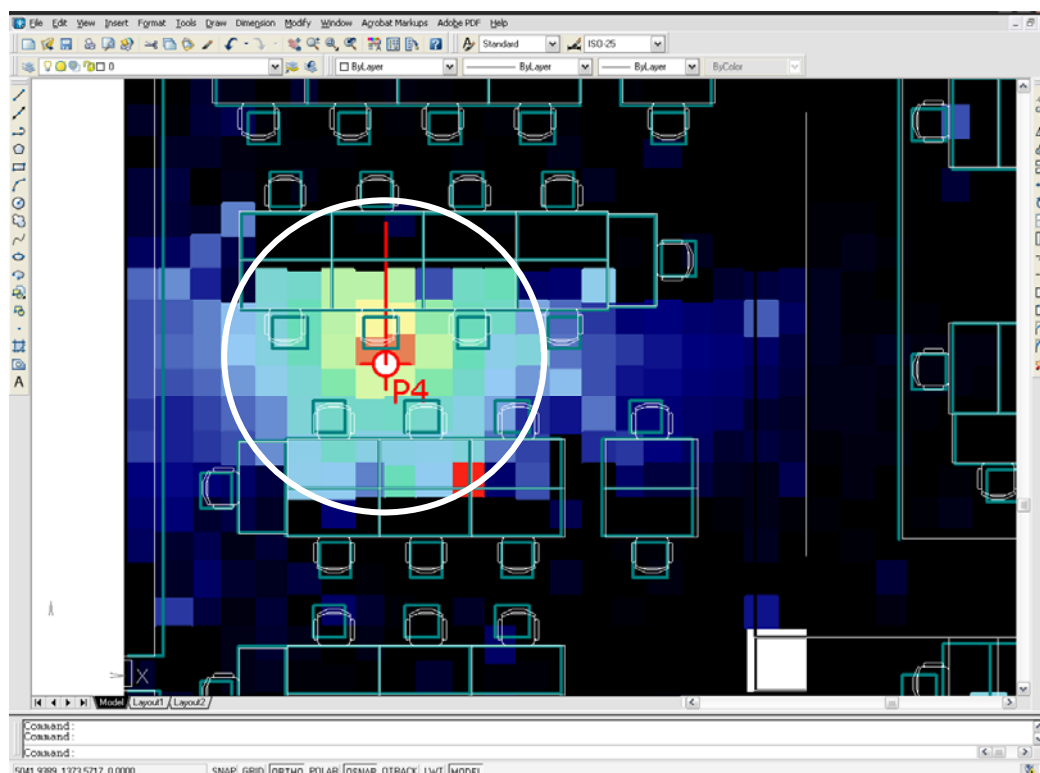
Retrato 4. “Lista de materiais” no software Odeon 9.0. À esquerda está a lista com os materiais existentes na sala simulada, à direita está a biblioteca com coeficientes de absorção para diversos materiais. Fonte: Autor.

Esse procedimento de alteração dos coeficientes de espalhamento e absorção dos materiais e comparação dos valores simulados com valores dos mesmos parâmetros medidos faz parte da calibração do modelo computacional. Segundo Katz e Wetherill (2007), o procedimento de calibração em simulações significa o refinamento das propriedades acústicas dos materiais.

Em relação ao posicionamento de fonte e receptor, durante as calibrações, esses foram locados nos mesmos pontos das medições. A escolha do local e o número de posições seguiram o prescrito pela norma ISO/DIS 3382-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006).

Após as calibrações, ainda com a condição real do ambiente, foram realizadas simulações com receptores em malha. Essas simulações visaram uma maior precisão dos parâmetros e uma comparação mais adequada dos valores obtidos com essas simulações aos obtidos com as simulações posteriores, com alterações no ambiente. Para as simulações do T_r com receptores em malha, a fonte foi locada em duas posições (INTERNATIONAL

ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006) e os receptores em uma malha quadrangular de 0,50 m X 0,50 m. Após a simulação, o próprio Odeon 9.0 realizou a média de todos os pontos simulados, por frequência em banda de oitava de 125 a 4000 Hz. Para as simulações do STI com receptores em malha, a fonte foi locada em uma posição, posto de trabalho de um orador, e os receptores na mesma malha de 0,50 m X 0,50 m. Após a simulação, através do grid calculado, foi obtido o raio de distração (r_D). Esse raio foi obtido com o auxílio do software AutoCad (Autodesk). Os grids calculados nas simulações com o Odeon 9.0 foram transferidos para o AutoCad, nesse programa foi desenhado um círculo nos pontos em que o STI fosse igual a 0,5. Adotou-se como critério que dentro do círculo o STI poderia ser menor que 0,5, mas fora desse círculo não poderia ser maior que 0,5. Obtido o círculo, seu raio foi medido no próprio AutoCad, retrato 5, e o seu valor arredondado para múltiplos de 0,50 m, que equivale à medida da malha de receptores do STI especificada no Odeon 9.0. Optou-se por esse parâmetro, pois ele gera um valor único, sendo independente da posição do receptor na sala, ao contrário do STI. Entretanto, além da discussão do r_D obtido, o grid do STI também foi analisado, pois revela dados importantes do comportamento do som no interior da sala.

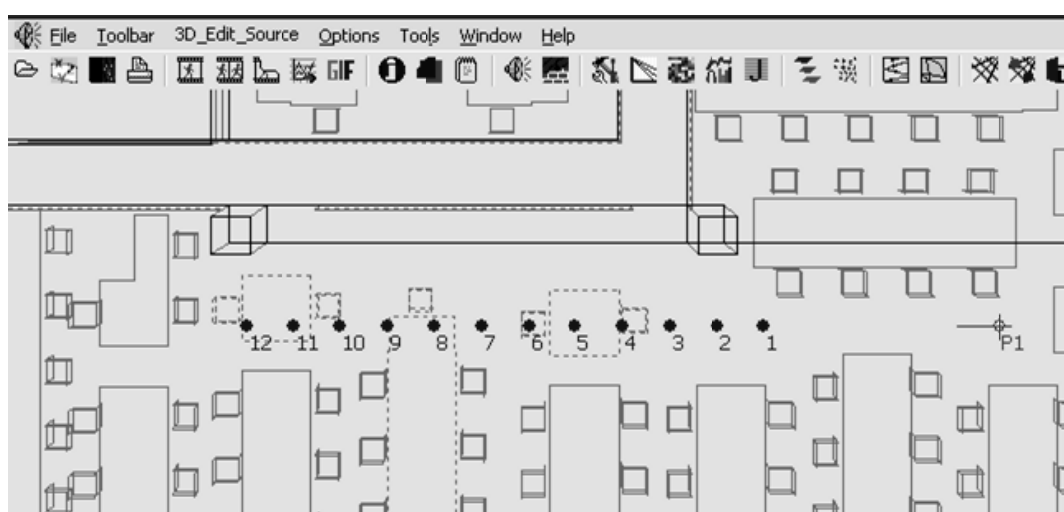


Retrato 5. Raio de distração obtido através do software AutoCad. O raio do círculo branco é o raio de distração, P4 é a fonte sonora e a cor verde no grid representa STI= 0,5 (Odeon 9.0). Fonte: Autor.

O terceiro parâmetro simulado foi o DL_2 . O Odeon 9.0 calcula o DL_2 para cada banda de frequência de 63 Hz a 8kHz e o DL_{2,C_0} , que é a taxa de decaimento com ponderação em A para as frequências de 125 a 4000 Hz. Para a análise dos dados, neste trabalho foi utilizado apenas o DL_{2,C_0} , pois apresenta os resultados de redução do ruído pela distância através de um número único.

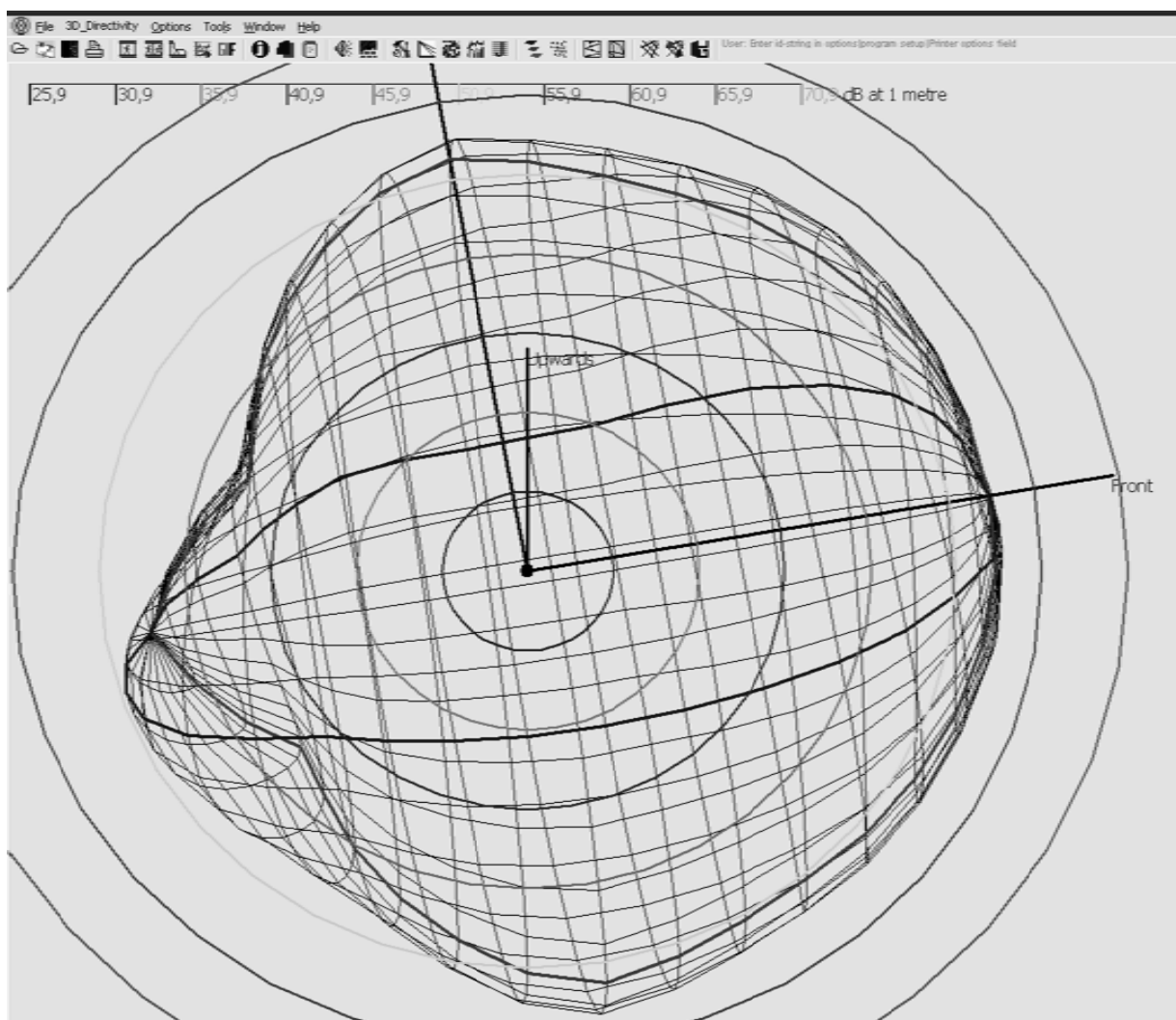
Nessa simulação, fonte e receptores foram posicionados a 1,20 m de altura, o que equivale a altura média de uma pessoa sentada. Abaixo da linha imaginária que liga fonte e receptores não pode existir qualquer obstáculo (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001). Assim, mobiliário e divisórias no trajeto fonte- receptor foram alterados para transparentes no próprio Odeon 9.0, na seleção de materiais. Foi utilizado esse recurso, pois objetos alterados para transparentes são considerados como inexistentes e não influenciam nos cálculos dos parâmetros acústicos.

A norma ISO 14257 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001) determina que entre os receptores e objetos ou superfícies verticais deve existir uma distância mínima de 1,5 m. Já para a fonte essa distância deve ser de 3,00 m. Esses parâmetros da norma foram observados nas simulações. A variação de distância entre a fonte e os receptores pode seguir um incremento constante ou logarítmico. Além disso, a norma aconselha que os receptores estejam localizados na região média, ou seja, distantes de 5 a 16 m da fonte. Assim, foram utilizados 12 pontos receptores, distantes de 5 a 16 m da fonte, com incremento de distância constante igual a 1 m.



Retrato 6. Simulação do DL_2 no software Odeon 9.0. P1 representa a fonte sonora, os pontos de 1 a 12 são os receptores. As linhas tracejadas são superfícies transparentes para o Odeon 9.0. Fonte: Autor.

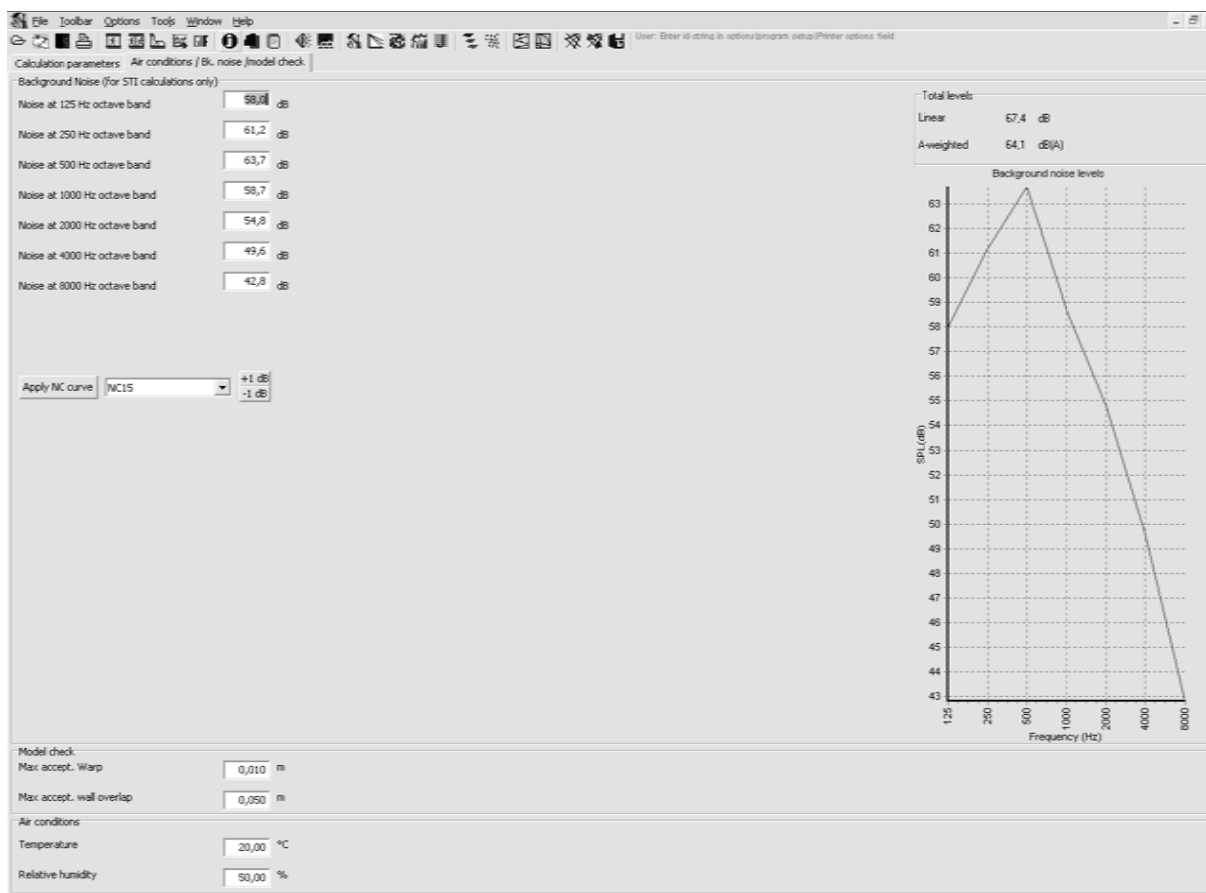
A fonte utilizada para a simulação do T_r e do DL_2 é do tipo pontual onidirecional (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2001, 2006). Já para a simulação do STI foi utilizada uma fonte com diretividade semelhante a da boca humana (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003). O balão de diretividade dessa fonte, na frequência de 1000 Hz, está a seguir, retrato 7.



Retrato 7. Balão de diretividade da fonte “Tlk_normNATURAL.S08” contida na biblioteca do Odeon 9.0. Fonte: Odeon 9.0.

O ruído utilizado nas simulações do STI é semelhante ao som da voz humana, com ponderação por frequência conforme o estabelecido pela IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003). No Odeon 9.0 não é possível estabelecer um nível de pressão sonora a 1 m da fonte, como foi definido na calibração durante a medição. Assim, optou-se por manter a potência sonora da fonte estabelecida pelo próprio

Odeon 9.0, 67,4 dB(A). Após as simulações com receptores em grid do STI, o valor de nível de pressão sonora medido em cada escritório foi mixado a simulação.



Retrato 8. Ruído de fundo mixado a simulação com receptores em grid do STI. Fonte: Odeon 9.0.

Após as simulações das situações reais dos escritórios, foram realizadas modificações nos modelos de três escritórios e esses foram novamente simulados. As modificações dizem respeito ao material das superfícies do teto e do piso, existência ou ausência de divisórias e modificações do nível de ruído ambiente, essas válidas apenas para as simulações do STI. Para cada escritório foram realizadas seis simulações do T_r e do DL_2 e doze simulações do STI, pois para cada condição física do ambiente o STI foi simulado com dois níveis de ruído ambiente. Esses níveis de ruído equivalem ao maior e ao menor nível de pressão sonora médio encontrado nos escritórios durante as medições. A tabela a seguir apresenta as modificações realizadas nos três escritórios, escritório 1, escritório 2 e escritório 4.

Tabela 13. Características das mudanças físicas e nível de pressão sonora utilizado nas simulações.

Características	Situação A	Situação B	Situação C	Situação D	Situação E	Situação F
Material do teto (1)	0,81	0,81	0,02	0,81	0,81	0,02
Material do piso (1)	0,18	0,01	0,01	0,18	0,01	0,01
Altura das divisórias entre estações (m)	-	-	-	1,30	1,30	1,30
Material das divisórias entre estações (1)	-	-	-	0,10	0,10	0,10
Nível de pressão sonora (dB(A))	64,1	64,1	64,1	64,1	64,1	64,1
	55,4	55,4	55,4	55,4	55,4	55,4

Fonte: Autor

(1) α médio entre as frequências em banda de oitava de 125 a 4000Hz.

Assim, de acordo com a tabela 13, as situações A, B e C foram caracterizadas pela ausência de divisórias entre as estações de trabalho. Opostamente, as situações D, E e F foram caracterizadas pela existência de divisórias entre as estações. Foram utilizadas divisórias com altura de 1,30m, em madeira revestida por laminado melamínico de alta pressão. Esse tipo de divisória é comumente encontrado no mercado, sua altura é superior a altura utilizada para a fonte sonora (1,20 m) e mantém a característica de ambiente panorâmico do escritório.

As situações A e D apresentam o mesmo material de acabamento para o teto e o piso. Para o teto foi utilizado forro acústico com elevada absorção, principalmente nas altas frequências. Para o piso foi utilizado carpete de alta densidade. Nas situações B e E foi utilizado o mesmo forro que nas situações anteriores, apenas o material do piso foi substituído por cerâmica. Para as situações C e F foi retirado o forro e optou-se pela utilização de laje, para o piso foi utilizada a cerâmica. Optou-se pela alteração dos materiais do teto e do piso por serem as maiores superfícies nos escritórios e que, segundo a bibliografia, provocam maior impacto no ambiente sonoro de construções desse tipo.

Para as seis situações físicas do ambiente o STI foi simulado com dois níveis de ruído de fundo, 64,1 dB(A) e 55,4 dB(A). Essas combinações de materiais, situação de divisórias e nível de pressão sonora são comumente encontrados em escritórios reais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método apresentado na seção anterior foi utilizado para obter os dados e avaliar os resultados deste trabalho. Os resultados que serão apresentados a seguir incluem: 1) resposta subjetiva dos ocupantes dos escritórios panorâmicos, 2) medições acústicas nos escritórios reais, 3) calibração do modelo computacional, 4) simulação da situação atual dos escritórios e 5) simulações com alterações nos parâmetros acústicos, referentes a modificações arquitetônicas e de ruído ambiente nos edifícios estudados.

4.1 Resposta Subjetiva

A resposta subjetiva referente às condições acústicas dos escritórios foi obtida através de questionários.

A primeira parte do questionário apresenta perguntas pessoais referentes a sexo, idade e tempo de trabalho em escritórios panorâmicos. Os dados referentes a sexo e idade dos ocupantes estão na tabela 14.

Tabela 14. Dados referentes ao sexo e idade dos ocupantes dos escritórios.

Dados Obtidos		Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5	Média
Sexo (%)	feminino	41	23	42	10	34	30
	masculino	59	77	58	90	66	70
Idade média (anos)		28	36	39	34	35	34
Total de entrevistados		92	117	67	44	84	81

Fonte: Autor

Observando a tabela 14, percebe-se que a maioria dos ocupantes dos escritórios estudados é do sexo masculino, em média 70%. No escritório 4, apenas 10% dos entrevistados são mulheres. Em relação à idade média, essa é de 34 anos, sendo que no escritório 1 a idade média é a menor entre os demais escritórios, 28 anos, e no escritório 3 essa idade é a maior, 39 anos. Na média foram realizadas 81 entrevistas por escritório, total de 404 entrevistados. O escritório 2 apresentou o maior número de entrevistas respondidas, 117, já o escritório 4 apresentou o menor número, 44.

Em relação ao tempo de trabalho em escritórios panorâmicos, o entrevistado poderia optar pelas seguintes categorias:

- a) menos de 1 ano;
- b) entre 1 e 2 anos;
- c) entre 2 e 5 anos;
- d) mais de 5 anos.

O gráfico a seguir apresenta os dados obtidos referentes a essa questão.

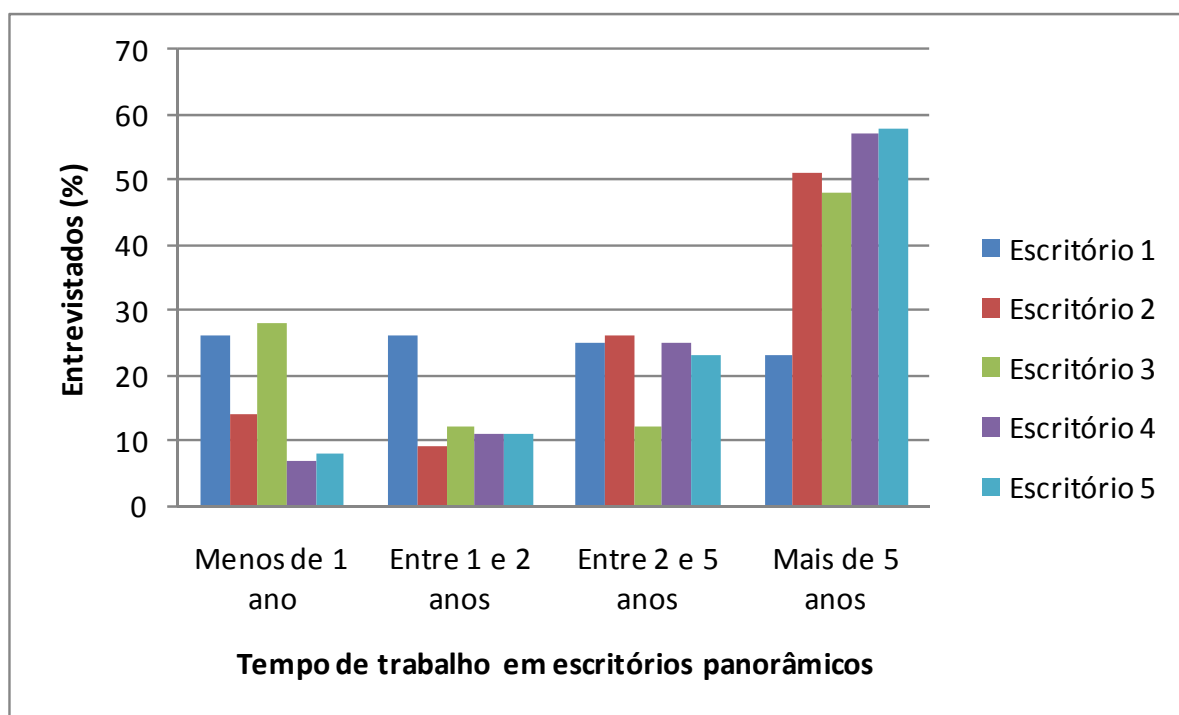


Gráfico 12. Tempo de trabalho nos escritórios avaliados.

Através do gráfico, percebe-se que na maioria dos escritórios a maior parte dos ocupantes trabalha em escritórios panorâmicos há mais de 5 anos. Apenas no escritório 1 os ocupantes apresentaram tempo de trabalho, nesse tipo de ambiente, bem diversificado. Nesse escritório os ocupantes estão praticamente igualmente distribuídos nas quatro categorias, aproximadamente 25% dos entrevistados em cada uma. Esse resultado encontrado para o escritório 1 está relacionado ao dado da idade média dos trabalhadores. Ou seja, trabalhadores mais jovens apresentam menor tempo de trabalho em escritórios panorâmicos.

A segunda parte do questionário, questões 2 e 3, teve por objetivo verificar a necessidade de concentração e de integração com colegas de trabalho no interior dos escritórios para a realização das tarefas. A tabela a seguir apresenta o valor médio e o desvio padrão obtidos para cada questão. Quanto maior o valor médio para as questões 2 e 3 significa

que existe mais necessidade de concentração e integração respectivamente, na visão dos entrevistados.

Tabela 15. Dados referentes à necessidade de concentração e integração com colegas de trabalho, valores médios.

Questão	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
2- concentração	3,26	3,44	3,40	3,02	3,12
3- integração	3,13	2,91	2,72	3,32	3,31

Fonte: Autor

Na tabela 15, percebe-se que as médias dos valores obtidos para as questões 2 e 3 são semelhantes em todos os escritórios. Nos escritórios 1, 2 e 3 a média da questão 2 é discretamente superior à média da questão 3, já para os escritórios 4 e 5 ocorre o oposto. Assim, através desses resultados, pode-se verificar que para os escritórios 1, 2 e 3 a demanda de concentração é maior que a necessidade de integração com os colegas de trabalho, sendo que no escritório 2 é onde seus ocupantes percebem a maior necessidade de concentração e no escritório 3 onde percebem a menor necessidade de integração com colegas de trabalho. Para os ocupantes dos escritórios 4 e 5, a integração com os colegas é mais importante que a necessidade de concentração, sendo que para o escritório 4 foi verificada a menor necessidade de concentração e maior demanda de integração com os colegas. Entretanto, deve-se verificar que em todos os escritórios os ocupantes julgam haver necessidade de concentração e integração com os colegas, pois o valor médio para as questões 2 e 3 é superior ao valor médio da questão, 2.

As questões 4, 8 e 9 são relacionadas ao incômodo pelo ruído durante as atividades de trabalho e à sensação e satisfação ao ambiente acústico dos escritórios. A questão 4 pergunta se o ruído atrapalha a realização das tarefas no escritório. Assim, quanto menor o valor da média obtida nessa questão, menor é a interferência do ruído no ambiente de trabalho. A questão 8 é referente ao nível de ruído no ambiente. Essa questão não possui números, mas uma escala subjetiva de muito silencioso a muito ruidoso, passando por silencioso, agradável e ruidoso. Para a análise, para cada parâmetro subjetivo, foi atribuído um número de 0 a 4, sendo que o resultado do ambiente mais adequado é 2, que corresponde ao atributo agradável. A questão 9 relaciona o ambiente acústico e a satisfação. Em uma escala de 0 a 4 o maior valor corresponde a um indivíduo mais satisfeito com o ambiente acústico do escritório. O resultado obtido para essas questões estão a seguir.

Tabela 16. Dados referentes ao incômodo ao ruído, sensação ao ruído e satisfação do ambiente acústico dos escritórios.

Questão	Escritório 1		Escritório 2		Escritório 3		Escritório 4		Escritório 5	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
4- incômodo	2,57	1,13	3,00	0,98	3,07	0,86	2,61	1,10	3,31	0,74
8- ruído	3,20	0,62	2,99	0,69	2,88	0,54	2,64	0,53	2,50	0,65
9- satisfação	1,76	1,03	1,44	0,98	1,79	0,79	2,05	1,03	2,29	0,91

Fonte: Autor

Observando a tabela 16, os resultados obtidos para a questão 4 evidenciam que existe o incômodo ao ruído por parte dos ocupantes dos ambientes estudados. Os valores médios acima de 2 para todos os escritórios levam a tal conclusão. O elevado desvio padrão resultante para essa questão deve ser observado, mostrando variação entre a resposta dos questionados, principalmente nos escritórios 1 e 4, onde o desvio padrão foi superior a 1. Ainda observando os resultados da questão 4, pode-se dizer que os ocupantes do escritório 5 são os mais incomodados pelo ruído. Já para os escritórios 1 e 4, que apresentaram o menor valor médio para essa questão, deve-se verificar o elevado desvio padrão. Assim, vê-se que para esses escritórios há ocupantes muito incomodados e nada incomodados pelo ruído.

Para a questão 8 observa-se para todos os escritórios valores próximos de 3. Assim, pode-se dizer que os ocupantes caracterizam seus ambientes de trabalho como locais ruidosos. Apenas o escritório 5 foi caracterizado entre agradável e ruidoso (2,50). O local mais ruidoso para os ocupantes é o escritório 1 (3,20). O baixo desvio padrão evidencia pouca variação das respostas.

Em relação à questão 9, satisfação, valores médios próximos de 2 mostram ocupantes com médio grau de satisfação, ou seja, nem totalmente satisfeitos, nem totalmente insatisfeitos. O valor de 1,44 para o escritório 2 aponta indivíduos mais insatisfeitos e o valor de 2,29 para o escritório 5 assinala usuários mais satisfeitos entre todos os ambientes estudados. Existe variação considerável entre as respostas obtidas nos questionários, exposta pelos desvios padrões próximos de 1 calculados para essa questão.

A questão 5 teve por objetivo identificar a fonte de maior incômodo nos escritórios avaliados. As opções de fonte foram selecionadas através do exposto pela literatura como sendo comumente de maior incômodo em escritórios panorâmicos. O entrevistado deveria assinalar valores de 0 a 4 conforme considerasse o grau de incômodo causado durante o horário de trabalho por cada uma das seis fontes citadas. Existia a opção de “outros” para verificar se as fontes citada eram adequadas para avaliar o incômodo nos ambientes ou se

existia alguma outra fonte sonora específica que causaria mais incômodo que as seis relacionadas. As respostas obtidas para essa questão estão no gráfico a seguir.

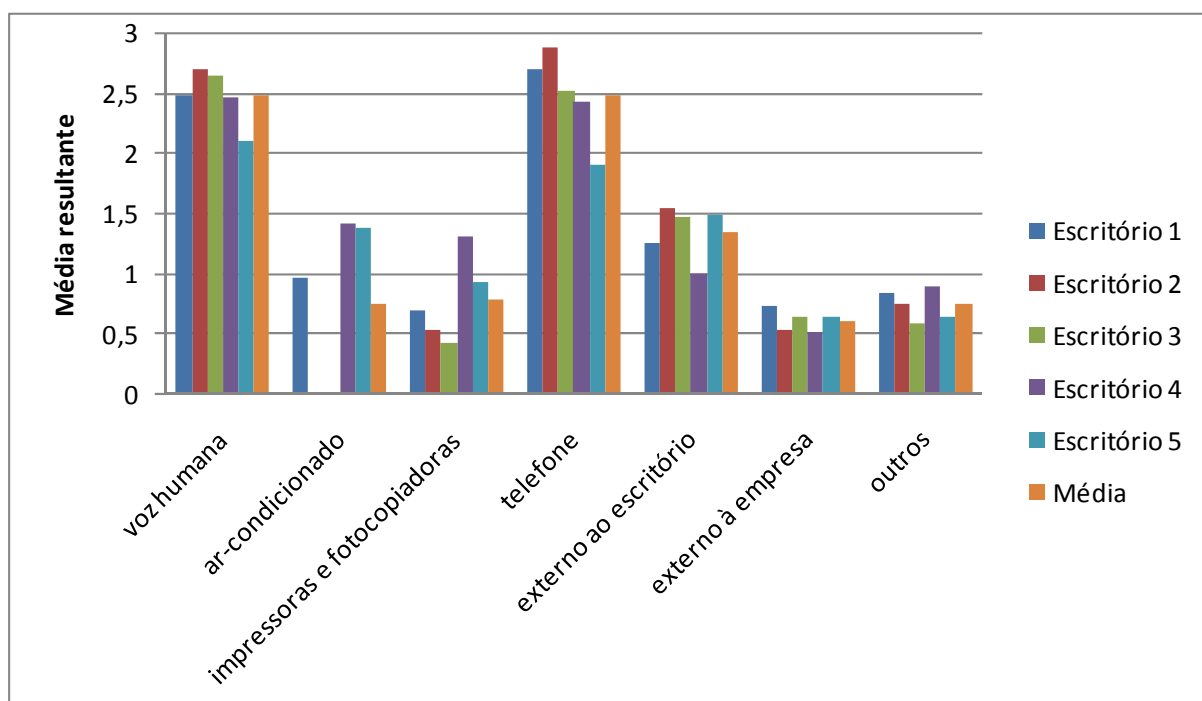


Gráfico 13. Fontes de maior incômodo nos escritórios avaliados.

No gráfico 13, quando considerada a média entre os escritórios, fica evidente que as fontes de maior incômodo nos escritórios são a voz humana e o telefone, valores próximos a 2,5. Para os escritórios 1 e 2 a fonte de maior irritação são sons emitidos pelos telefones, já para os escritórios 3, 4 e 5 são as conversas dos colegas de trabalho (voz humana).

O valor médio relacionado ao ruído provocado pelo ar-condicionado não deve ser considerado, pois nos escritórios 2 e 3 não havia esse tipo de instalação. Entretanto, quando verificado o valor obtido para os outros escritórios, vê-se que existe incômodo causado pelo ar-condicionado para os ocupantes dos escritórios 4 e 5, valor de 1,4 para ambos.

Outra fonte de ruído que causa algum incômodo aos usuários são sons externos ao escritório, mas internos à empresa, valor médio de 1,3. Ruídos causados por impressoras e fotocópias e ruídos externos à empresa são considerados de menor incômodo pelos entrevistados. Apenas no escritório 4 foi apontado algum incômodo causado pelas impressoras e fotocopiadoras, valor de 1,3.

O valor obtido para o item “outros” foi inferior a 1, evidenciando que as fontes sonoras selecionadas para a elaboração deste questionário cobrem a maior parte do universo de fontes de ruído existentes nos escritórios.

As questões 6 e 7 estão relacionadas à falta de privacidade e de inteligibilidade da fala, respectivamente. A questão 6 pergunta se o entrevistado se sente incomodado pelos colegas de trabalho estarem escutando suas conversas; e a questão 7 indaga se há dificuldade de entender o colega quando este quer estabelecer uma conversa com o entrevistado. Essas questões foram avaliadas através de uma escala de 0 a 4. Quanto menor o valor assinalado pelo ocupante, maior a sensação, ou menor a demanda, de privacidade e inteligibilidade da fala. Os resultados para essas questões estão expostos na tabela a seguir.

Tabela 17. Dados referentes à falta de privacidade e inteligibilidade da fala.

Questão	Escritório 1		Escritório 2		Escritório 3		Escritório 4		Escritório 5	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
6- falta de privacidade	1,97	1,18	2,16	1,34	2,43	1,20	2,02	1,09	1,93	1,19
7-falta de inteligibilidade	1,67	1,10	1,27	1,06	1,37	1,04	1,14	0,95	1,13	0,86

Fonte: Autor

Quando observados os valores na tabela 17, torna-se clara a maior demanda por privacidade que por inteligibilidade da fala em todos os escritórios. Para a privacidade, os valores são superiores a 2 ou muito próximos a esse número em todos os ambientes estudados. Já para o item 7, referente a falta de inteligibilidade, o valor está mais próximo de 1 para a maioria dos escritórios, evidenciando sensação de boa inteligibilidade.

Os desvios padrões calculados para as questões 6 e 7 são consideravelmente elevados, na maioria superiores a 1. Assim, foram elaborados os gráficos a seguir para uma melhor análise da sensação dos entrevistados.

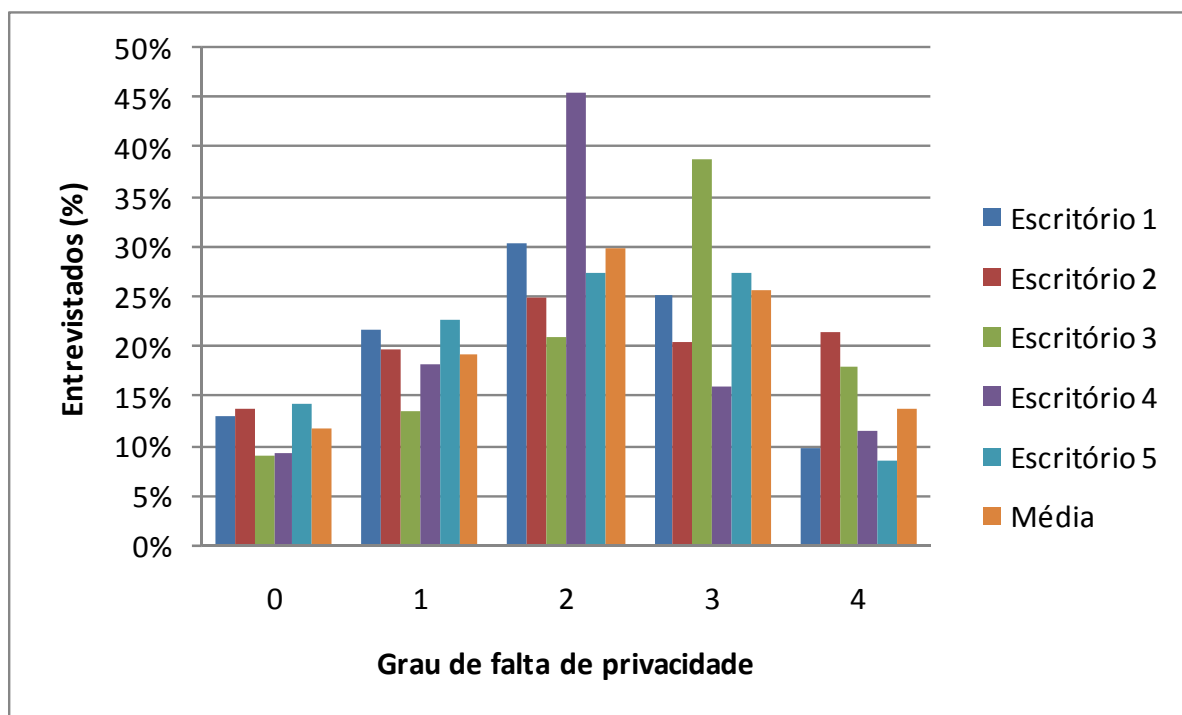


Gráfico 14. Grau de falta de privacidade.

Para a maioria dos escritórios, na opinião de grande parte dos entrevistados, o grau de falta de privacidade está entre 2 e 3, demonstrando uma necessidade de privacidade da fala maior nesses locais. Apenas no escritório 4, esse grau foi considerado entre 1 e 2 pela maioria dos ocupantes, assinalando privacidade regular para a demanda.

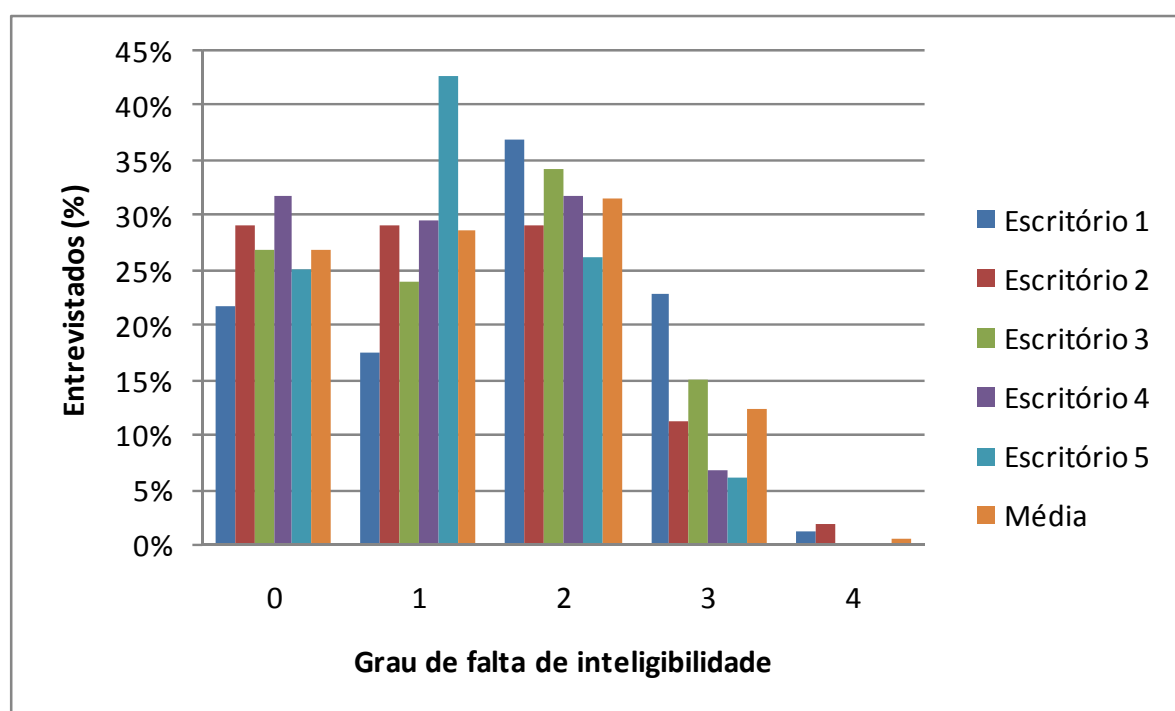


Gráfico 15. Grau de falta de inteligibilidade.

Em relação ao grau de falta de inteligibilidade, gráfico 15, apenas 13% consideraram os valores 3 e 4, enquanto 55% assinalaram os valores 0 e 1 e 32% o valor 2, quantificado como o valor médio na escala de 0 a 4. Para o escritório 1, maior percentagem de entrevistados, comparando aos outros escritórios, avaliou o grau de falta de inteligibilidade como 3, surgindo assim uma demanda por inteligibilidade nesse local.

Assim, com os dados obtidos com os questionários, pode-se concluir que:

- a) a maioria dos ocupantes é do sexo masculino;
- b) a média de idade dos entrevistados é de 34 anos, sendo que no escritório 1 essa média é a menor, 28 anos, e no escritório 3 é a maior, 39 anos;
- c) a maioria dos entrevistados trabalha há mais de 5 anos em escritórios panorâmicos, com exceção dos entrevistados no escritório 1, aproximadamente 25% em cada uma das quatro categorias citadas;
- d) em todos os escritórios seus usuários julgaram elevada a necessidade de concentração e integração com os colegas de trabalho para a realização das atividades durante a jornada de trabalho;
- e) nos escritórios 1, 2 e 3 a necessidade de concentração foi considerada mais importante que a necessidade de integração com os colegas, já nos escritórios 4 e 5 foi verificado o oposto;
- f) os entrevistados se mostraram incomodados com o ruído ao realizar as atividades, sendo que os ocupantes do escritório 5 são os mais incomodados;
- g) os escritórios foram classificados como ruidosos pela maioria dos entrevistados, apenas os ocupantes do escritório 5 o considerou entre agradável e ruidoso;
- h) os ocupantes estão medianamente satisfeitos com o ambiente sonoro dos escritórios, sendo que os entrevistados do escritório 5 são os mais satisfeitos, e do escritório 2 os mais insatisfeitos;
- i) as fontes de maior incômodo são a voz humana e sons provocados por telefones. Nos escritórios 3, 4 e 5 a voz humana foi julgada como a fonte de maior irritação e nos escritórios 1 e 2, recebeu esse julgamento os sons emitidos pelos telefones;
- j) em todos os escritórios foi verificada uma maior demanda por privacidade que por inteligibilidade da fala;
- k) apenas os usuários do escritório 4 julgaram a privacidade da fala suficiente, enquanto nos outros escritórios foi verificado alto grau de falta de privacidade;

- l) para a inteligibilidade, apenas os ocupantes do escritório 1 percebem a inteligibilidade da fala precária, para os outros escritórios, a inteligibilidade foi assinalada como suficiente ou boa.

4.2 Medições no local

Foram realizadas medições acústicas do nível de pressão sonora equivalente, por frequência em banda de oitava (L_{Leq}) e em banda larga com ponderação em A (L_{Aeq}); do tempo de reverberação (T_r); e do índice de transmissão da fala (STI). Essas medições foram utilizadas para a obtenção do STI considerando o ruído ambiente (L_{Leq} por frequência em banda de oitava), aquisição de dado do ruído ambiente (L_{Aeq} em banda larga) e calibração do modelo computacional (T_r e STI). Os valores medidos estão nas tabelas a seguir.

Tabela 18. L_{Leq} por frequência em banda de oitava, medido nos escritórios durante o expediente de trabalho.

Frequência (Hz)	Nível de Pressão Sonora (dB)				
	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
31,5	68,0	58,5	51,0	60,9	63,6
63	63,0	55,8	49,2	58,5	59,8
125	58,0	55,7	52,4	56,5	56,4
250	61,2	58,2	55,4	55,3	57,2
500	63,7	58,9	55,5	55,2	57,5
1000	58,7	53,1	50,1	48,6	51,5
2000	54,8	49,6	46,7	45,3	47,3
4000	49,6	44,2	41,7	41,6	42,6
8000	42,8	38,8	35,6	36,2	38,1

Fonte: Autor

Tabela 19. L_{Aeq} medido nos escritórios durante o expediente de trabalho.

Parâmetro	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
L_{Aeq} (dB)	64,1	59,2	56,0	55,4	57,7

Fonte: Autor

Os resultados apresentados nas tabelas 18 e 19 foram obtidos através do cálculo da média dos pontos medidos no interior dos escritórios. Os pontos foram distribuídos pelas salas de forma a cobrir toda a sua extensão.

Os níveis de pressão sonora por frequência foram medidos sem ponderação, pois foram inseridos na simulação do STI como ruído de fundo. Entretanto, para verificar a frequência dominante dos sons encontrados nos escritórios, fez-se necessária realizar a correção através da curva de ponderação em “A” dos valores de nível de pressão sonora medidos nos escritórios (tabela 18). Através dessa correção, os valores medidos se aproximaram da percepção do ouvido humano a eles. Essa correção foi realizada conforme valores da tabela 1. Os níveis corrigidos estão na tabela 20.

Tabela 20. L_{eq} , por frequência em banda de oitava, corrigidos para a curva de ponderação em A.

Frequência (Hz)	Nível de Pressão Sonora (dB(A))				
	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
31,5	28,6	19,1	11,6	21,5	24,2
63	36,8	29,6	23,0	32,3	33,6
125	41,9	39,6	36,3	40,4	40,3
250	52,6	49,6	46,8	46,7	48,6
500	60,5	55,7	52,3	52,0	54,3
1000	58,7	53,1	50,1	48,6	51,5
2000	56,0	50,8	47,9	46,5	48,5
4000	50,6	45,2	42,7	42,6	43,6
8000	41,7	37,7	34,5	35,1	37,0

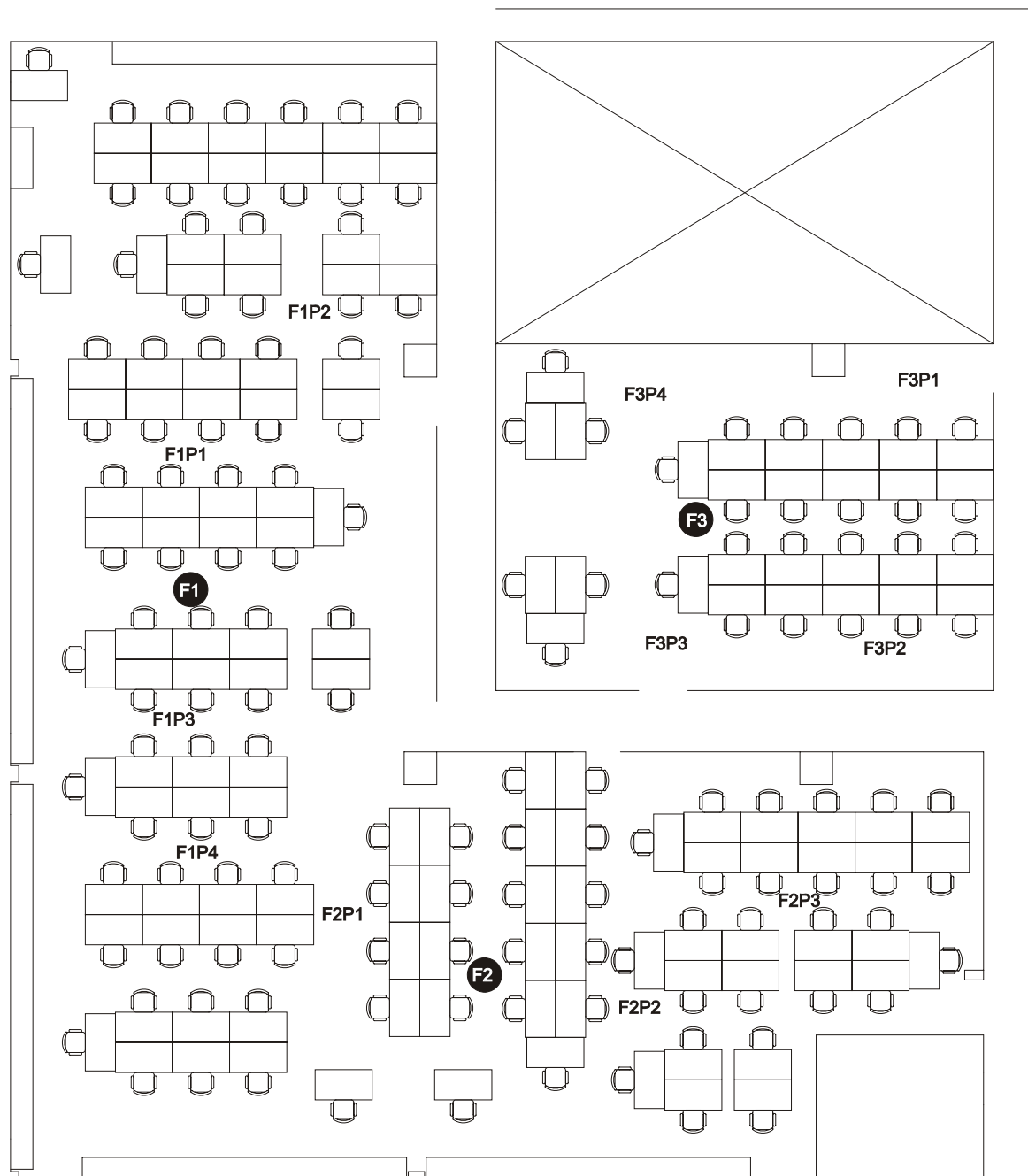
Fonte: Autor

Através da tabela 20, vê-se que os ruídos mais intensos estão nas frequências de 500 e 1000 Hz em todos os escritórios. Exemplos de sons com predominância dessas frequências são a voz humana e toques de telefone.

Os níveis equivalentes com ponderação em A medido nos escritórios (tabela 19), podem ser comparados a valores recomendados para o conforto acústico na norma NBR 10152 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA, 1987) e por Cavanaugh e Wilkes (1999). Segundo esses autores, para grandes escritórios, são recomendados níveis de pressão sonora de 42 a 52 dB(A) (anexo A). Já para a norma brasileira, essa traz como especificação mais próxima à dos escritórios estudados, salas de computadores. Para esses ambientes, os níveis recomendados são de 45 a 65 dB(A), sendo o valor para o conforto acústico 45 dB(A) e aceitável até 65 dB(A) (anexo D). Assim, observando a tabela 19, vê-se que os níveis encontrados em todos os escritórios estão acima do recomendado por Cavanaugh e Wilkes (1999) e para o conforto acústico segundo norma NBR 10152, mas abaixo do limite recomendado como aceitável por essa norma.

Conforme quadro 1, apresentado por Cavanaugh e Wilkes (1999), em escritórios com níveis de pressão sonora entre 55 e 65 dB(A) (tabela 19), a comunicação com esforço vocal normal deve ser realizada a uma distância máxima de 0,90m, para distâncias de até 1,80m, há necessidade de voz intensa. A distância máxima para a conversação é de 3,65m, se o orador apresentar esforço vocal muito intenso. Segundo esses autores, com tais níveis de ruído de fundo, é possível uma comunicação pessoal contínua e a comunicação através do telefone é realizada de modo satisfatório.

Além do nível de pressão sonora, foram medidos nos escritórios o T_r e o STI. A localização dos pontos de medição do T_r , e seus respectivos valores, estão nas plantas e tabelas a seguir. Nas plantas, F (1, 2, 3, 4) representa a localização das fontes sonoras e F_P_ representa a localização dos receptores. Por exemplo, o receptor F1P1 é o ponto de recepção 1 (P1) medido com a fonte na posição 1 (F1). As plantas mostram que a escolha da localização dos pontos buscou abranger toda a extensão das salas (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006). Em todos os escritórios, a fonte sonora foi posicionada em no mínimo 3 pontos e o número de pontos receptores variou conforme a extensão das salas.

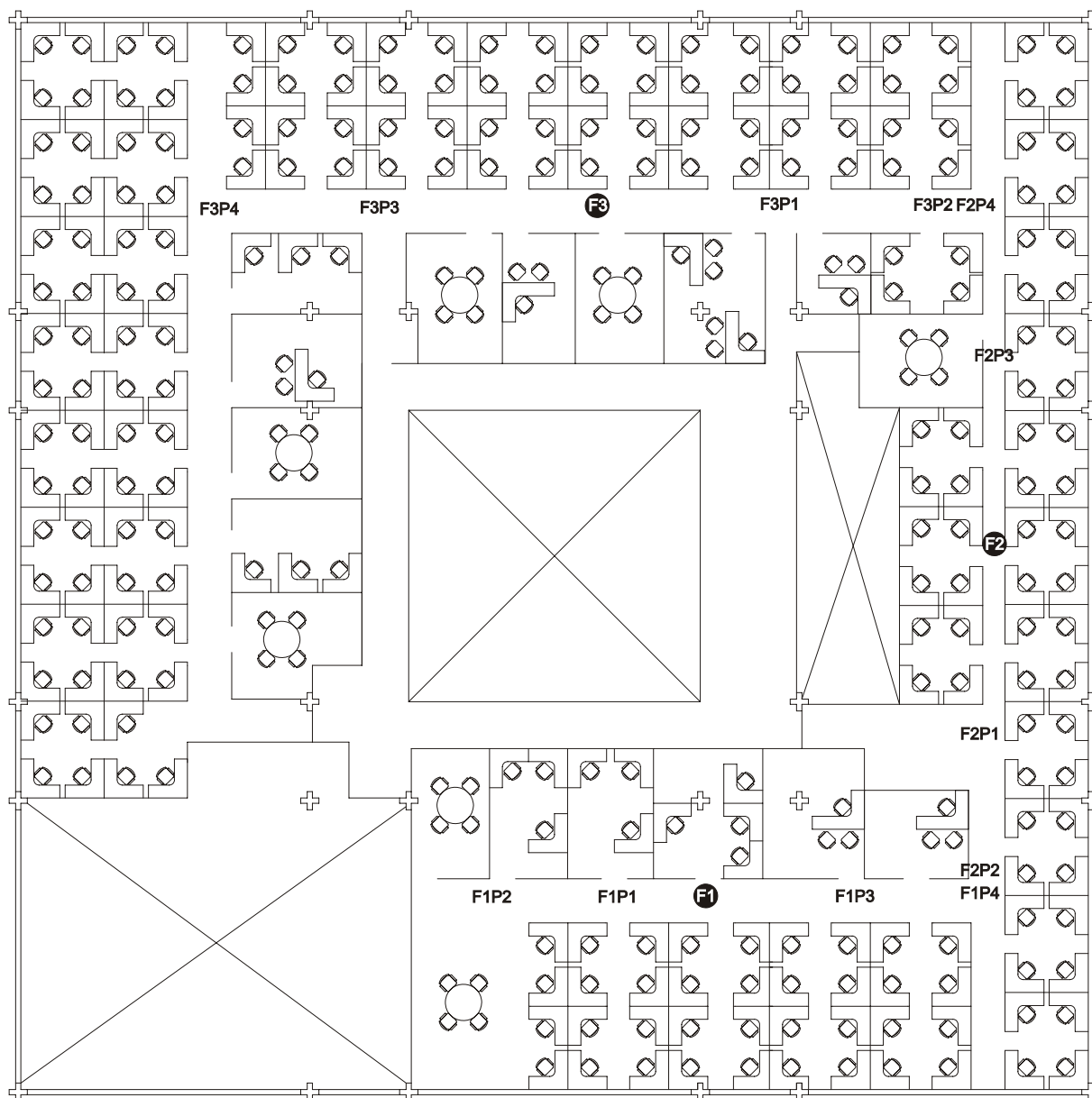


Planta 1. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 1.

Tabela 21. T_r medido no escritório 1.

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)												Desvio Padrão
	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F2P1	F2P2	F2P3	F3P1	F3P2	F3P3	F3P4	média	
125	0,80	0,74	0,74	0,60	0,57	0,67	0,59	0,71	0,63	0,70	0,70	0,68	0,07
250	0,63	0,72	0,66	0,65	0,61	0,66	0,60	0,62	0,65	0,64	0,69	0,65	0,03
500	0,61	0,62	0,57	0,61	0,56	0,52	0,55	0,54	0,52	0,49	0,57	0,56	0,04
1000	0,57	0,63	0,53	0,63	0,60	0,53	0,57	0,54	0,53	0,50	0,57	0,56	0,04
2000	0,68	0,75	0,71	0,77	0,73	0,66	0,74	0,63	0,70	0,66	0,66	0,70	0,04
4000	0,82	0,90	0,83	0,86	0,86	0,82	0,89	0,78	0,80	0,77	0,77	0,83	0,05

Fonte: Autor

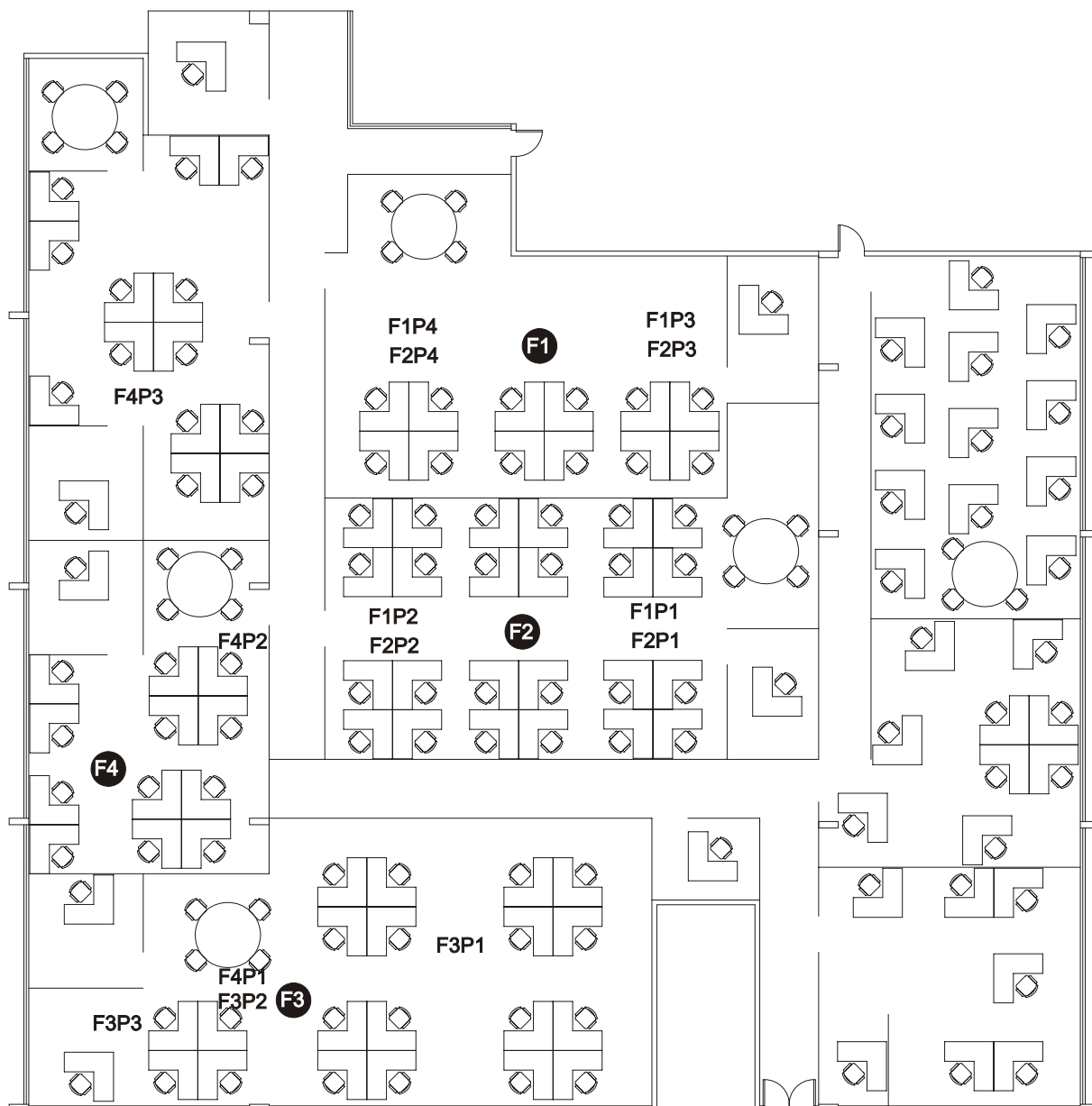


Planta 2. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 2.

Tabela 22. T_r medido no escritório 2.

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)													Desvio Padão
	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F2P1	F2P2	F2P3	F2P4	F3P1	F3P2	F3P3	F3P4	média	
125	1,14	1,03	1,22	1,05	0,83	0,82	1,00	1,16	1,29	1,16	1,30	1,38	1,12	0,18
250	0,93	0,96	0,98	1,00	0,87	0,87	0,90	0,88	1,30	1,21	1,30	1,34	1,05	0,19
500	0,87	0,87	0,89	0,94	0,87	0,87	0,90	0,83	1,15	1,19	1,26	1,25	0,99	0,17
1000	0,86	0,82	0,85	0,87	0,79	0,79	0,75	0,84	1,24	1,04	1,12	1,08	0,92	0,16
2000	0,75	0,75	0,80	0,80	0,75	0,75	0,71	0,79	1,10	1,09	1,14	1,11	0,88	0,17
4000	0,71	0,74	0,75	0,76	0,68	0,68	0,69	0,74	0,91	0,92	1,06	1,07	0,81	0,14

Fonte: Autor

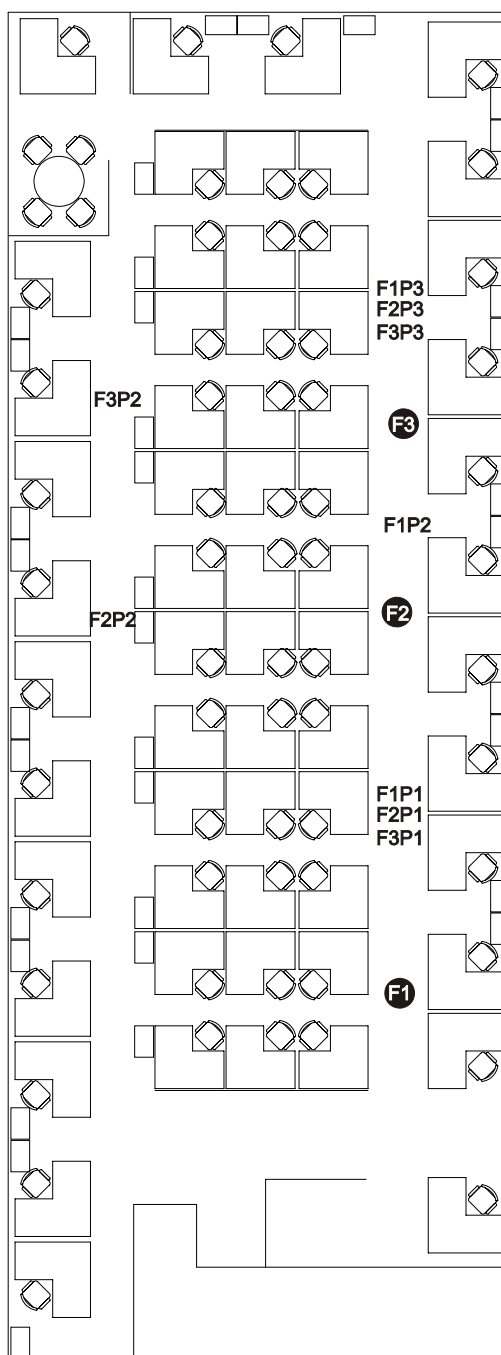


Planta 3. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 3.

Tabela 23. T_r medido no escritório 3.

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)															Desvio Padão
	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F2P1	F2P2	F2P3	F2P4	F3P1	F3P2	F3P3	F4P1	F4P2	F4P3	média	
125	1,03	1,00	0,82	0,88	0,67	0,60	0,90	0,85	0,76	0,88	0,67	0,84	0,88	0,87	0,83	0,12
250	0,86	0,88	0,79	0,83	0,83	0,69	0,81	0,87	0,62	0,78	0,66	0,82	0,78	0,75	0,78	0,08
500	0,90	0,91	0,83	0,85	0,78	0,85	0,98	0,97	0,54	0,75	0,59	0,72	0,75	0,84	0,80	0,13
1000	0,96	0,94	0,83	0,85	0,88	0,89	0,94	0,95	0,56	0,73	0,51	0,73	0,73	0,78	0,81	0,14
2000	0,88	0,90	0,74	0,73	0,82	0,74	0,86	0,88	0,56	0,54	0,46	0,62	0,54	0,74	0,72	0,15
4000	0,77	0,79	0,70	0,68	0,73	0,71	0,79	0,77	0,51	0,57	0,45	0,67	0,57	0,68	0,67	0,11

Fonte: Autor

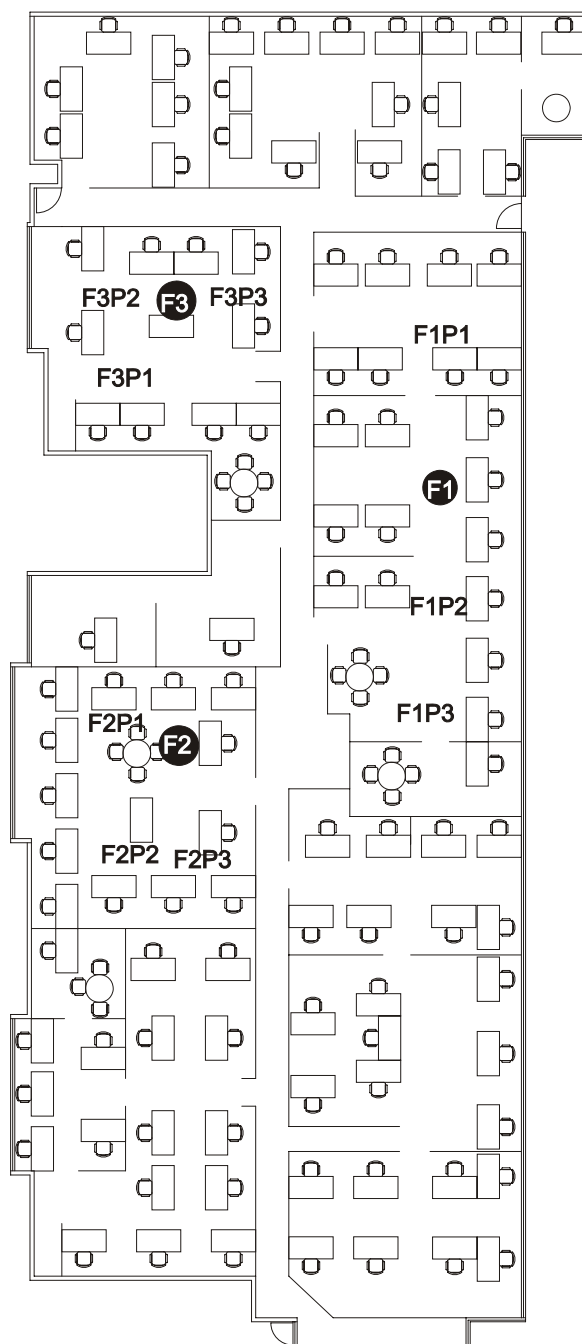


Planta 4. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 4.

Tabela 24. T_r medido no escritório 4.

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)										Desvio Padrão
	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	F3P1	F3P2	F3P3	média	
125	0,64	0,67	0,73	0,68	0,56	0,63	0,45	0,57	0,60	0,61	0,08
250	0,47	0,53	0,52	0,49	0,54	0,44	0,51	0,49	0,47	0,50	0,03
500	0,36	0,34	0,46	0,35	0,38	0,35	0,43	0,36	0,34	0,37	0,04
1000	0,28	0,41	0,41	0,38	0,37	0,40	0,43	0,37	0,34	0,38	0,05
2000	0,44	0,54	0,70	0,39	0,46	0,48	0,54	0,42	0,44	0,49	0,09
4000	0,33	0,54	0,65	0,44	0,49	0,46	0,53	0,44	0,32	0,47	0,10

Fonte: Autor



Planta 5. Localização das fontes e receptores na medição do T_r no escritório 5.

Tabela 25. T_r medido no escritório 5.

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)										Desvio Padrão
	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	F3P1	F3P2	F3P3	média	
125	0,42	0,30	0,43	0,39	0,42	0,40	0,44	0,44	0,40	0,40	0,04
250	0,43	0,38	0,44	0,39	0,43	0,39	0,36	0,41	0,42	0,41	0,03
500	0,36	0,32	0,35	0,38	0,40	0,35	0,30	0,36	0,35	0,35	0,03
1000	0,32	0,30	0,30	0,35	0,31	0,30	0,28	0,30	0,28	0,30	0,02
2000	0,33	0,32	0,34	0,33	0,34	0,31	0,28	0,29	0,30	0,32	0,02
4000	0,35	0,34	0,33	0,34	0,37	0,37	0,29	0,29	0,31	0,33	0,03

Fonte: Autor

Quando se observa os tempos de reverberação medidos, tabelas 21 a 25, vê-se certa variação do T_r entre os pontos de medição dentro de uma mesma sala. Essa variação pode ser verificada através do desvio padrão. Através das tabelas 21 a 25, vê-se que os maiores valores de desvio padrão foram encontrados no escritório 2. Entre os escritórios estudados, esse apresenta o maior volume, 4922,02 m³. O escritório 3, com o segundo maior volume, 2973,54 m³, também apresentou os segundos maiores desvios padrões entre os pontos de medição do T_r . Nesses escritórios, os desvios padrões variaram de 0,19 a 0,08 conforme a frequência. Esses valores elevados de desvio padrão são influenciados pelos valores também mais elevados de tempo de reverberação nesses locais. Assim, para não haver essa influência, através da média e do desvio padrão, foi calculada a variação do T_r , em porcentagem, por frequência nos escritórios estudados. Essa variação está na tabela a seguir.

Tabela 26. Variação do T_r conforme ponto de medição.

Frequência (Hz)	Variação do T_r conforme ponto de medição(%)				
	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
125	11	16	15	13	11
250	5	18	10	7	7
500	7	17	16	11	8
1000	8	17	18	12	7
2000	6	20	21	19	7
4000	6	18	16	22	9

Fonte: Autor

Através da tabela 26 percebe-se a real variação do T_r conforme a localização do ponto de medição na sala. Os escritórios 1 e 5 apresentaram a menor variação do T_r , 5% a 11% nas diversas frequências em banda de oitava de 125 a 4000 Hz. Assim, através dos valores obtidos, observa-se que não existe correlação entre as variações de T_r e a área ou volume das salas. Além disso, não foi observada correlação dessa variação com as frequências de avaliação, não foi percebida nenhuma tendência.

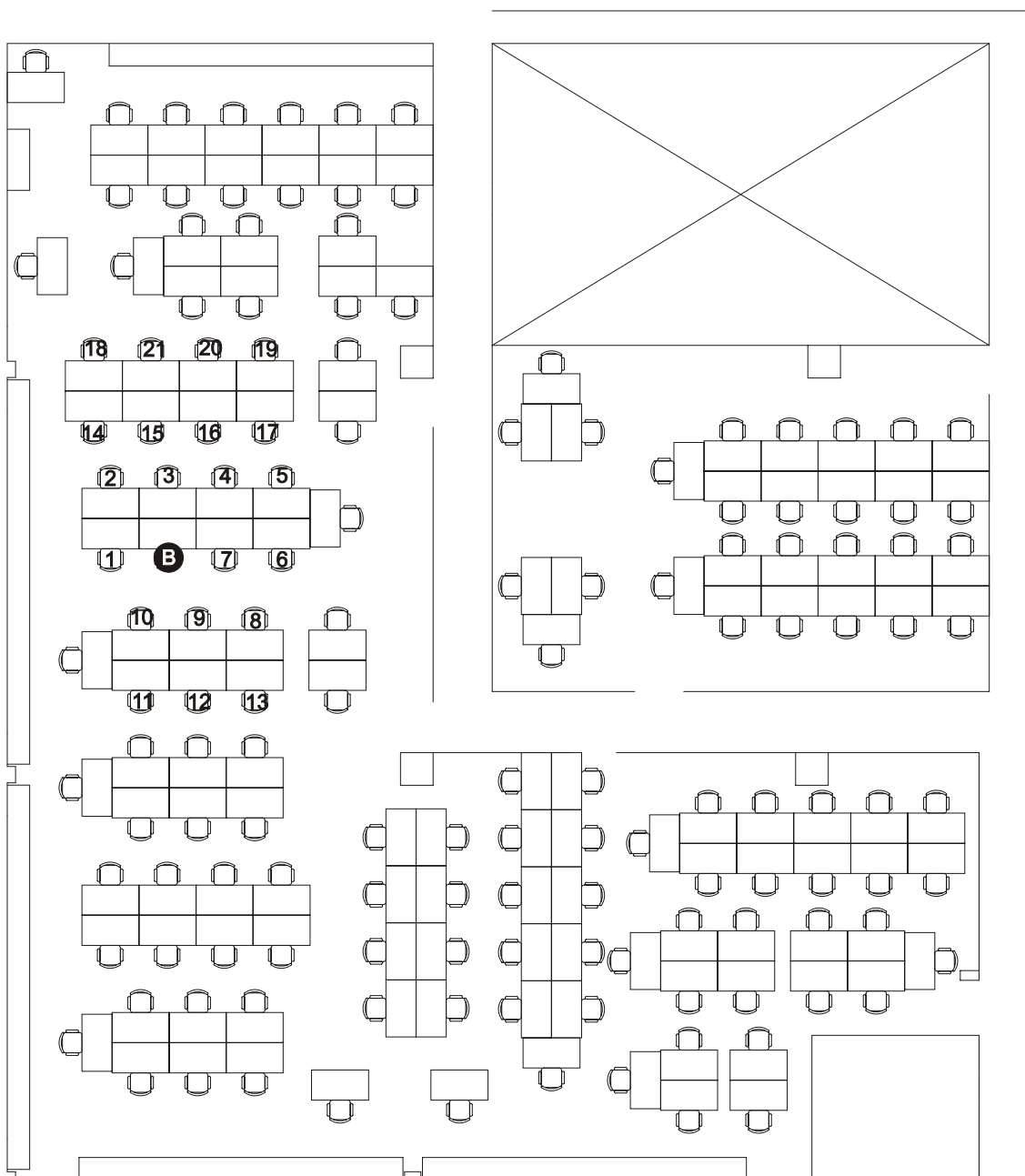
Quando comparados os valores da tabela 26 ao limiar de percepção subjetiva do T_r , 5% (BORK, 2000), vê-se que apenas na frequência de 250 Hz no escritório 1 a variação do T_r é igual a esse valor, para todos os outros escritórios e frequências as variações são superiores ao limiar de percepção subjetiva. Como citado anteriormente, segundo Chigot (2007), a variação de valores na medição do tempo de reverberação é um problema já conhecido: medições em uma mesma sala podem apresentar resultados diferentes e o mesmo ocorre para

várias medições na mesma posição da sala. Esse problema foi também verificado neste trabalho. Como solução para isso, segundo Chigot (2007), os escritórios panorâmicos não devem ser avaliados apenas através da medição do tempo de reverberação.

Além do T_r , outro parâmetro medido foi o índice de transmissão da fala (STI). As plantas e tabelas a seguir apresentam a localização e valores do STI. Deve-se destacar que essas medições não consideraram o ruído de fundo no local. Sendo assim, os valores de STI aqui apresentados são influenciados apenas pelas características arquitetônicas (forma, volume, materiais de acabamento, entre outros) e organizacionais (proximidade entre as estações de trabalho, orientação do orador) dos locais avaliados.

As plantas e tabelas a seguir apresentam a medição do STI. Nas plantas 6, 7, 9 e 10 e nas tabelas 27, 28, 30 e 31, a letra B representa a fonte sonora, ou seja, a boca artificial, e os números consecutivos representam os receptores acústicos, medidos com a fonte na posição B. Já na planta 8 e na tabela 29, B1, B2 e B3 representam as fontes 1, 2 e 3 consecutivamente, e os receptores são representados pelas letras B_P_ seguidas de números, sendo que o número após a letra B indica a fonte com que aquele receptor foi medido e o número após a letra P indica a posição do receptor. Por exemplo, o receptor B1P2 foi medido com a fonte na posição 1 e o receptor 2 para essa fonte. Deve-se salientar que os receptores B1P1, B2P1, B3P1,... não estão localizados no mesmo ponto, pois para cada fonte os receptores foram localizados em pontos distintos.

Em todos os escritórios, os pontos de localização de fontes e receptores e a orientação das fontes consideraram a situação real. Assim, as fontes foram direcionadas para onde estava localizada a tela do computador, ou seja, nos escritórios 2, 3 e 4, plantas 7 a 9, para o canto da mesa em L e para os escritórios 1 e 5, plantas 6 e 10, para o centro da mesa de trabalho.

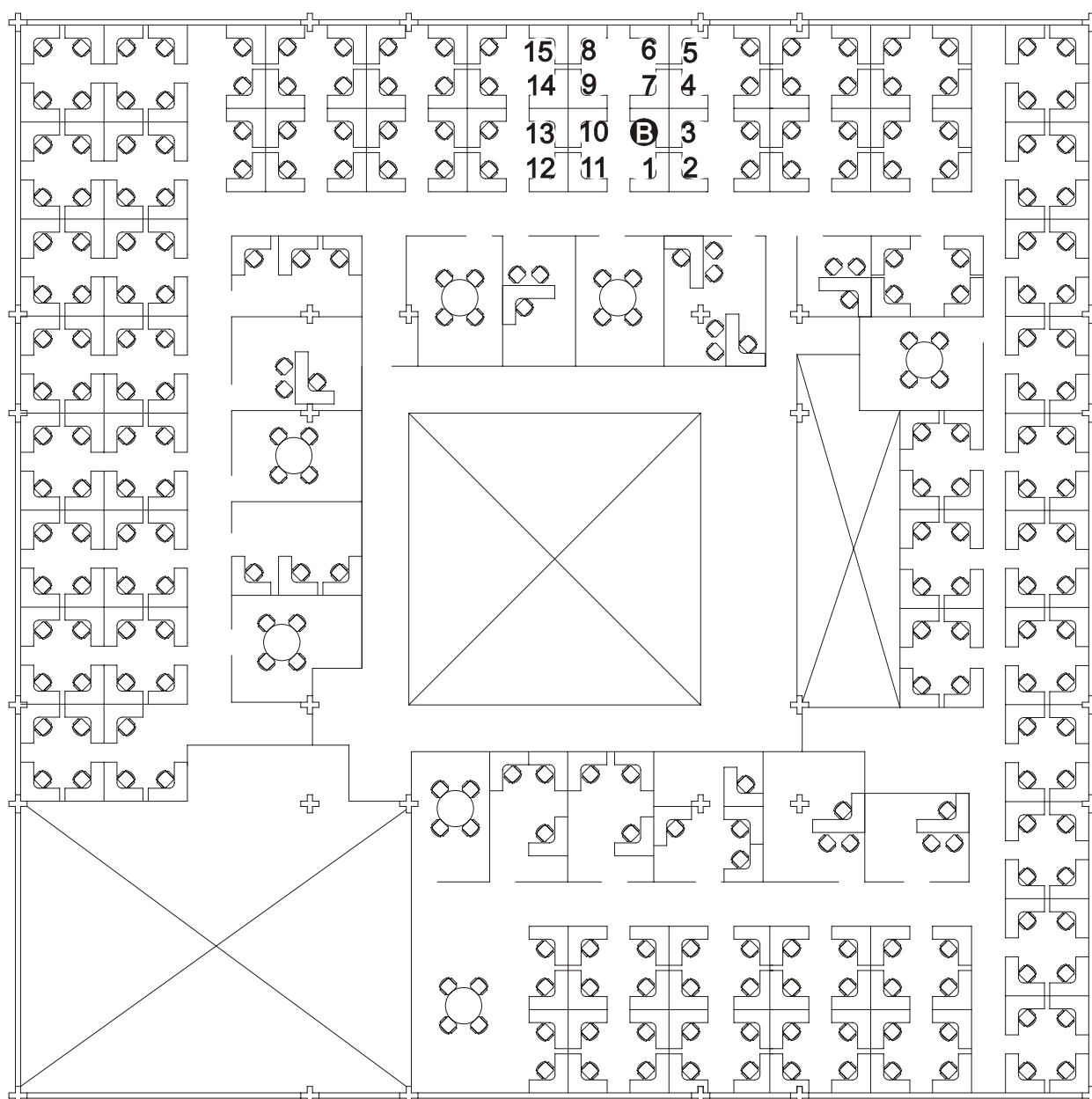


Planta 6. Localização da fonte e receptores na medição do STI no escritório 1.

Tabela 27. STI medido no escritório 1.

Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI
1	0,83	8	0,68	15	0,73
2	0,80	9	0,72	16	0,66
3	0,83	10	0,79	17	0,68
4	0,78	11	0,70	18	0,70
5	0,71	12	0,65	19	0,65
6	0,66	13	0,62	20	0,65
7	0,77	14	0,71	21	0,67

Fonte: Autor.

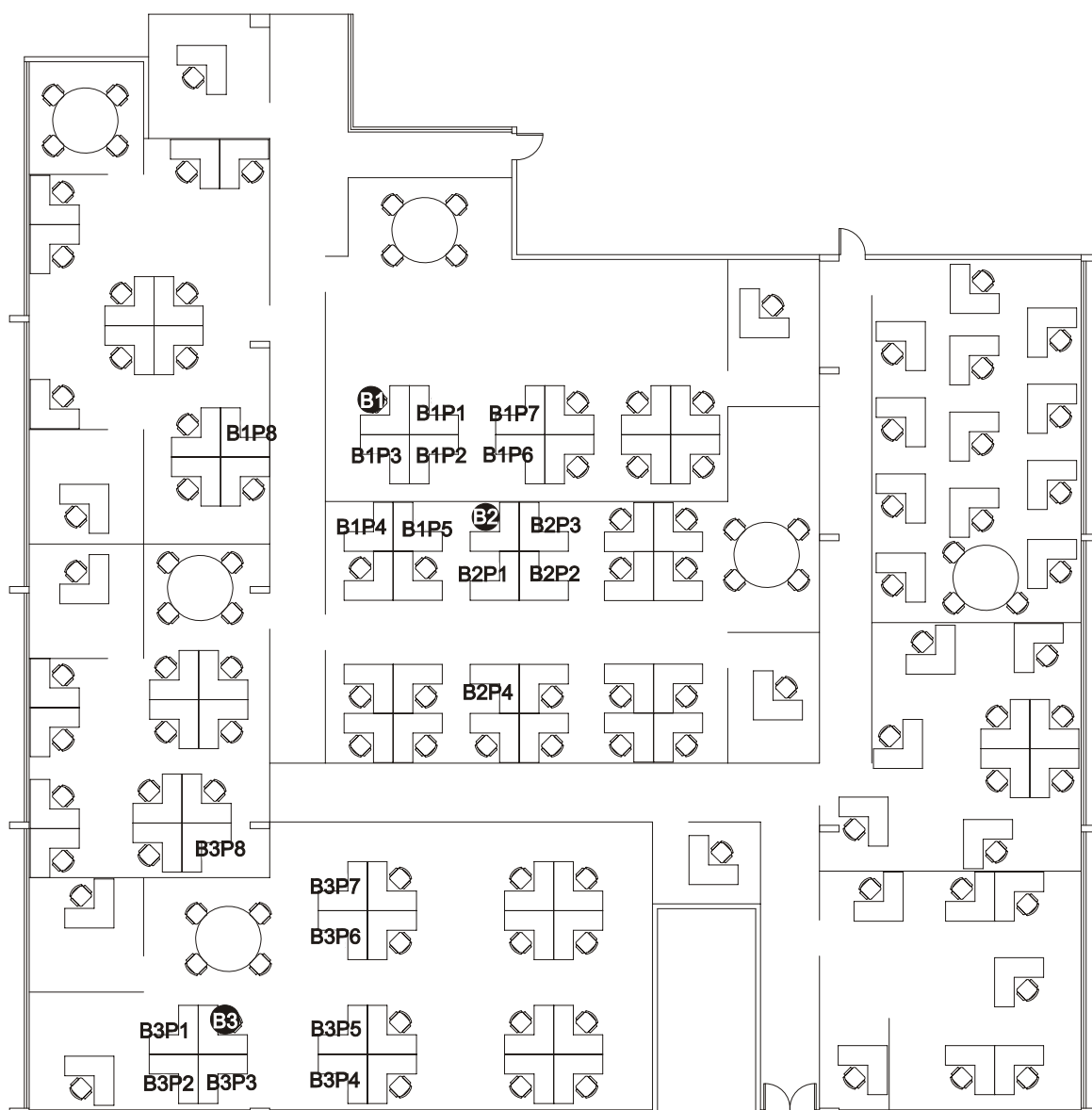


Planta 7. Localização da fonte e receptores na medição do STI no escritório 2.

Tabela 28. STI medido no escritório 2.

Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI
1	0,80	6	0,68	11	0,78
2	0,62	7	0,69	12	0,56
3	0,65	8	0,68	13	0,59
4	0,65	9	0,71	14	0,60
5	0,67	10	0,76	15	0,57

Fonte: Autor.

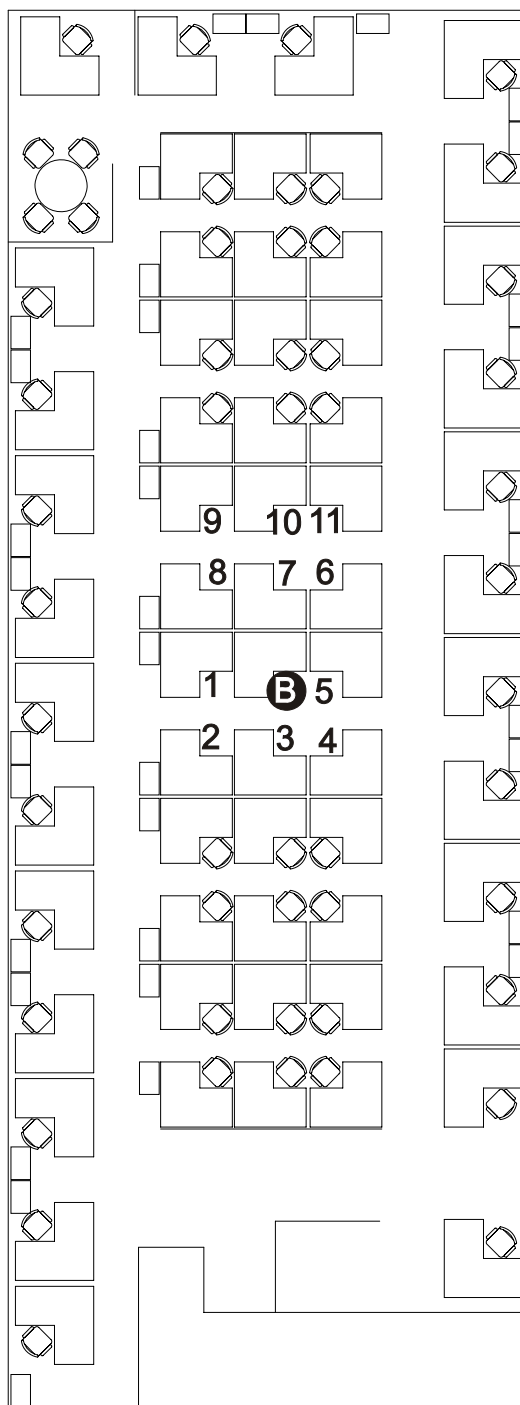


Planta 8. Localização das fontes e receptores na medição do STI no escritório 3.

Tabela 29. STI medido no escritório 3.

Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI
B1P1	0,83	B2P1	0,78	B3P1	0,79
B1P2	0,68	B2P2	0,70	B3P2	0,76
B1P3	0,81	B2P3	0,79	B3P3	0,89
B1P4	0,52	B2P4	0,56	B3P4	0,73
B1P5	0,52			B3P5	0,74
B1P6	0,60			B3P6	0,79
B1P7	0,63			B3P7	0,72
B1P8	0,53			B3P8	0,60

Fonte: Autor.

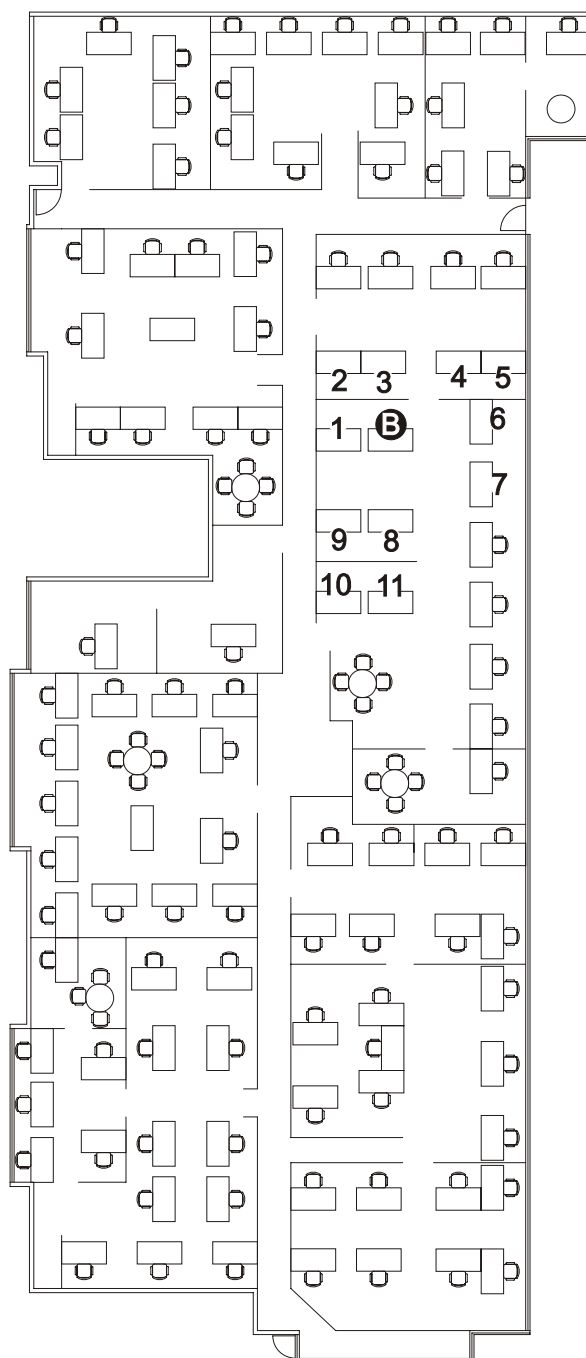


Planta 9. Localização da fonte e receptores na medição do STI no escritório 4.

Tabela 30. STI medido no escritório 4.

Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI
1	0,88	5	0,78	9	0,73
2	0,80	6	0,70	10	0,73
3	0,80	7	0,89	11	0,63
4	0,83	8	0,78		

Fonte: Autor.



Planta 10. Localização da fonte e receptores na medição do STI no escritório 5.

Tabela 31. STI medido no escritório 5.

Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI	Ponto de Medição	STI
1	0,84	5	0,62	9	0,84
2	0,62	6	0,74	10	0,64
3	0,65	7	0,75	11	0,62
4	0,69	8	0,81		

Fonte: Autor.

Na maioria dos escritórios, o STI foi medido com apenas uma posição de fonte, pois se observou repetição do arranjo de postos de trabalho e características arquitetônicas ao longo do escritório. Apenas no escritório 3 a boca artificial (fonte sonora) foi locada em três posições distintas. Essa medida foi tomada, pois foram percebidas diferenças de arranjo das estações e de características arquitetônicas na extensão do escritório. Por exemplo, onde foram locadas as fontes 1 e 3 não haviam divisórias entre os pontos (ver fotografias 14 e 15), já onde foi inserida a fonte 2, existiam tais divisórias. Outra característica que se diferenciava na extensão do escritório 3 era o tipo de material e altura do teto. Para a localização das fontes 1 e 2, fotografia 14, o teto era mais alto e inclinado (telhado), já no ponto de localização da fonte 3, existia forro acústico instalado no local, com teto mais baixo e plano, fotografia 15.



Fotografia 14. Área no escritório 3 onde foi locada a fonte 1. Fonte: Autor.



Fotografia 15. Área no escritório 3 onde foi locada a fonte 3. Fonte: Autor.

Quando verificados os valores de STI medidos, tabelas 6 a 10, percebe-se grande variação entre os valores conforme o ponto de medição. Se esses valores das tabelas forem comparados à localização dos pontos nas plantas, vê-se que essa variação está fortemente ligada com a proximidade de receptor e fonte e localização do receptor em relação à orientação da fonte.

Observando a planta 9 e a tabela 30, escritório 4, é claro que o ponto 5 é o receptor mais próximo da fonte, entretanto o maior STI foi encontrado na medição do ponto 1. Isso ocorre pela orientação e diretividade da fonte. A fonte possui diretividade semelhante a da boca humana, o ponto 1 está representado por um ouvinte na frente do orador, boca artificial, e o ponto 5 seria um ouvinte nas costas desse orador. Segundo Egan (1988), é comum encontrar uma diferença de 10 dB no nível da fala entre a frente e as costas do orador, por isso essa variação de STI entre os pontos 1 e 5 (planta 9 e tabela 30).

Essa influência da orientação e diretividade da fonte nos resultados de STI, encontrada neste estudo, concorda com a literatura nacional e internacional (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003; INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE, 2002; MÜLLER, 2007; SAN MARTÍN et al., 2007; BOZZOLI; VIKTOROVITCH; FARINA, 2005; NAYLOR; RINDEL, 1992; RONSSE, 2006; HOUTGAST; STEENEKEN, 1985).

No escritório 2, planta 7 e tabela 28, os resultados obtidos foram diferenciados dos medidos no escritório 4. No escritório 2, o maior valor de STI está representado pelo ponto 1 (0,80). Esse ponto está localizado próximo ao orador, nas suas costas. Os pontos 3 e 7, situados aproximadamente a mesma distância do orador que o ponto 1, mas na sua frente, tiveram valores de STI menores, 0,65 e 0,69 respectivamente. Isso é explicado pela existência de divisórias entre as estações de trabalho.

No escritório 4, existiam pequenas divisórias, ocupando aproximadamente 1/3 da extensão da linha divisória entre as estações, com altura de 1,15m a partir do nível do chão, fotografia 16.



Fotografia 16. Estação de trabalho no escritório 4. Fonte: Autor.

Já no escritório 2, havia divisórias com altura de 1,30m, ocupando toda a extensão da linha divisória entre as estações, fotografia 17.



Fotografia 17. Estação de trabalho no escritório 2. Fonte: Autor.

Assim, com essa comparação, torna-se clara a influência das divisórias na inteligibilidade da fala entre estações de trabalho. As divisórias funcionam como uma barreira que reduz a inteligibilidade entre as estações de trabalho (BRADLEY, 2003; 2007), evitando o som direto de um orador para outros grupos de conversação (KANG, 2002).

Através dos resultados obtidos nas medições, foram percebidas limitações desses dados para a avaliação acústica dos escritórios em sua totalidade. Os pontos medidos possuem características pontuais, existindo grande variação conforme a localização do ponto de medição, tanto para o STI como para o T_r . As medições in situ apresentam restrições no que diz respeito ao número de pontos medidos e à precisão na localização desses pontos. Por isso, a fim de complementar os dados obtidos, optou-se pela simulação acústica desses escritórios. Nesse raciocínio, a vantagem da simulação sobre a medição é a possibilidade de obtenção de

um número maior de pontos receptores, possibilitando a análise do comportamento sonoro em toda a extensão das salas. Apesar dessas limitações, as medições são essenciais para a calibração dos dados simulados (NIJS et al., 2002; LONG, 2006; BRADLEY; WANG, 2007; SCHROEDER; GEALACH, 1974).

4.3 Calibração de Parâmetros Acústicos

Para as calibrações, foram simuladas as situações reais dos escritórios estudados. Nessas simulações, fontes e receptores foram locados nos mesmos pontos das medições (RONSSE, 2006). Os parâmetros utilizados para a calibração do modelo foram o T_r e o STI.

Durante a calibração, os dados manipulados foram os coeficientes de absorção e de espalhamento das superfícies das salas (BORK, 2000, 2005a; NAYLOR; RINDEL, 1992; BRADLEY; WANG, 2007; KATZ; WETHERILL, 2007; RINDEL, 2000). Para a verificação da precisão do modelo, foi utilizado o desvio padrão e a média espacial dos pontos medidos em cada sala avaliada. Os dados simulados deveriam estar no intervalo da média + ou - o desvio padrão ($M \pm \sigma$). Comparações semelhantes foram realizadas em estudos desenvolvidos por Vorländer (1995). Os gráficos a seguir apresentam os valores médios de T_r medidos e simulados, assim como $M \pm \sigma$ dos valores medidos para cada escritório.

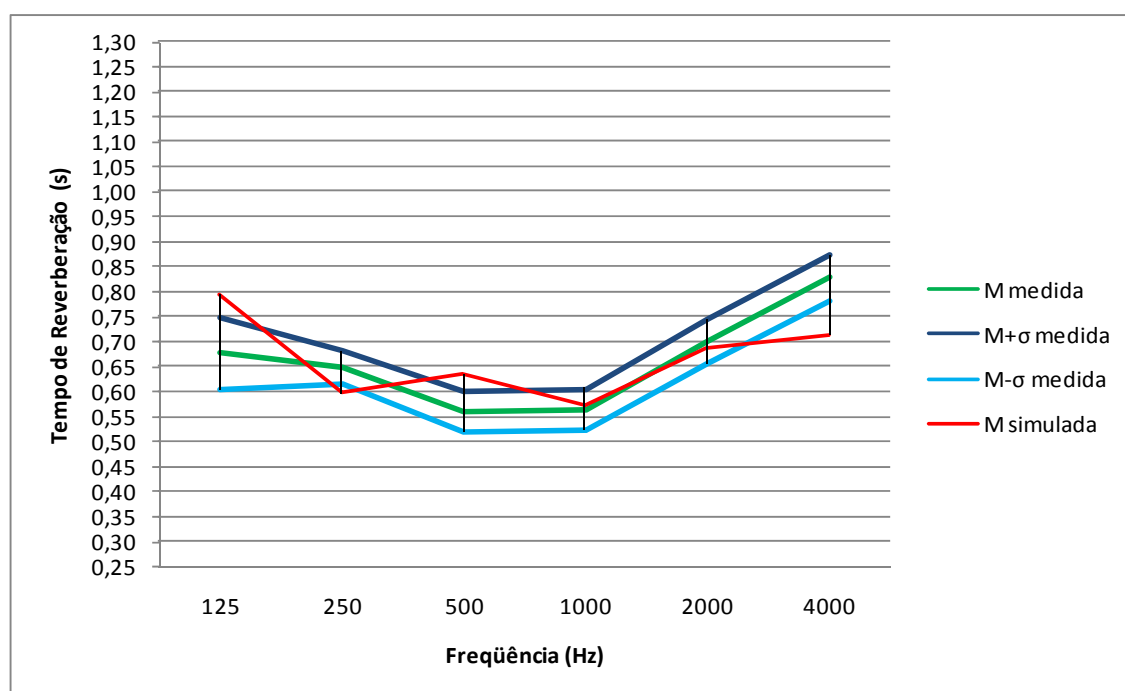


Gráfico 16. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 1, calibração do modelo computacional.

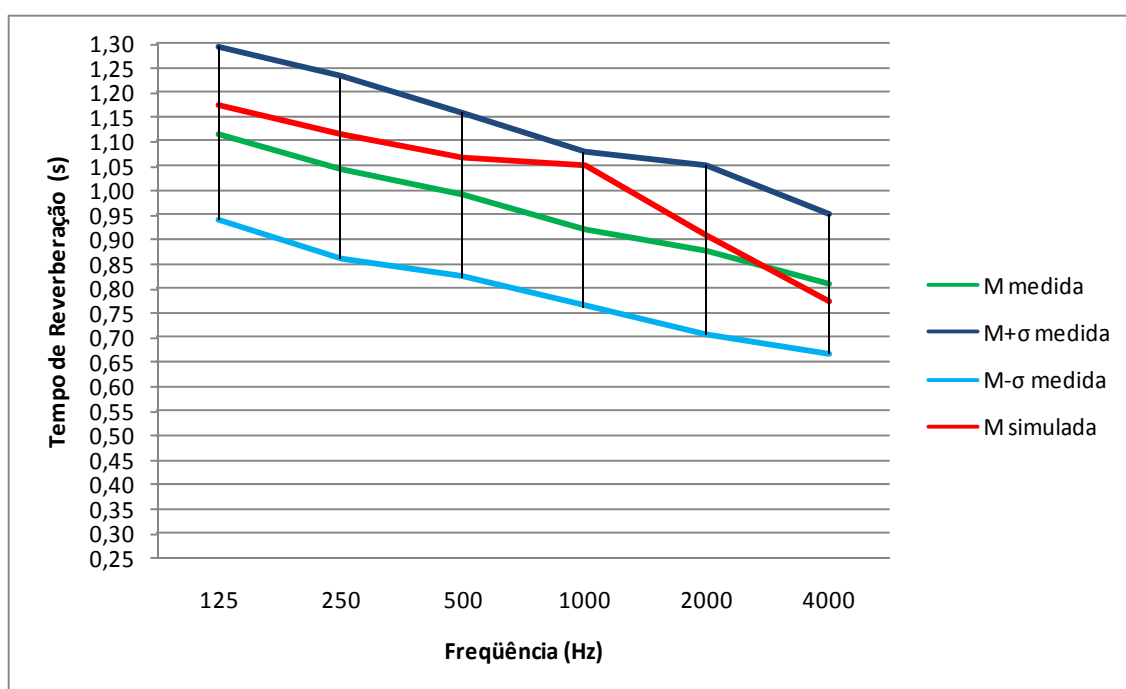


Gráfico 17. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 2, calibração do modelo computacional.

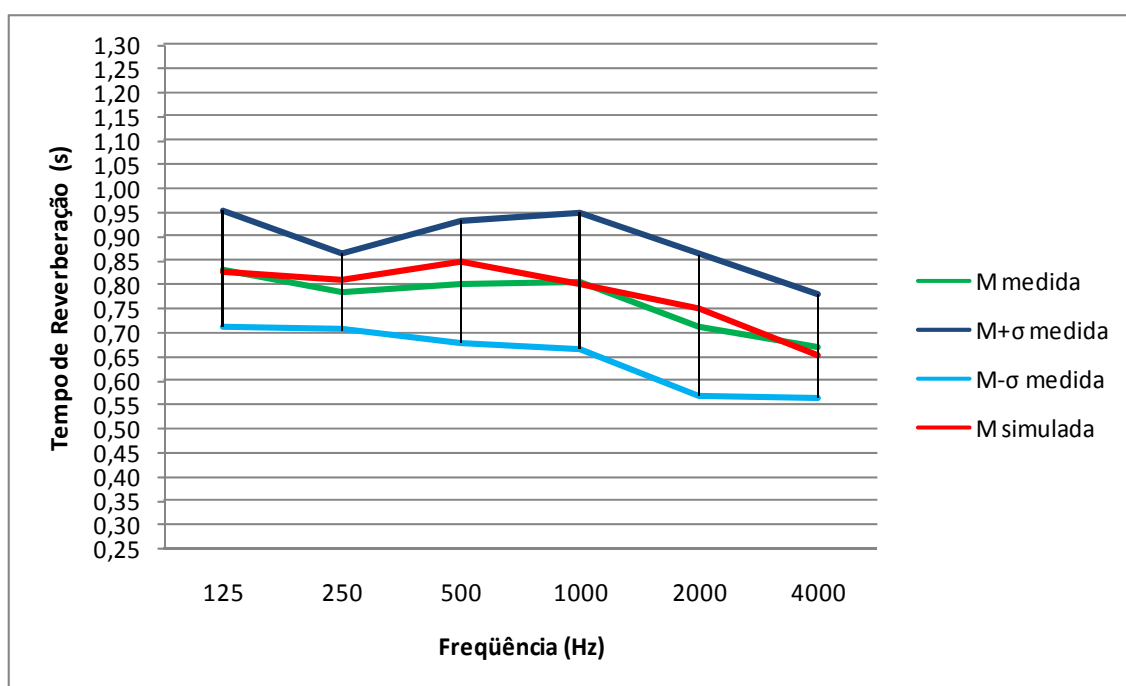


Gráfico 18. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 3, calibração do modelo computacional.

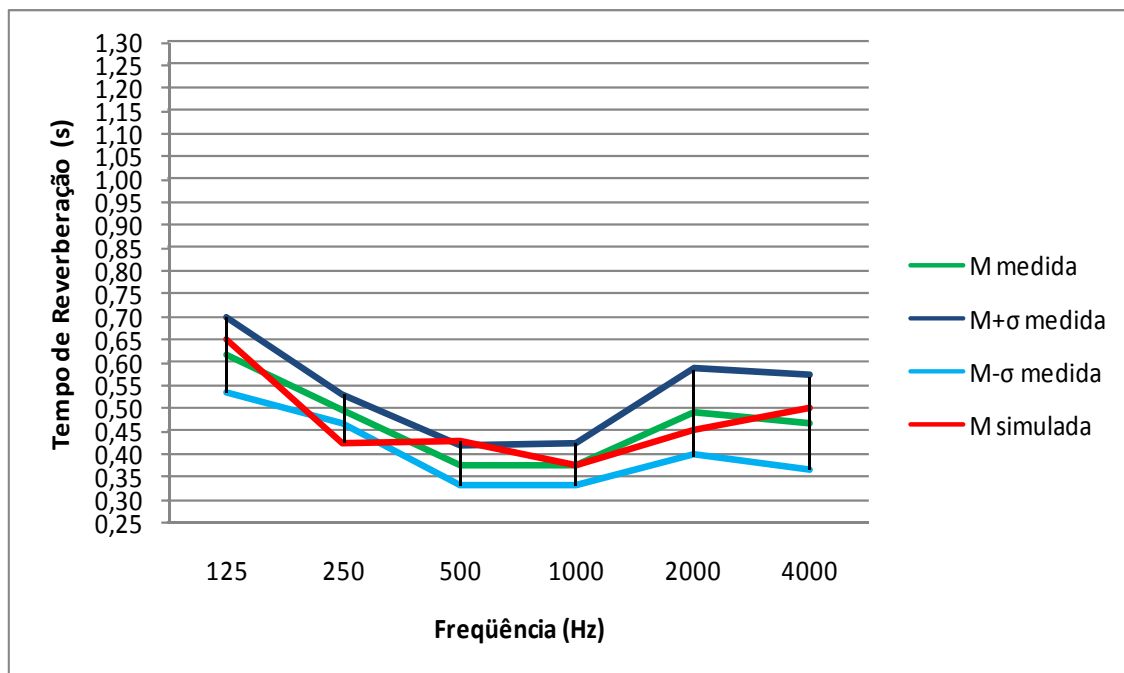


Gráfico 19. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 4, calibração do modelo computacional.

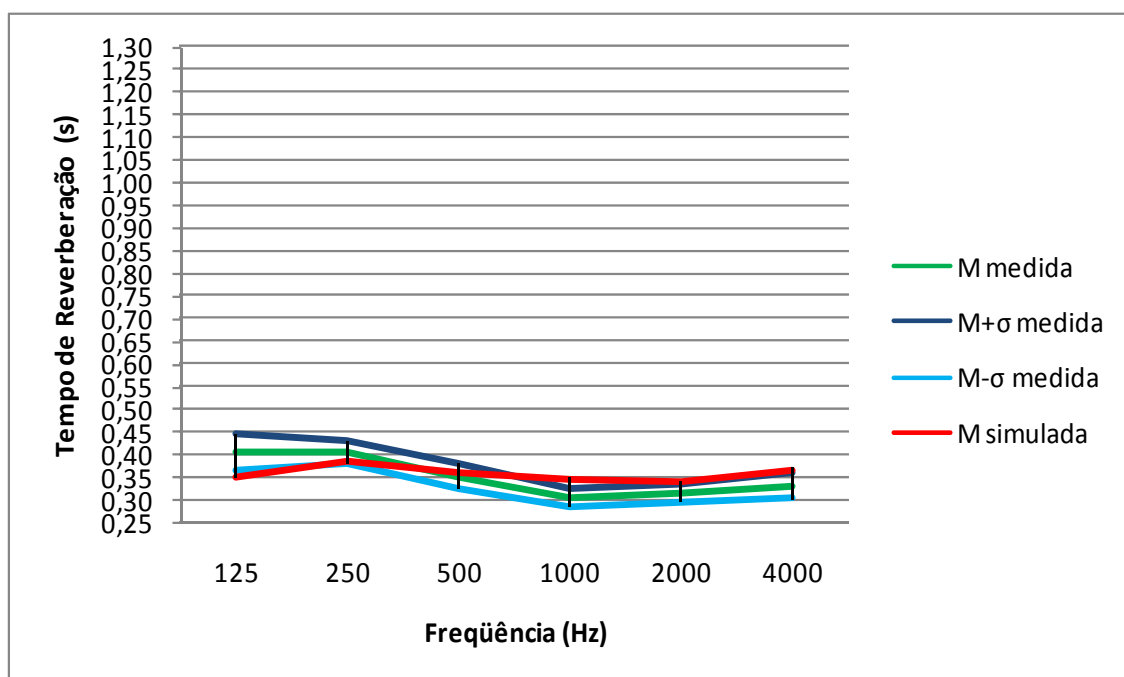


Gráfico 20. Tempo de reverberação medido e simulado no escritório 5, calibração do modelo computacional.

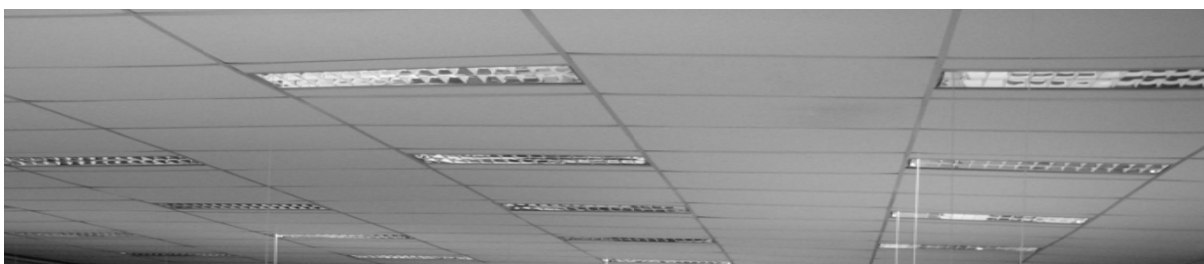
Para a calibração, a alteração dos coeficientes das maiores superfícies, teto e piso, provocava as mudanças mais significativas no tempo de reverberação simulado. Observou-se que a alteração dos coeficientes dessas duas superfícies em conjunto gerava grande modificação dos dados simulados. Os coeficientes de absorção (α) eram alterados através da substituição de materiais contidos na biblioteca do software Odeon 9.0 ou em bibliografia

consultada. Por exemplo, substituição de carpete com diferentes densidades, forros com diversas formas de instalação, entre outros. Além do coeficiente de absorção, também era alterado o coeficiente de espalhamento (δ). No Odeon 9.0 é especificado, para cada material, um coeficiente de espalhamento único para todas as frequências, entretanto, esse coeficiente é dependente da frequência, assim como ocorre com o coeficiente de absorção (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000). Percebeu-se grande alteração dos valores de T_r com uma pequena modificação do coeficiente de espalhamento, principalmente em relação a diferenças de T_r entre as frequências. Assim, observou-se a necessidade do coeficiente de espalhamento ser também especificado por frequência, provavelmente se existisse tal possibilidade, poderiam ser gerados valores mais precisos de T_r . Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos, segundo Christensen (2003), a imprecisão dos coeficientes de espalhamento inseridos em simulações computacionais é uma das principais fontes de erros.

Além da modificação dos coeficientes, outra alteração realizada durante as calibrações foram pequenas mudanças na posição de fontes e receptores. Buscou-se manter o mesmo posicionamento nas medições e simulações, entretanto, poderia ter ocorrido uma pequena mudança de posicionamento quando o ponto foi transposto da medição para a simulação. Segundo Naylor e Rindel (1992), uma precisão de ± 30 cm na transferência de dados da medição para a simulação é considerada muito boa, sendo normalmente essa variação maior. Esses autores afirmam que quando fonte ou microfone são movidos em um raio de 30 cm em uma medição, o T_r sofre um desvio padrão de 0,04s. Dessa forma, pode-se considerar que uma variação de 0,04s entre T_r medido e simulado é resultante da imprecisão previsível na transposição da localização de fontes e receptores da medição para a simulação.

Durante a calibração do modelo, foi encontrada maior dificuldade para se obter resultados precisos nos escritórios que possuíam forro acústico. As incertezas em relação à forma de instalação, especificação do forro: densidade, espessura e material, e desgaste pelo tempo geraram tal dificuldade. Foram testados forros contidos na biblioteca de materiais do software Odeon 9.0 com características semelhantes às dos forros encontrados nos escritórios. Nessa biblioteca, há a especificação dos materiais e os coeficientes de absorção para cada frequência em banda de oitava. Durante o processo de calibração, além da alteração do material, coeficiente de absorção, também era alterado o coeficiente de espalhamento. As frequências de maior dificuldade de calibração foram as de 250 e 500 Hz para escritórios com forro acústico. Nos gráficos 16 e 19, escritórios 1 e 4, pode ser percebida essa dificuldade de calibração. Na simulação, os valores de T_r para a frequência de 250Hz é igual ou menor que para a frequência de 500 Hz, já na medição, o T_r para 250 Hz é maior que para 500 Hz. No

gráfico 20, apesar do escritório 5 também possuir forro acústico, essa diferença entre o T_r medido e simulado para as frequências de 250 e 500 Hz não foi tão marcante, mas ainda é perceptível. Essa discordância pode ter sido ocasionada pela forma de inserção do coeficiente de espalhamento. Como dito anteriormente, o δ inserido é válido para todas as frequências, entretanto, o δ é dependente da frequência sonora. Segundo Christensen (2003), o espalhamento geométrico em baixas frequências é dominado pela difração e pelo limite de tamanho das superfícies, já em altas frequências é dominada pela irregularidade das superfícies. Assim, superfícies com grandes dimensões possuem δ reduzido nas baixas frequências, mas podem possuir δ maior nas altas frequências se forem superfícies irregulares. No caso dos forros acústicos, esses materiais normalmente revestem grandes superfícies em escritórios panorâmicos, entretanto, são irregulares devido à forma de instalação, com perfis, inserção de luminárias embutidas e existência de pequenas perfurações na superfície de acabamento, fotografia 18. Por isso, houve grande dúvida em relação ao valor do coeficiente de espalhamento, único para todas as frequências, que deveria ser estipulado para forros acústicos nos cálculos no Odeon 9.0.



Fotografia 18. Forro acústico no escritório 4. Fonte: Autor

Em relação aos valores de STI medidos e simulados, a comparação desses foi utilizada como uma confirmação da calibração do modelo. O STI é muito dependente da localização do ponto de medição ou simulação, sofrendo grande modificação ao longo da sala. Assim, uma pequena imprecisão no momento da transposição da localização do ponto medido para o modelo computacional acarretava em grande variação do STI. Além disso, a utilização na simulação de uma fonte sonora com alguma característica diferenciada da fonte utilizada na medição resulta em valores distintos de STI. Por exemplo, durante a medição do STI o nível de pressão sonora foi ajustado à distância de 1 m da fonte através da medição do $LA_{eq} = 65$ dB. Durante esse ajuste, além do sinal da boca artificial, também foi captado o ruído de fundo do ambiente, não havendo precisão do sinal real emitido pela fonte no momento da medição.

Na simulação, não era possível estabelecer um nível de pressão sonora a 1 m da fonte, pois o software não permite tal especificação, sendo possível apenas indicar a potência sonora da fonte. Durante a calibração do modelo computacional, a potência sonora da fonte foi ajustada para se aproximar os valores simulados aos medidos de STI. Entretanto, para as simulações posteriores, foi mantido o mesmo nível de potência sonora da fonte, 67,4 dB(A), para todos os escritórios. Adotou-se tal procedimento a fim de se ter um padrão para comparação dos resultados obtidos nas simulações dos escritórios. Assim, o ajuste da fonte não teve validade como calibração do modelo.

Devido a tais variáveis, percebeu-se que não é possível calibrar o modelo computacional apenas através dos valores de STI, devendo esses ser utilizados como um verificador de discordâncias localizadas existentes entre o modelo computacional e o ambiente real. Exemplos dessas discordâncias são o mobiliário e equipamentos não considerados durante a modelagem das salas, mas que, durante a comparação dos dados medidos e simulados de STI, observou-se que alteravam os valores desse parâmetro.

Os gráficos a seguir apresentam os valores medidos e simulados para o STI. A localização dos pontos medidos e simulados, vistos nos gráficos, está representada nas plantas 6 a 10 para os escritórios 1 a 5, respectivamente.

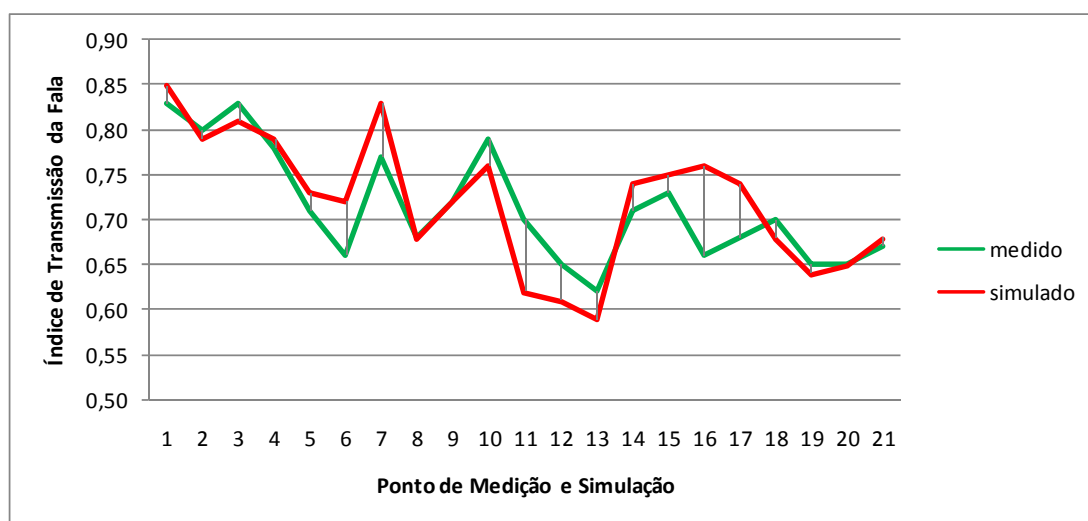


Gráfico 21. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 1, calibração do modelo computacional.

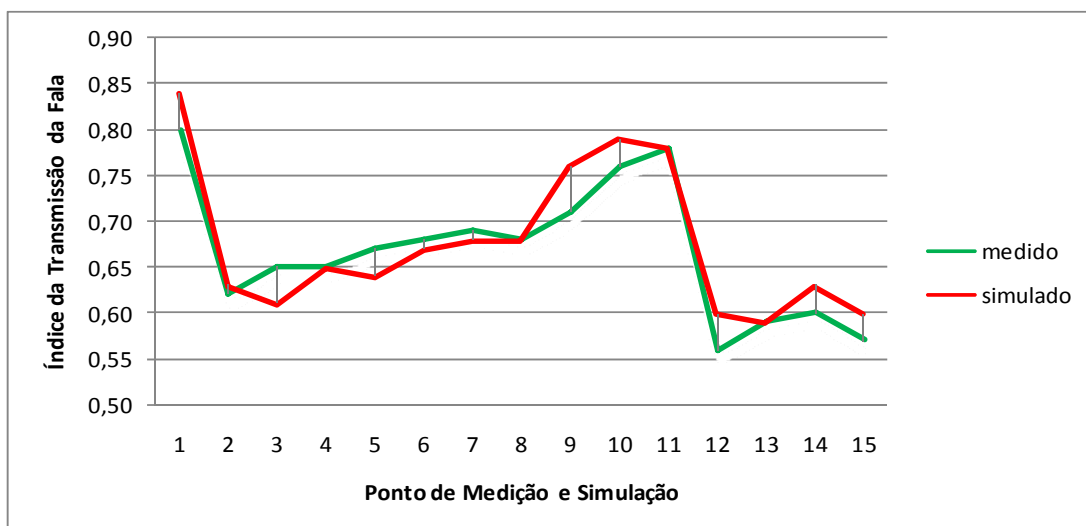


Gráfico 22. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 2, calibração do modelo computacional.

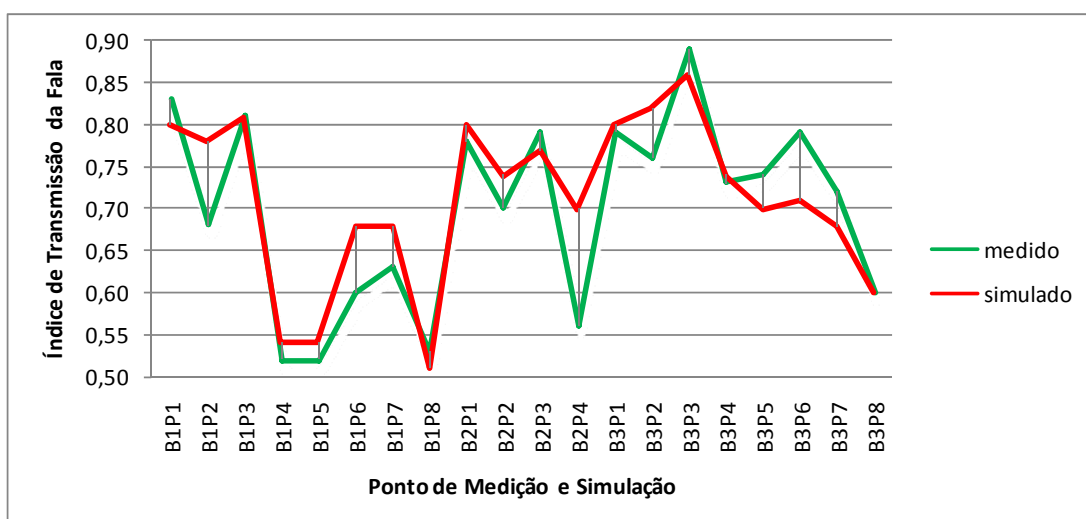


Gráfico 23. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 3, calibração do modelo computacional.

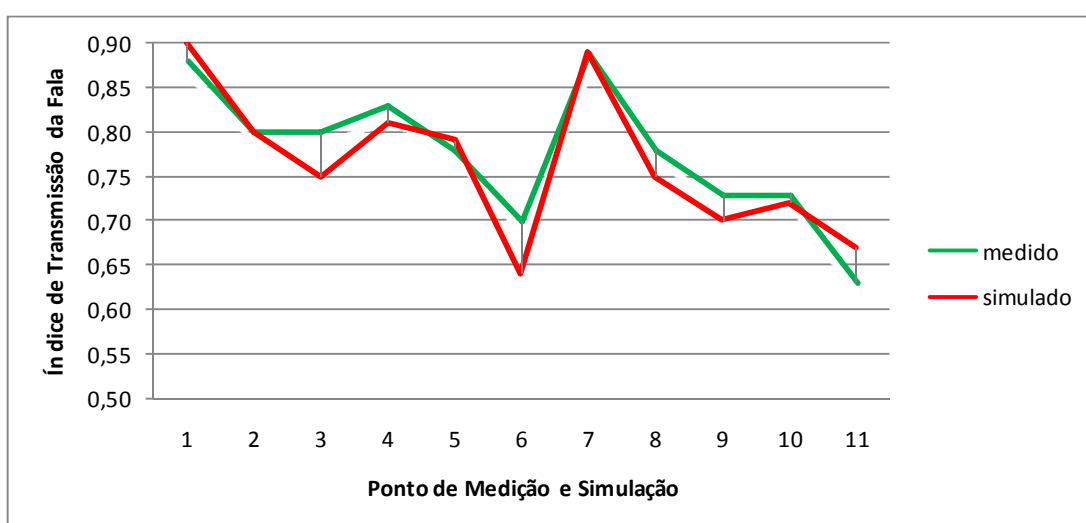


Gráfico 24. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 4, calibração do modelo computacional.

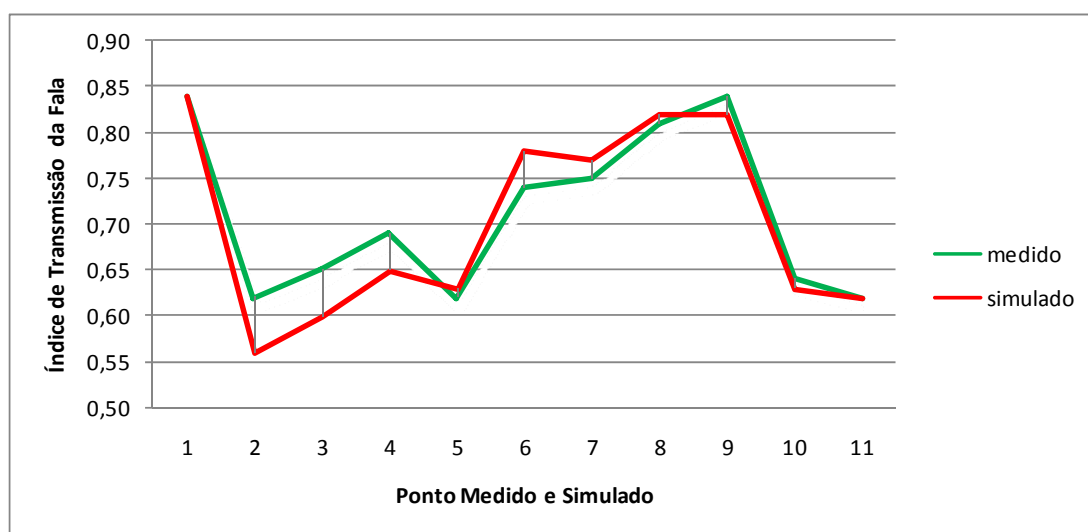


Gráfico 25. Índice de transmissão da fala medido e simulado no escritório 5, calibração do modelo computacional.

No gráfico 23, escritório 3, pode-se perceber as maiores diferenças entre valores de STI medidos e simulados. Essas diferenças são próximas a 0,1 nos pontos B1P2, B1P6, B2P4 e B3P6. Nos pontos B1P2, B1P6, B2P4, os valores simulados de STI foram 0,1, 0,08 e 0,14, respectivamente, superiores aos valores medidos. Essa diferença pode ser justificada pela existência de monitores de computador no canto do “L” dos postos de trabalho no escritório real que não foram considerados na simulação. Os monitores funcionam como uma barreira do som direto, reduzindo o STI principalmente na estação de trabalho em frente ao orador. Já no ponto B3P6 ocorre o oposto, o monitor em frente ao orador reflete o som, gerando reflexões recentes e aumentando o STI na estação de trabalho atrás desse orador, no caso a estação onde foi localizado o ponto B3P6. Por não considerar as reflexões provenientes do monitor, nesse ponto, o STI simulado foi 0,08 menor que o STI medido. Na fotografia 19 pode ser vista a localização dos monitores nas estações de trabalho no escritório 3.

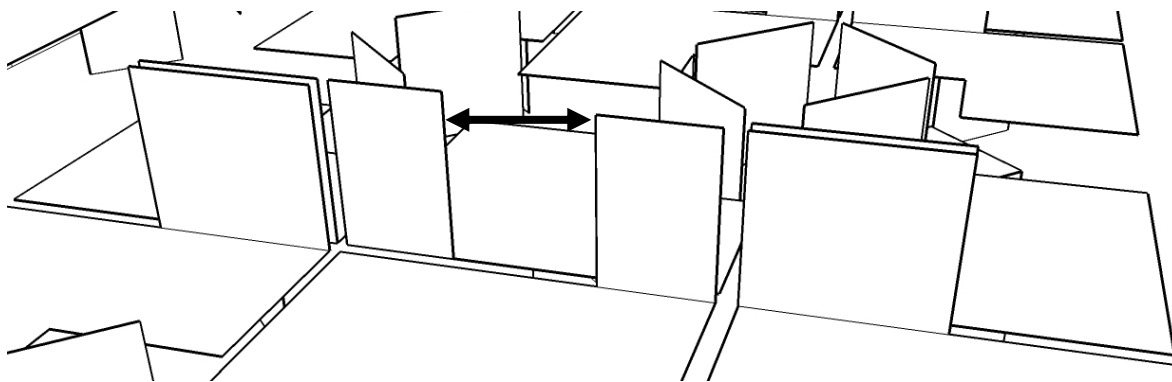


Fotografia 19. Localização dos monitores nos postos de trabalho no escritório 3. Fonte: Autor

No escritório 3 o modelo não sofreu alterações para melhoria dos valores simulados de STI nesses pontos, pois se tratava de divergências localizadas, apenas em 20% dos pontos. Já no escritório 4 tal divergência ocorria na maioria dos pontos. Assim, o modelo foi alterado, sendo inserida uma superfície no local do monitor do computador a fim de simulá-lo. Essa modificação foi realizada apenas nas estações de trabalho centrais, onde o monitor realizava a maior influência nos valores de STI simulados. Resumidamente, na simulação, foi limitado através de superfícies o espaço vazio por onde o som direto passava entre as estações vizinhas nos escritórios reais. A fotografia 20 e o desenho 14 representam essa passagem do som direto, flecha, no escritório real e na simulação, respectivamente.



Fotografia 20. Passagem do som nas estações centrais no escritório 4, situação real. Fonte: Autor



Desenho 14. Passagem do som nas estações centrais no escritório 4, simulação computacional. Fonte: Autor.

Essa modificação realizada no modelo computacional do escritório 4 representou adequadamente o ambiente sonoro dessa sala. Isso é comprovado quando comparados os valores de STI medidos e simulados, gráfico 24. Apenas no ponto 6 a diferença entre os dados reais e simulados é superior a 0,05. Nesse ponto, a diferença entre simulação e medição é de 0,06, valor muito próximo a 0,05. Segundo Bork (2000), uma diferença de até 0,05 no STI é imperceptível pelo ouvido humano, sendo esse valor adotado para a verificação da precisão dos valores simulados de STI. Como para apenas o ponto 6 o valor de STI foi superior ao limiar da percepção subjetiva, mas muito próximo dele, o modelo foi considerado preciso para o cálculo dos valores de STI.

Durante a calibração do modelo através dos valores de STI, buscou-se que a maioria dos pontos simulados tivesse uma diferença, quando comparados aos valores medidos, inferior ao limiar de percepção subjetiva, 0,05. Quando isso era alcançado, a calibração era considerada concluída.

Assim, após a calibração dos modelos computacionais, observou-se a importância dessa etapa para a precisão dos dados simulados posteriormente. A calibração é uma fase do trabalho indispensável e que necessita de grande conhecimento da literatura existente e certa experiência e sensibilidade por parte do pesquisador (BORK, 2000). No caso dos escritórios panorâmicos, a calibração através de valores de T_r e STI medidos se mostrou adequada. Entretanto, foi encontrada dificuldade de se obter a precisão dos dados indicada na literatura (VORLÄNDER, 1995; BORK, 2000), intervalo de $M \pm \sigma$ para o T_r e limiar de percepção subjetiva para o STI. Essa dificuldade é consequência da imprecisão, ao transpor para escritórios reais, dos coeficientes de absorção e espalhamento dos materiais contidos na literatura e da imprecisão na transferência da localização dos pontos da medição para a simulação. Tal empecilho já havia sido apontado em literatura consultada (BORK, 2000, 2005a; NAYLOR; RINDEL, 1992; BRADLEY; WANG, 2007; KATZ; WETHERILL, 2007;

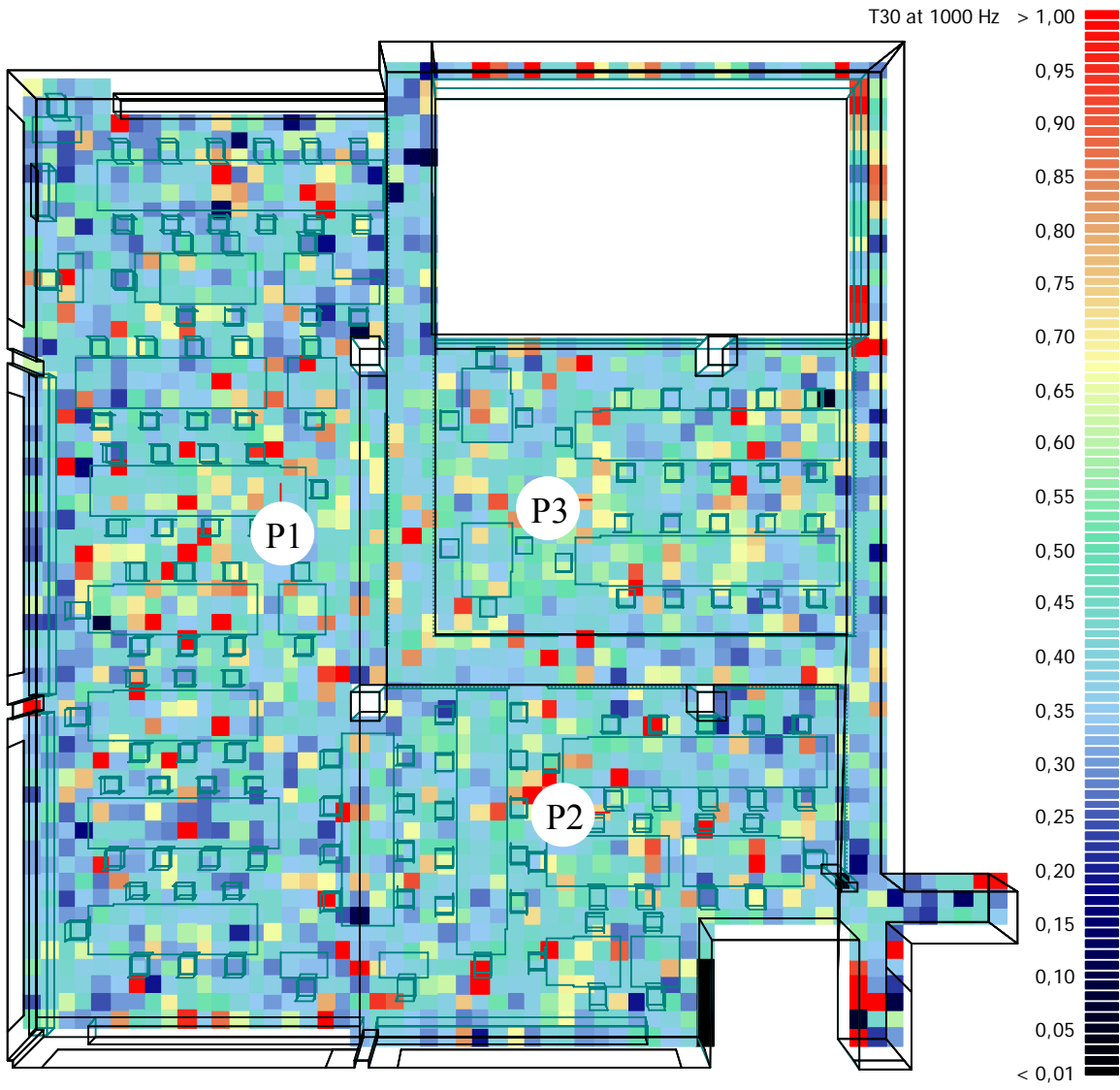
RINDEL, 2000). Além disso, há algumas limitações do software, como a restrição do coeficiente de espalhamento, especificado único para todas as frequências, e a forma de especificação do nível de pressão sonora da fonte na simulação do STI, no caso da simulação especificada através da potência da fonte.

Apesar das dificuldades e limitações encontradas durante a calibração, o método aplicado se mostrou, segundo a literatura, eficiente para calibrar os modelos computacionais. Dessa forma, os modelos calibrados nessa etapa foram a base para as simulações posteriores.

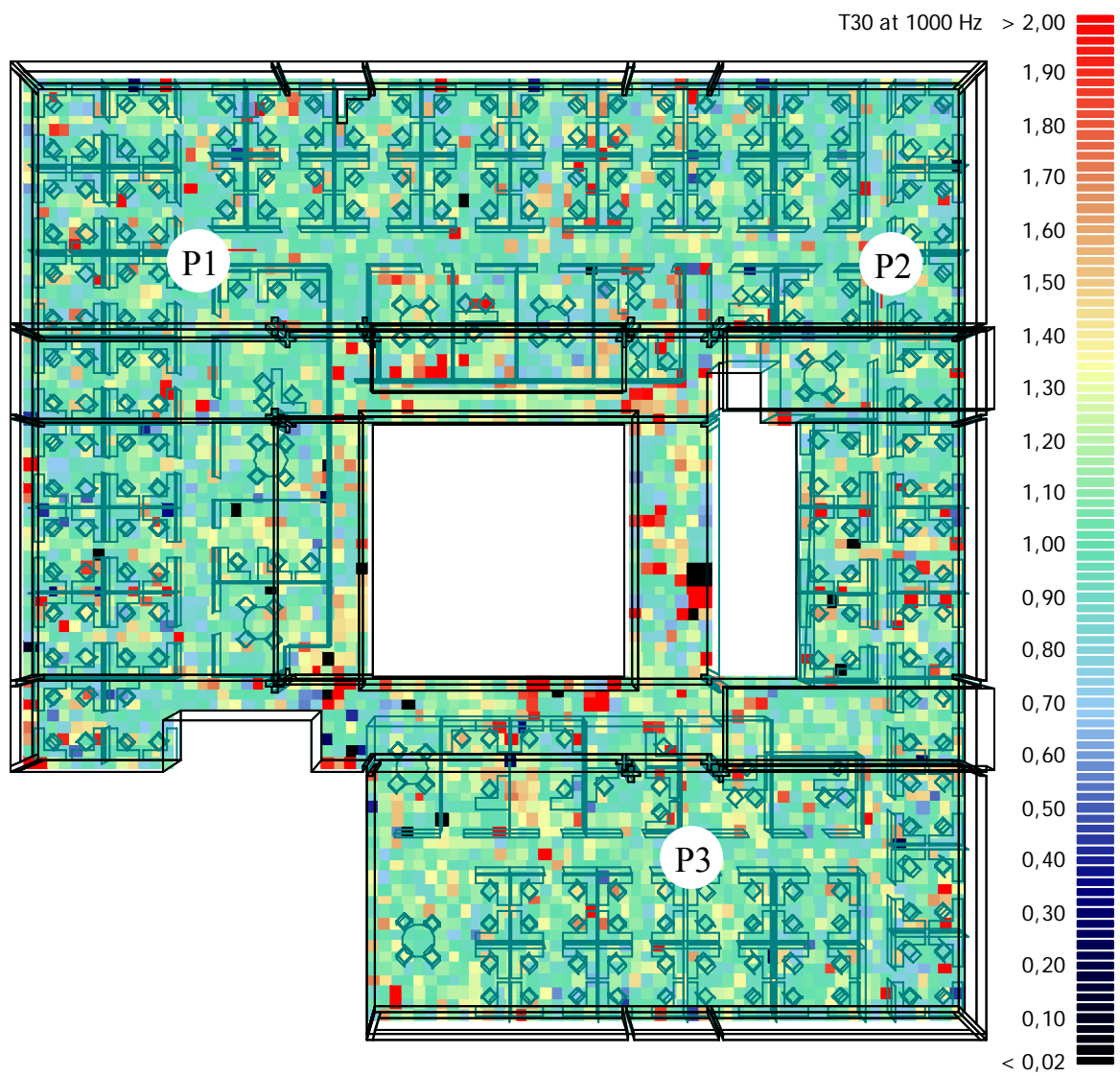
4.4 Simulação da situação original

Como dito anteriormente, após as calibrações, ainda com a condição real dos ambientes, foram realizadas novas simulações computacionais. Através dos resultados das medições e calibrações, pôde-se perceber que o tempo de reverberação (T_r) e o índice de transmissão da fala (STI) são dependentes da posição de fonte e receptor na sala. De forma a avaliar as salas em toda a sua extensão, foram realizadas simulações do T_r e do STI com receptores em malha. Das simulações do T_r foi obtido o T_r médio, por frequência em banda de oitava, e das simulações do STI foi obtido o raio de distração (r_D) para cada escritório. Além desses parâmetros, foi simulada a taxa de redução do ruído com o dobro da distância, representada através de um valor único ($DL_{2,C0}$).

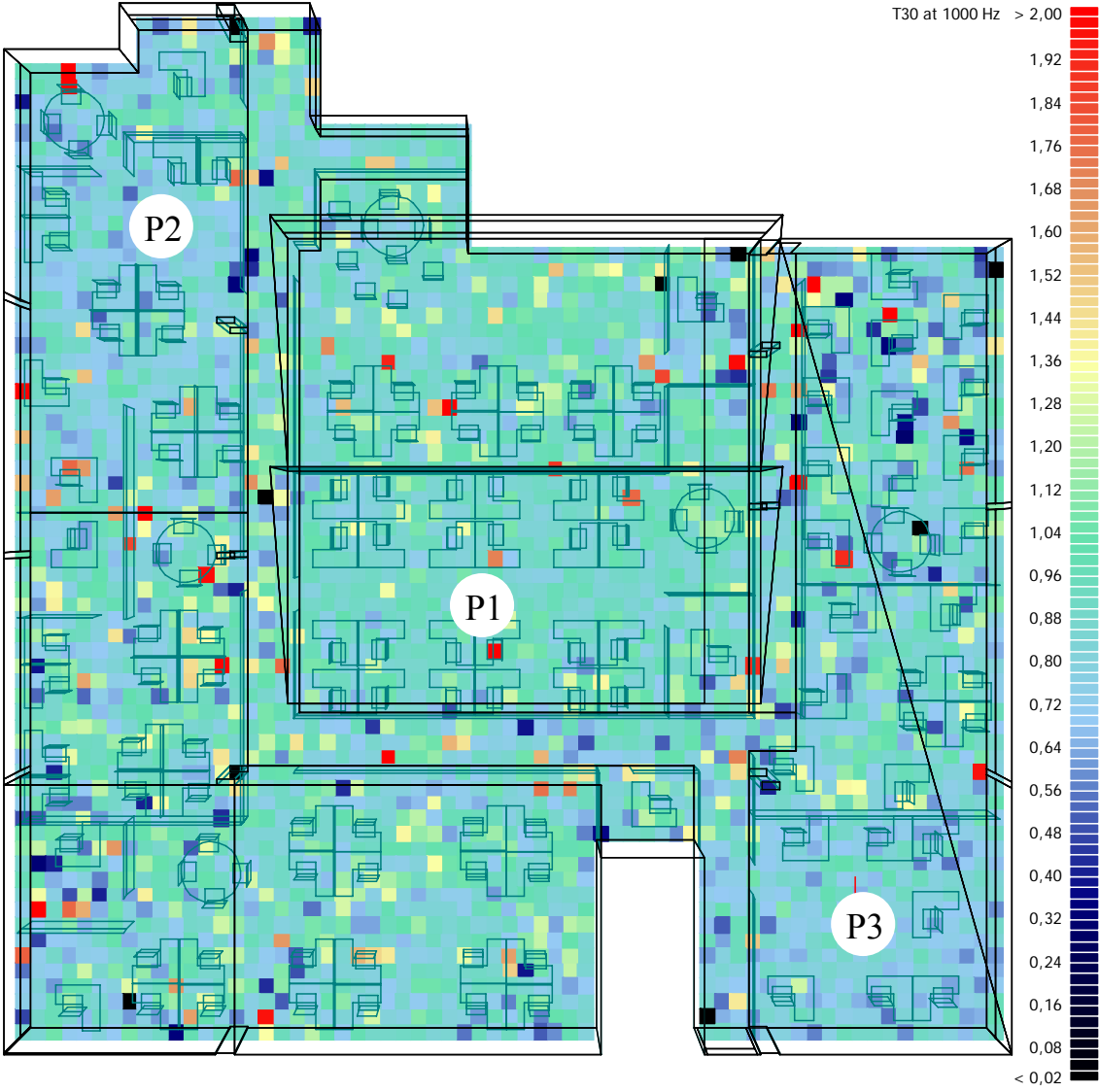
Para verificar a variação do T_r ao longo da sala, foram utilizados os mapas acústicos calculados pelo software Odeon 9.0 para esse parâmetro, na frequência de 1000 Hz, nos cinco escritórios. O software calcula um mapa para cada frequência em banda de oitava de 125 a 4000 Hz. Foi analisado o mapa em 1000 Hz, pois essa frequência é uma das dominantes do som em escritórios panorâmicos, tabela 20, e usualmente analisada nesse tipo de ambiente, com predominância de sons da fala (FREYMUTH et al., 2002). Os mapas a seguir, obtidos através do software Odeon 9.0, apresentam os valores de T_r com receptores em malha de 0,50 m x 0,50 m, na frequência de 1000 Hz. Nos mapas 1 a 5, P1, P2 e P3 representam a localização das fontes 1, 2 e 3. Esses mapas apresentam os valores médios dos pontos receptores calculados para a fonte localizada em cada uma das três posições.



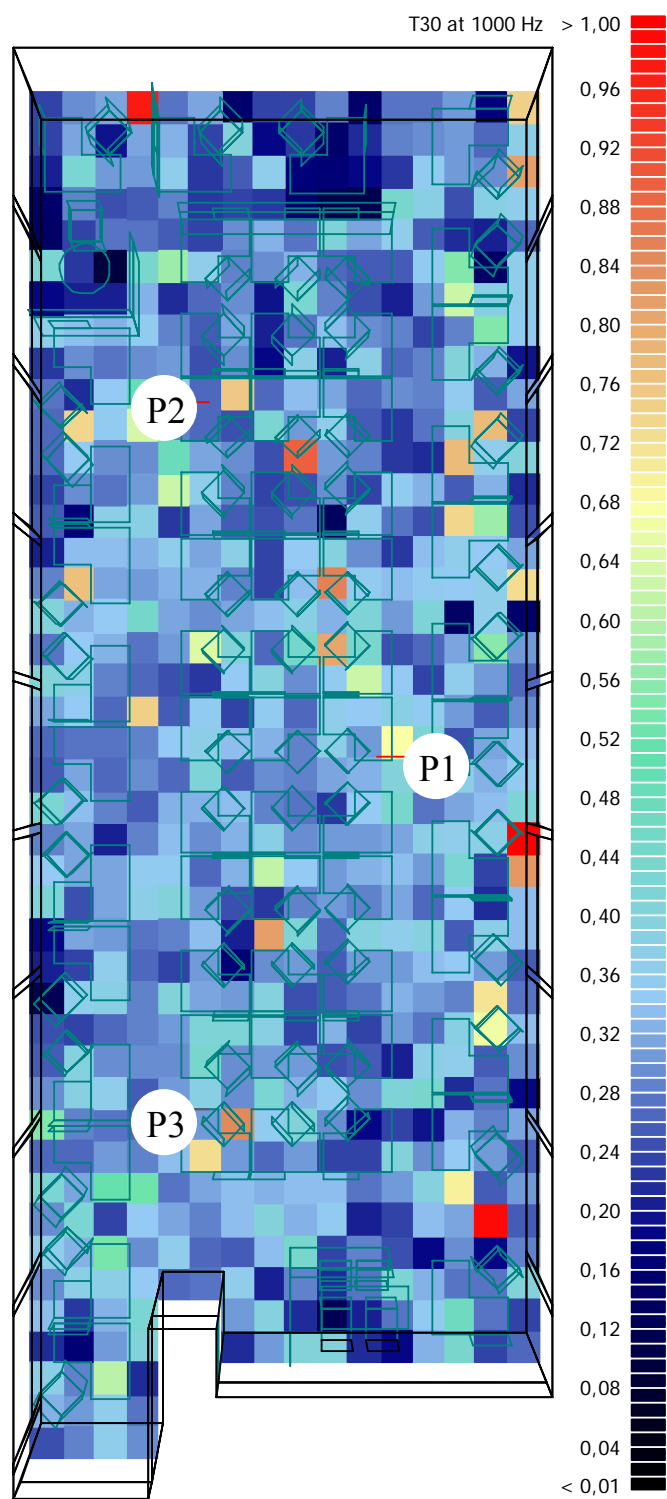
Mapa 1. T_r em 1000 Hz no escritório 1.



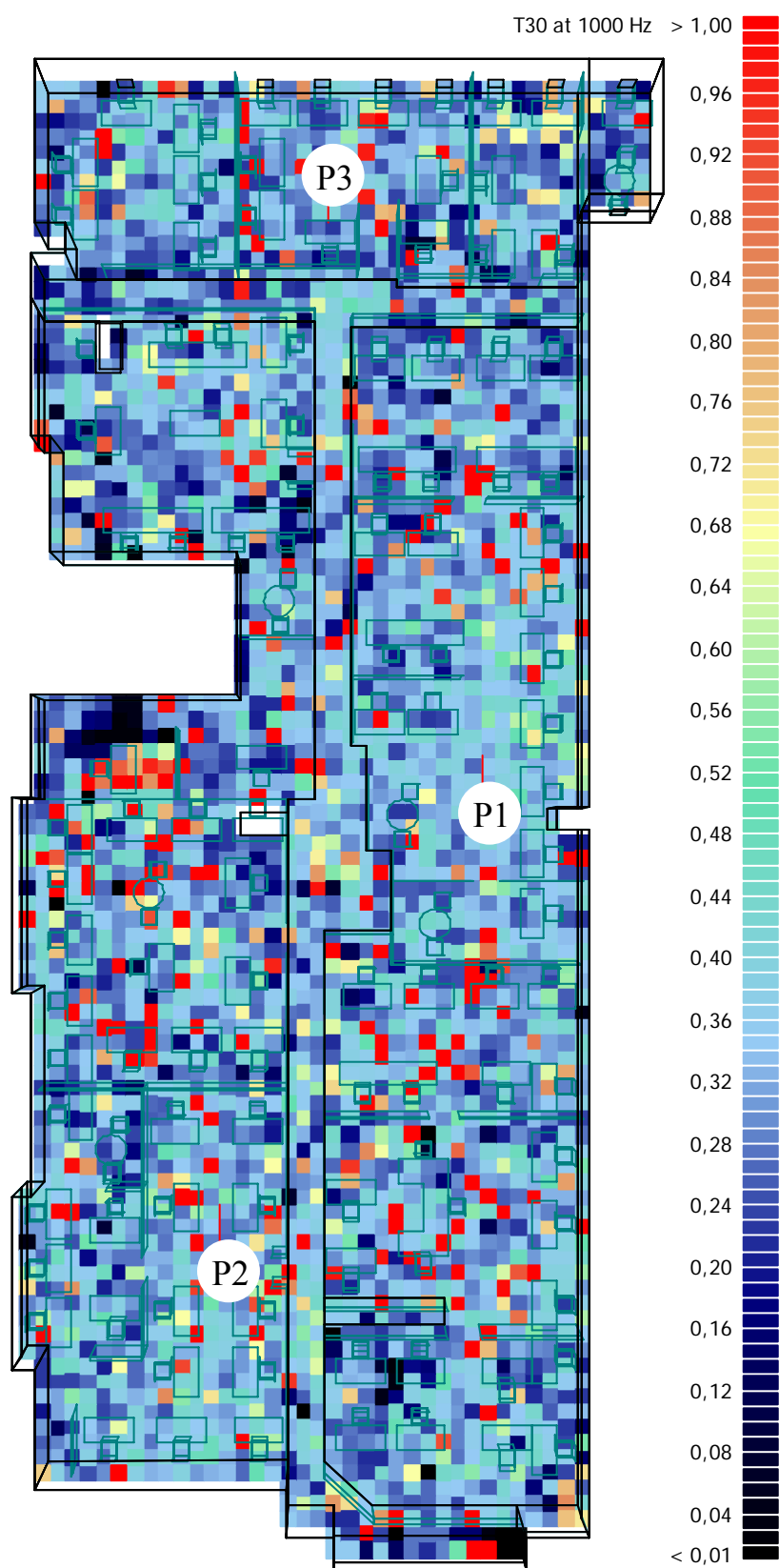
Mapa 2. T_r em 1000 Hz no escritório 2.



Mapa 3. T_r em 1000 Hz no escritório 3.



Mapa 4. T_r em 1000 Hz no escritório 4.



Mapa 5. T_r em 1000 Hz no escritório 5.

Observando os mapas 1 a 5, vê-se que a maior variação do T_r , conforme a localização do ponto receptor na sala, ocorreu no escritório 5. Esperava-se que ocorresse a maior

heterogeneidade entre os pontos simulados no escritório 3, pois nesse há as maiores diferenças de revestimento e altura do teto ao longo da sala.

A maior variação no escritório 5 pode ser explicada por sua forma, mais longitudinal, com seu comprimento muito superior a sua largura e altura. Além disso, segundo Christensen (2003), a proximidade dos receptores à fonte sonora ou às superfícies da sala pode causar variações na simulação dos parâmetros acústicos. Tal proximidade é difícil de ser controlada em uma malha de pontos receptores e em uma sala com diversas superfícies simuladas.

Através dos mapas de T_r calculados pelo Odeon 9.0, com 3 posições de fonte e receptores distribuídos em uma malha de 0,50 m x 0,50 m, como exemplo tem-se os mapas 1 a 5, foram obtidos valores médios de T_r , por frequência em banda de oitava, para cada escritório. O gráfico a seguir apresenta esses valores.

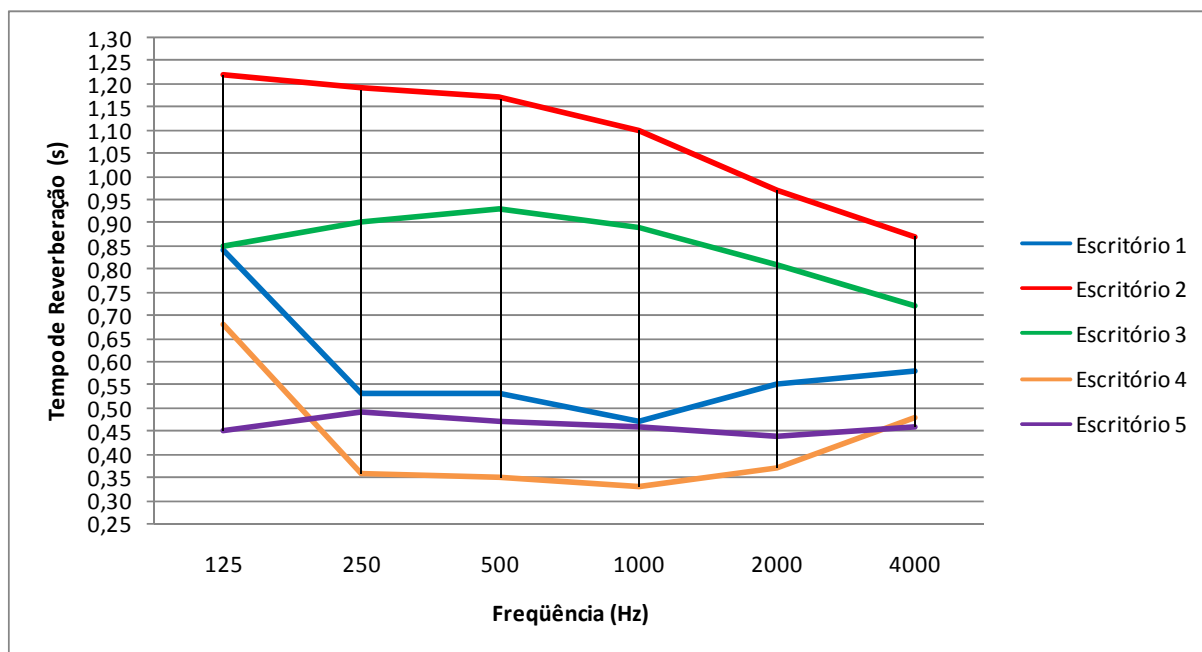


Gráfico 26. T_r médio, por frequência em banda de oitava, simulado nos escritórios, situação original.

Os resultados no gráfico 26 foram analisados juntamente com os dados da tabela 12, a qual apresenta as principais características dos escritórios estudados. No gráfico 26, os maiores valores de T_r foram encontrados para o escritório 2, esse ambiente apresenta o maior volume em m^3 entre todas as salas estudadas. Além disso, nesse local, inexistente qualquer tipo de dispositivo para uma maior absorção acústica no teto, há apenas certa absorção no piso, devido ao revestimento em carpete, entretanto bastante desgastado e de baixa densidade. Os menores valores de T_r foram encontrados no escritório 4. Essa sala possui o menor volume em m^3 entre todos os escritórios estudados. Adicionalmente a tal característica, contribuindo para

a redução do T_r , o teto dessa sala possui forro de alta absorção acústica. Os escritórios 1, 3 e 5 possuem volume em m^3 semelhantes, entretanto, no escritório 3 há forro acústico em apenas 11% do total da área do teto, enquanto nos escritórios 1 e 5 há forro acústico em toda a extensão do teto. No escritório 5, o forro existente possui $\alpha_{médio(125-4000)} = 0,61$ e no escritório 1 o forro apresenta $\alpha_{médio(125-4000)} = 0,49$. Assim, apesar do escritório 5 apresentar volume superior ao do escritório 1, seu tempo de reverberação foi menor devido a maior absorção sonora do teto. Em relação ao material do piso, percebe-se pouca influência desse sobre os valores de T_r simulados. Por exemplo, o escritório 2 possui carpete em toda a extensão do seu piso e o escritório 3 possui carpete de alta densidade em 86% da área total de piso, entretanto, apresentaram os maiores valores de T_r entre todos os ambientes estudados.

Em relação aos resultados de T_r por frequência em banda de oitava, percebe-se que a linha que representa o T_r dos escritórios 1 e 4 apresentam desenho semelhante. Tal semelhança está relacionada ao coeficiente de absorção do forro. Nesses escritórios existe o mesmo tipo de forro acústico, o qual apresenta alta absorção acústica na frequência de 1000 Hz, 0,82. Por isso, o menor valor de T_r foi encontrado para essa frequência nesses escritórios.

Quando comparados os valores obtidos de T_r , tabela 32, e as normas pertinentes, quadro 2, observa-se que nenhum escritório atende o especificado pela norma norueguesa (NS 8175), pois nenhum apresenta T_r entre 0,60 e 0,80s para todas as frequências em banda de oitava de 125 a 2000 Hz.

Tabela 32. T_r médio, por frequência em banda de oitava, simulado nos escritórios, situação real.

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)				
	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
125	0,84	1,22	0,85	0,68	0,45
250	0,53	1,19	0,90	0,36	0,49
500	0,53	1,17	0,93	0,35	0,47
1000	0,47	1,10	0,89	0,33	0,46
2000	0,55	0,97	0,81	0,37	0,44
4000	0,58	0,87	0,72	0,48	0,46
Médio 500 a 2000	0,52	1,08	0,88	0,35	0,46

Fonte: Autor.

Já o prescrito pela norma finlandesa (SFS 5907) concorda com os dados obtidos para os escritórios 1, 4 e 5. Essa norma permite maior variação dos dados de T_r principalmente na frequência de 125 Hz, 0,05 a 0,85s. A norma sueca (SS 025268) estabelece um valor máximo de T_r de 0,4s para as frequências de 250 a 4000 Hz, sendo permitido até 0,48s para a frequência de 125 Hz. Essa especificação não é atendida por nenhum dos escritórios

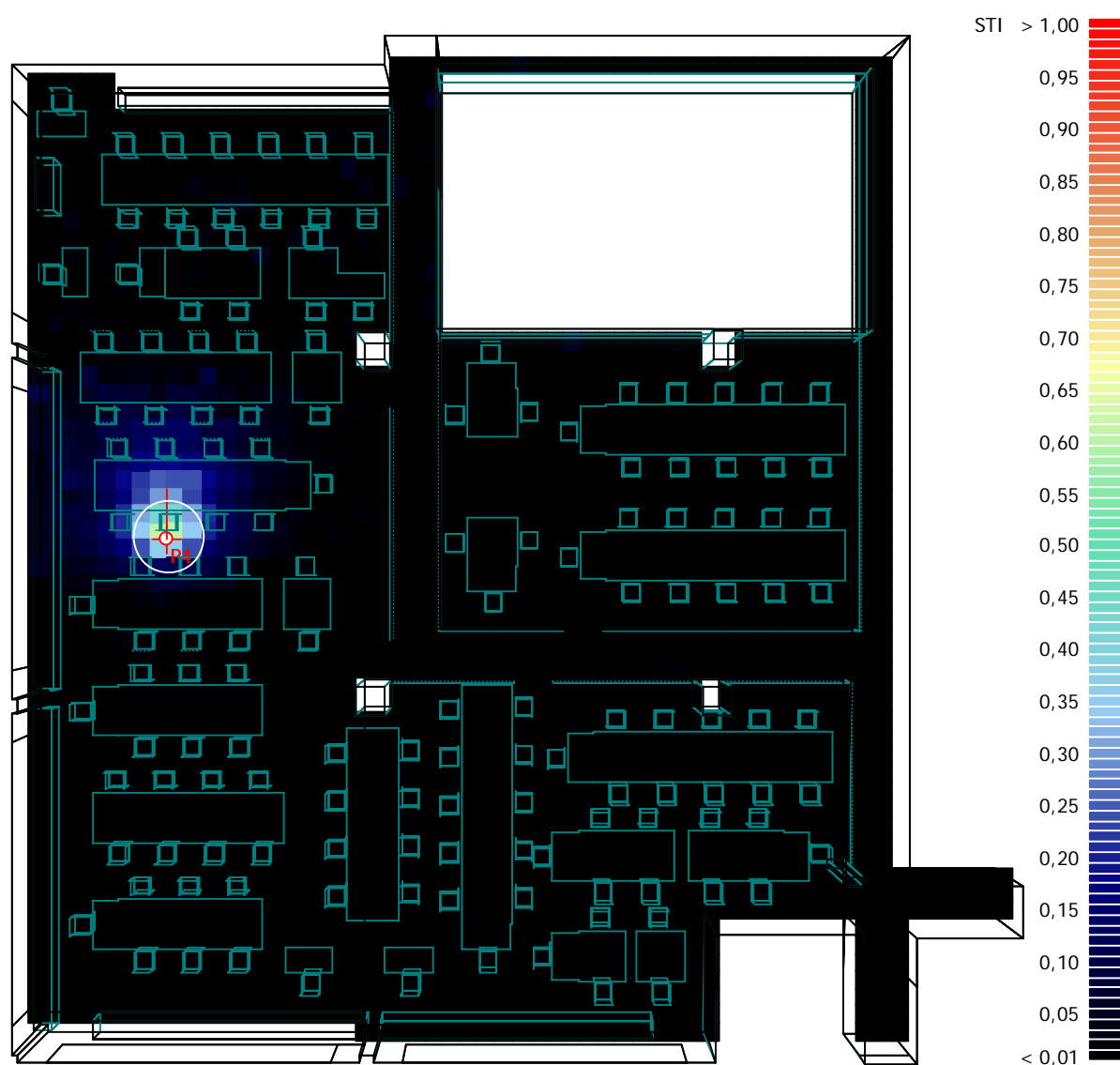
avaliados. Para a norma da Austrália e Nova Zelândia (AS/NZS 2107), o valor máximo do T_r em escritórios deve ser de 0,40 a 0,60s, para as frequências de 500 ou 1000 Hz. Apenas os escritórios 1 e 5 atenderam a essa norma. A norma alemã (VDI 2569) recomenda o valor máximo de 0,5s para o tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz. Assim, os escritórios 4 e 5 atenderam o recomendado por essa norma. A norma francesa (NF S31-080) estabelece valores máximos de T_r conforme a atividade a ser desenvolvida no local, entretanto, não especifica para quais frequências os valores especificados são válidos. Assim, foi observado o valor obtido na simulação dos escritórios para a maioria das frequências em banda de oitava de 125 a 4000 Hz. Comparando esses valores aos especificados pela norma francesa, pode-se verificar que o escritório 2 é acusticamente adequado para o desenvolvimento de atividades que exijam desempenho normal, o escritório 3 para atividades de desempenho eficiente e os escritórios 1, 4 e 5 para atividades que requeiram alto desempenho. O quadro a seguir resume a análise aqui realizada dos tempos de reverberação obtidos nos escritórios e as normas pertinentes.

País de origem da norma		Comparação do T_r simulado com dados prescritos nas normas				
		Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
Noruega		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
Finlândia		atende	não atende	não atende	atende	atende
Suécia		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
Austrália/Nova Zelândia		atende	não atende	não atende	não atende	atende
Alemanha		não atende	não atende	não atende	atende	atende
França	desemp. normal	atende	atende	atende	atende	atende
	desemp. eficiente	atende	não atende	atende	atende	atende
	desemp. alto	atende	não atende	não atende	atende	atende

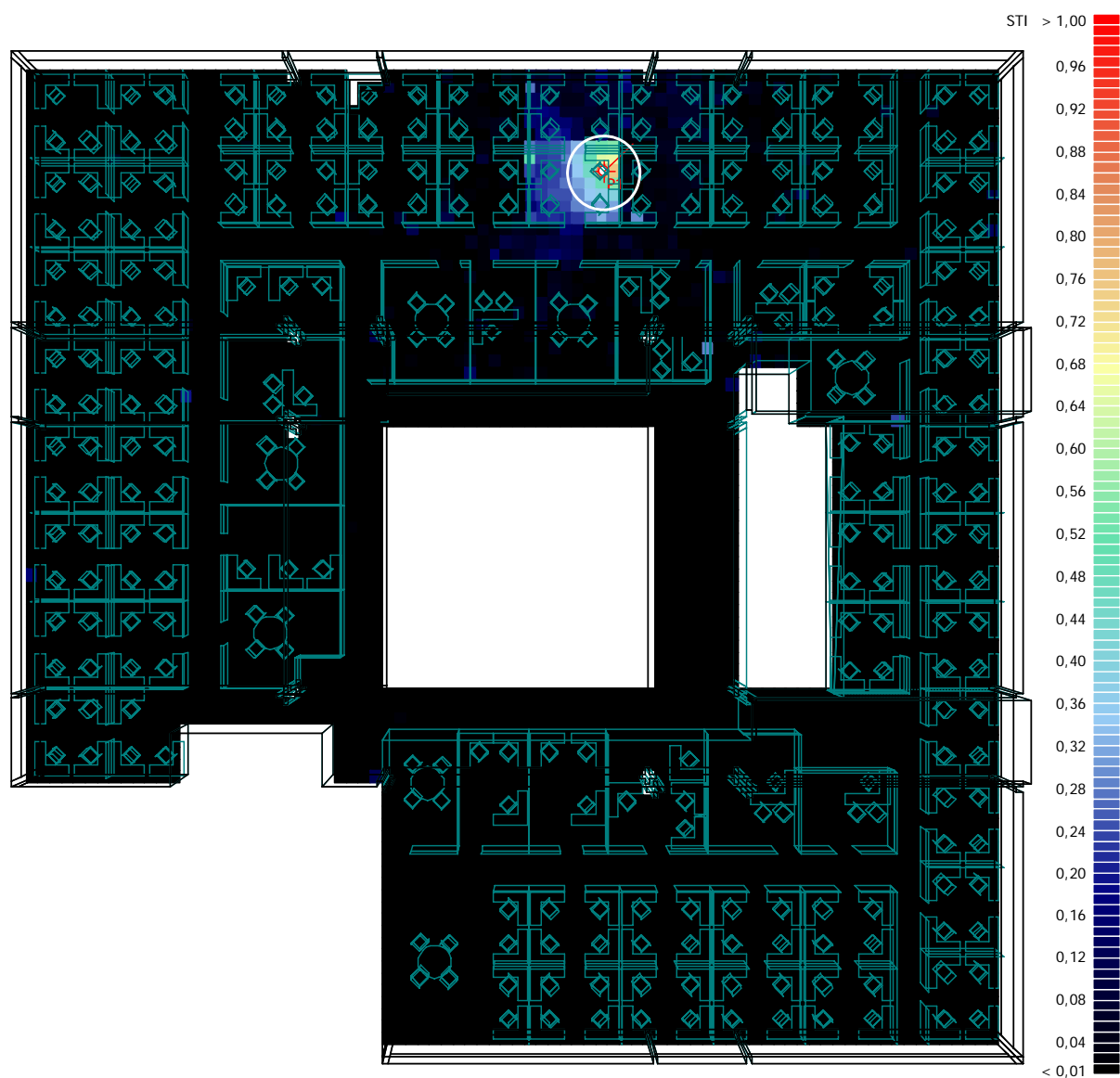
Quadro 3. Comparação dos valores de T_r simulados nos escritórios, situação atual, com os dados especificados por normas pertinentes.

Através do quadro 3 vê-se que apenas para a norma francesa, considerando atividades de desempenho normal, todos os escritórios estão adequados. Ainda através do quadro, observa-se que o escritório adequado para um maior número de normas é o escritório 5 e a sala inadequada para a maioria das normas é o escritório 2. Deve-se considerar que o escritório 2 possui o maior volume em m^3 entre todos os escritórios avaliados. As normas utilizadas para comparação dos dados não consideram o aumento do tempo de reverberação para salas de maiores volumes, especificando apenas o volume mínimo da sala para que a norma seja utilizada.

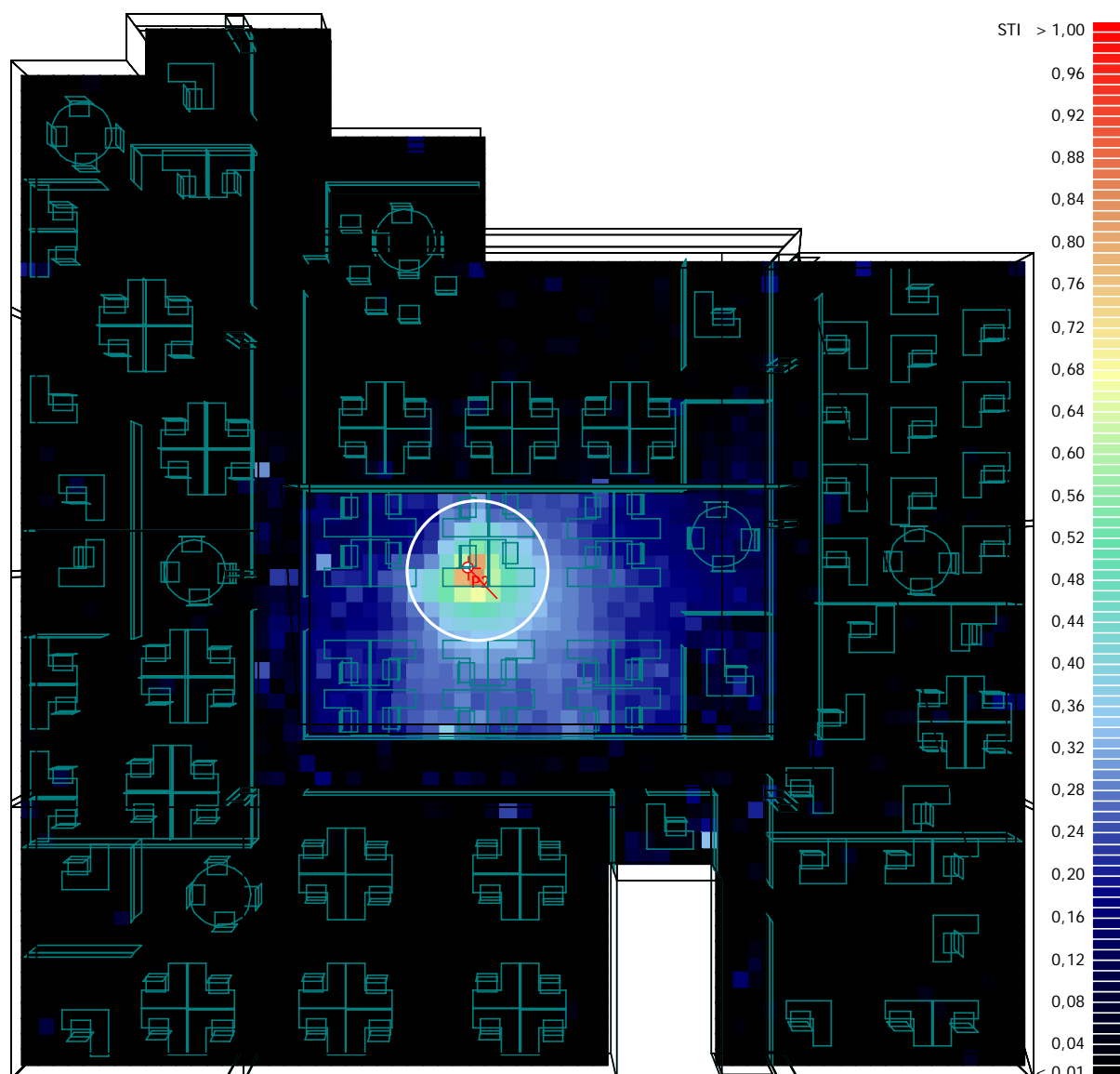
Através dos modelos computacionais utilizados na obtenção do tempo de reverberação, além da simulação desse parâmetro, foram realizadas simulações do STI. Os mapas acústicos obtidos para esse parâmetro são compostos de 1 fonte e receptores situados em uma malha de 0,50 m x 0,50 m. Esses mapas acústicos estão apresentados a seguir.



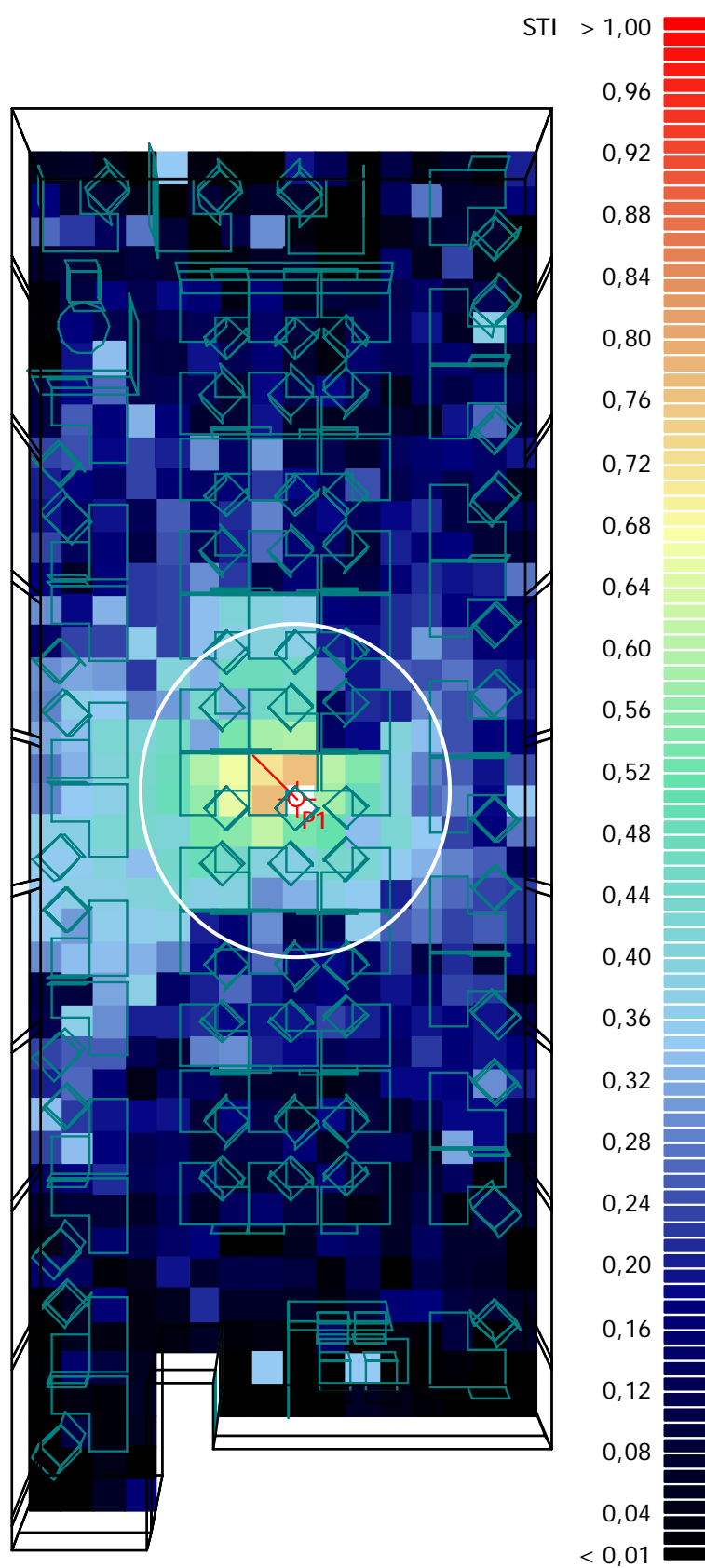
Mapa 6. STI simulado no escritório 1, situação real. P4 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=1,00\text{m}$. A linha mais longa em P4 indica a direção da fonte sonora.



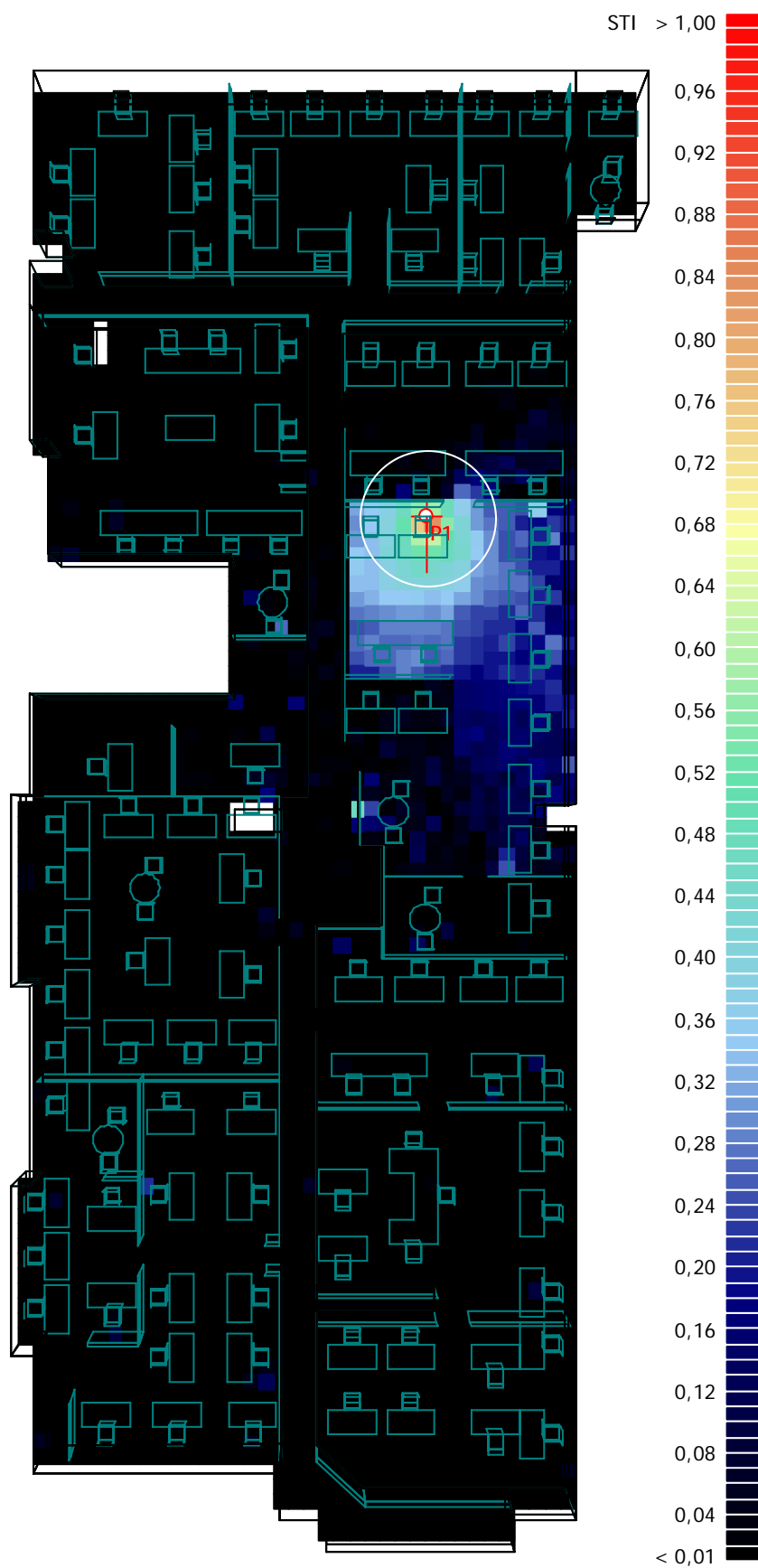
Mapa 7. STI simulado no escritório 2, situação real. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=1,50m$. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.



Mapa 8. STI simulado no escritório 3, situação real. P2 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=2,00m$. A linha mais longa em P2 indica a direção da fonte sonora.



Mapa 9. STI simulado no escritório 4, situação real. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=2,50m$. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.

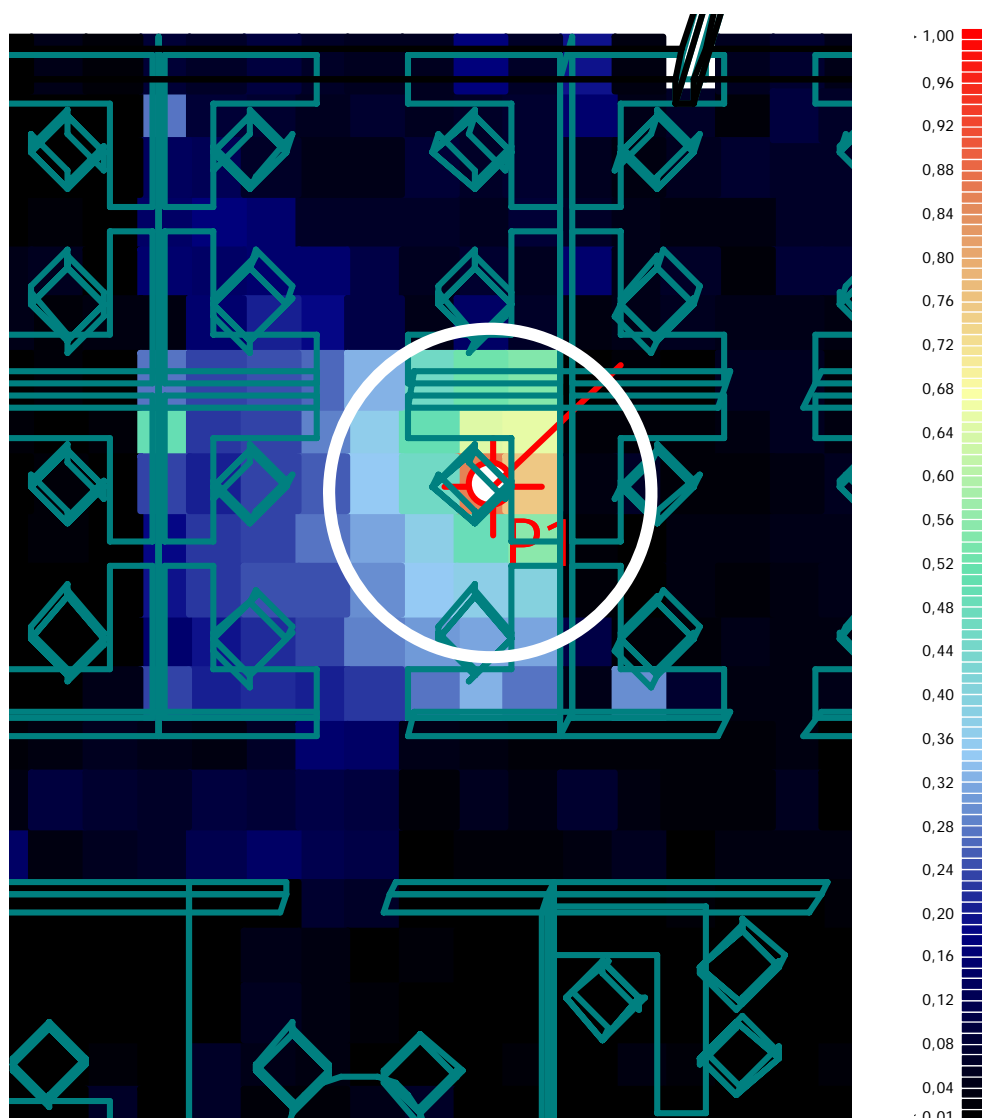


Mapa 10. STI simulado no escritório 5, situação real. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o $r_D=2,00m$. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.

No mapa 6, STI no escritório 1, percebe-se uma inteligibilidade da fala restrita, com redução do STI significativa já nas estações de trabalho vizinhas. Isso ocorre principalmente pelo elevado nível de pressão sonora no local, valor médio de 64,1 dB(A), maior valor encontrado entre todos os escritórios. Também pelo elevado nível de pressão sonora, não se percebe a influência da orientação da fonte sonora nos resultados de STI. Apesar de inexistirem divisórias entre as estações de trabalho nesse escritório, a estação de trabalho em frente à fonte sonora apresenta valores reduzidos de STI, aproximadamente 0,25. Segundo Hongisto (2005), valores de STI entre 0,20 e 0,50, encontrado entre estações de trabalho adjacentes, caracterizam uma inteligibilidade fraca e uma privacidade da fala razoável e podem ser encontrados em escritórios panorâmicos bastante ruidosos. Essa observação de Hongisto (2005) concorda com os resultados encontrados para esse escritório.

Devido à redução brusca do STI com o distanciamento da fonte sonora, o raio de distração r_D no escritório 1 resultou em um valor baixo, 1,00m, menor valor entre todos os escritórios avaliados.

Para facilitar a análise do STI no escritório 2, o mapa 7 foi ampliado na área da fonte sonora. Essa ampliação está representada no mapa 11.

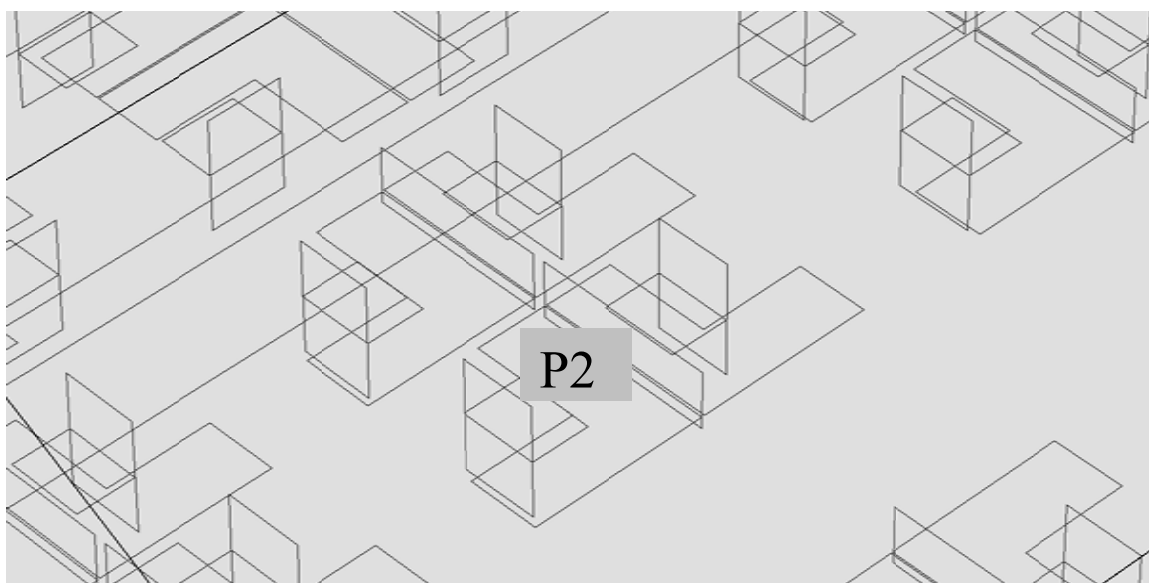


Mapa 11. STI simulado no escritório 2, situação real. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora. Ampliação do mapa 7.

Através do mapa 11, percebe-se a influência das divisórias entre estações de trabalho nos valores de STI. As divisórias fazem com que o STI chegue a valores próximos a zero em estações de trabalho adjacentes e em frente à fonte sonora. Como consequência, as estações de trabalho localizadas atrás da fonte sonora apresentam valores de STI superiores às localizadas em sua frente, devido à inexistência de divisórias separando a fonte e as estações de trabalho situadas na sua parte posterior. Esse escritório apresentou o segundo menor r_D , 1,50m e o segundo maior NPS, 59,2 dB(A), comprovando mais uma vez a influência desse parâmetro sobre aquele.

Observando o mapa 8, escritório 3, vê-se uma redução mais lenta do STI, comparada aos escritórios 1 e 2, conforme é aumentada a distância dos receptores em relação à fonte. Por isso, o r_D encontrado nesse escritório foi superior ao encontrado nos escritórios apresentados

anteriormente. No escritório 3, o r_D é de 2,00m e o NPS é de 56,0 dB(A), inferior ao encontrado nos escritórios 1 e 2. Em relação às divisórias, nesse ponto do escritório, existiam divisórias em uma das arestas da mesa, como pode ser visto no retrato 9. Essas divisórias não colaboraram com a redução do STI na estação de trabalho adjacente em frente à fonte sonora, como pode ser visto no mapa 8.



Retrato 9. Modelo em 3 dimensões do escritório 3. P2 representa a localização da boca artificial. Fonte: Odeon 9.0.

No escritório 4 foi encontrado o maior r_D entre todos os escritórios avaliados, 2,50m. Essa sala possui o menor NPS, 55,4 dB(A), e também o menor volume em m^3 e número de ocupantes. Como pode ser visto no mapa 9, o círculo que representa o raio de distração abrange todas as estações de trabalho adjacentes e na lateral à estação que está localizada a fonte sonora. Isso significa que todas essas estações de trabalho irão perceber a voz do orador, localizado no ponto onde está a boca artificial na simulação, com inteligibilidade capaz de causar distração durante a realização das atividades de trabalho. Entretanto, segundo Hongisto (2005), valores de STI na faixa de 0,40 a 0,60 entre estações de trabalho adjacentes, valores verificados nesse escritório, são encontrados em escritórios panorâmicos bem projetados. Em relação ao efeito das divisórias nos valores de STI, através da análise do mapa 9, percebe-se que as divisórias parciais entre estações de trabalho, desenho 14, não representaram um obstáculo à inteligibilidade da fala.

No escritório 5, mapa 10, ocorre semelhante ao visto no mapa 8. O r_D resultante no escritório 5 foi igual ao do escritório 3, 2,00m. Além disso, o NPS nesses escritórios é também semelhante, 57,7 dB(A) para o escritório 5 e 56,0 dB(A) para o escritório 3. No mapa

10, é clara a barreira à inteligibilidade causada pela divisória localizada na parte posterior da fonte sonora. Após essa divisória, o STI é reduzido a valores próximos a 0,20.

Outro parâmetro simulado nessa etapa foi a taxa de decaimento dos níveis de pressão sonora por dobro da distância (DL_2). Além desse parâmetro, o software Odeon 9.0 calcula o DL_{2,C_0} , que é a taxa de decaimento com ponderação em A para as frequências de 125 a 4000 Hz, o qual foi utilizado para a análise dos escritórios, pois se trata de um número único, independente da frequência. A tabela a seguir apresenta os valores de DL_{2,C_0} encontrado nos 5 escritórios avaliados.

Tabela 33. DL_{2,C_0} simulado nos escritórios, situação real.

	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
DL_{2,C_0} (dB(A))	3,01	3,61	3,08	3,62	3,37

Fonte: Autor.

Através da tabela 33, percebe-se que a maior redução do nível de pressão sonora com a distância ocorre nos escritórios 4 e 2, com uma taxa de decaimento de 3,62 e 3,61 dB(A) por dobro da distância, respectivamente. A menor redução do nível de pressão sonora com a distância foi verificada no escritório 1, com uma taxa de 3,01 dB(A) por dobro da distância. Deve-se salientar que esse parâmetro não é influenciado pelo ruído ambiente, pois esse ruído não foi inserido na simulação do DL_{2,C_0} .

Segundo a norma francesa NF S31-080, escritórios que apresentam valores de DL_2 entre 3 e 4 dB(A) são adequados para atividades que exijam desempenho eficiente dos funcionários. Assim, segundo esse critério, os escritórios avaliados são adequados para tal exigência de desempenho.

Segundo estudos realizados por Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), escritórios que apresentaram DL_2 inferior a 5 dB(A) foram classificados como acusticamente pobres. Nessa classificação, todos os escritórios avaliados são considerados acusticamente pobres. Entretanto, quando considerados os valores de r_D , segundo os mesmos autores, escritórios com r_D inferior a 5m são classificados como acusticamente excelentes. Assim, através desse critério, todos os escritórios avaliados seriam classificados como acusticamente excelentes. Essa discrepância entre a classificação dos escritórios quando considerado parâmetros diferentes, pode ser explicada, parcialmente, pelo elevado ruído ambiente encontrado nos escritórios. Esse ruído influencia nos valores de r_D , reduzindo esse parâmetro

consideravelmente, já nos valores de DL_2 não apresenta qualquer interferência, já que não é considerado para o cálculo desse parâmetro.

A tabela a seguir apresenta um resumo das características construtivas e acústicas dos escritórios avaliados, nessa fase da simulação, em que foram consideradas as características construtivas existentes no local.

Tabela 34. Características construtivas e acústicas dos escritórios, situação real.

Características	Escritório 1	Escritório 2	Escritório 3	Escritório 4	Escritório 5
Área (m ²)	613,03	1324,40	902,38	162,00	808,91
Volume (m ³)	1716,48	4922,02	2973,54	437,40	2022,28
Nº de estações de trabalho	147	242	117	62	109
Densidade (estações/m ²)	0,24	0,18	0,13	0,14	0,13
Pé- direito dominante (m)	2,80	3,60	2,80	2,70	2,50
Material do teto (1)	0,49	0,02	67% (2): 0,02 22% (2): 0,10 11% (2): 0,49	0,49	0,61
Material do piso (1)	85% (2): 0,18 15% (2): 0,01	0,18	86% (2): 0,31 14% (2): 0,03	0,03	89% (2): 0,03 11% (2): 0,31
Altura das divisórias entre estações (m)	-	1,30	1,15 (3)	1,20 (4)	-
Material das divisórias entre estações (1)	-	0,16	0,16	0,07	-
Nível de pressão sonora (dB(A))	64,1	59,2	56,0	55,4	57,7
Tr (s) (5)	0,52	1,08	0,88	0,35	0,46
rD (m)	1,00	1,50	2,00	2,50	2,00
DL ₂ ,Co (dB(A))	3,01	3,61	3,08	3,62	3,37

Fonte: Autor.

(1) α médio entre as frequências em banda de oitava de 125 a 4000 Hz. (2) Porcentagem da área total do piso ou teto coberta com material com tal α . (3) Apenas em algumas estações de trabalho, em outras estações não havia divisórias. (4) Divisória parcial, ocupando aproximando 1/3 da linha divisória entre as estações (fotografia 9). (5) Valor médio para as frequências em banda de oitava de 500 a 2000 Hz

Observando a tabela 34, vê-se que o tempo de reverberação obtido nos escritórios foi fortemente influenciado pelo volume das salas: ambientes com maiores volumes apresentaram T_r mais longos, escritório 2. Escritórios com volumes semelhantes, escritórios 3 e 5, tiveram os valores de T_r influenciados mais pela absorção sonora do material do teto que pela absorção do material do piso. O escritório 3 apresenta forro acústico com absorção sonora de 0,49 em apenas 11% da extensão do teto e carpete com $\alpha=0,31$ em 86% do piso, já o escritório 5 apresenta forro acústico com $\alpha=0,61$ em todo o teto e piso em carpete com $\alpha=0,31$ em 11% do piso. O valor médio de T_r encontrado para o escritório 5 foi praticamente 50% inferior ao encontrado no escritório 3. Assim, observa-se a importância do material de revestimento do teto na redução do valor do T_r em escritórios panorâmicos.

Em relação aos valores de r_D , observou-se que esse é fortemente influenciado pelos níveis de ruído ambiente. O menor r_D foi encontrado no escritório 1, nesse escritório foi encontrado o maior NPS.

Quando são analisados os valores de DL_2 , observa-se que os maiores valores, mais adequados para a realização de atividades em escritórios panorâmicos, foram encontrados nos escritórios 2 e 4.

As simulações realizadas posteriormente alteraram as características construtivas, material de acabamento e retirada/inserção de divisórias entre estações de trabalho, e o ruído ambiente em três dos cinco escritórios avaliados. Essas simulações permitiram uma análise mais detalhada da influência das características construtivas e do ruído ambiente nos parâmetros acústicos T_r , DL_2 e r_D em escritórios panorâmicos, assim como da relação entre esses parâmetros.

4.5 Simulação com alterações no ambiente

Utilizando o modelo computacional de três escritórios, 1, 2 e 4, novas simulações computacionais foram realizadas alterando o material de revestimento do teto e do piso, e inserindo ou retirando divisórias entre as estações de trabalho. Além disso, foram utilizados dois níveis de pressão sonora como ruído ambiente: o NPS encontrado no ambiente mais silencioso, escritório 4, e o NPS medido na sala mais ruidosa, escritório 1. Da combinação dos elementos construtivos, material do teto e do piso e ausência/existência de divisórias, sugeriram seis situações, nomeadas A, B, C, D, E, F. Para cada uma dessas situações, foram

inseridos os dois NPS durante a simulação do STI, da qual foi obtido o r_D , resultando em doze valores de r_D . A caracterização das situações simuladas podem ser vistas na tabela 13.

A tabela 35, a seguir, apresenta os resultados obtidos para o escritório 1 através dessas simulações.

Tabela 35. Características acústicas do escritório 1, com alterações no ambiente.

Parâmetro	Situação A	Situação B	Situação C	Situação D	Situação E	Situação F
T_r (1)	0,47	0,49	1,30	0,52	0,53	1,23
r_D (m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,00
DL2,Co (dB(A))	3,11	3,18	2,29	4,40	4,33	2,83

Fonte: Autor.

Nota: A primeira linha dos valores de r_D apresenta os resultados obtidos nas simulações com NPS de 64,1 dB(A). A segunda linha apresenta os valores obtidos nas simulações com NPS de 55,4 dB(A).

(1) Valor médio (s) para as frequências em banda de oitava de 500 a 2000 Hz

O escritório 1 é caracterizado por um volume de 1716,48 m³ e pé direito de 2,80m. Possui 147 estações de trabalho, com uma densidade de 0,24 estações/m².

Em relação ao T_r , através da tabela 35, vê-se que o menor valor foi obtido para a situação A. Nessa situação, há grande absorção sonora tanto no piso como no teto, mas não há divisórias. Na situação D, foi inserido o mesmo material no piso e no teto que na situação A, entretanto, foram adicionadas divisórias entre as estações de trabalho, com altura de 1,30m. Com a inserção das divisórias, houve um aumento do T_r , de 0,47s na situação A para 0,52s na situação D. Isso é explicado pelo material das divisórias inseridas. Foram utilizadas divisórias em madeira revestidas por laminado melamínico de alta pressão. Esse material apresenta pouca absorção sonora se comparado com a absorção do piso e do teto na situação A, $\alpha_{\text{médio}}=0,10$, aumentando as reflexões nos pontos de localização de fonte e receptor, principalmente por esses estarem próximos das divisórias, a uma altura de 1,50m e 1,20m, respectivamente. Comparando os resultados de T_r nas situações C e F, percebe-se que a inserção das divisórias reduziu os valores de T_r . Tal resultado foi obtido, pois a inserção das divisória representou a redução das reflexões na sala, já que esse elemento é composto de material com maior absorção sonora, $\alpha_{\text{médio}}=0,10$, que o material de revestimento do teto, $\alpha_{\text{médio}}=0,02$, e do piso, $\alpha_{\text{médio}}=0,01$. Quando utilizado material de alta absorção sonora apenas

no teto, situações B e E, a inserção das divisórias resultou em aumento do T_r , similarmente ao ocorrido nas situações A e D.

Em relação aos materiais de acabamento, observou-se pouco aumento do T_r quando retirado o material de absorção do piso, substituição do carpete pela cerâmica, situações A e D para B e E, respectivamente. Entretanto, quando o forro acústico foi retirado, observou-se um aumento considerável do T_r , de 0,49s para 1,30s no ambiente sem divisórias e de 0,53s para 1,23s para o ambiente com divisórias, tabela 35.

O quadro 4 compara os valores de T_r simulados para as seis situações no escritório 1 com os valores prescritos em diversas normas internacionais (FREYMUTH et al., 2002; CHIGOT, 2007).

País de origem da norma		Comparação do T_r simulado com dados prescritos nas normas					
		Situação A	Situação B	Situação C	Situação D	Situação E	Situação F
Noruega		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
Finlândia		atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
Suécia		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
Austrália/Nova Zelândia		atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
Alemanha		atende	atende	não atende	não atende	não atende	não atende
França	desemp. normal	atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
	desemp. eficiente	atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
	desemp. alto	atende	atende	não atende	atende	atende	não atende

Quadro 4. Comparação dos valores de T_r simulados nos escritório 1, com alterações no ambiente, com os dados especificados por normas pertinentes.

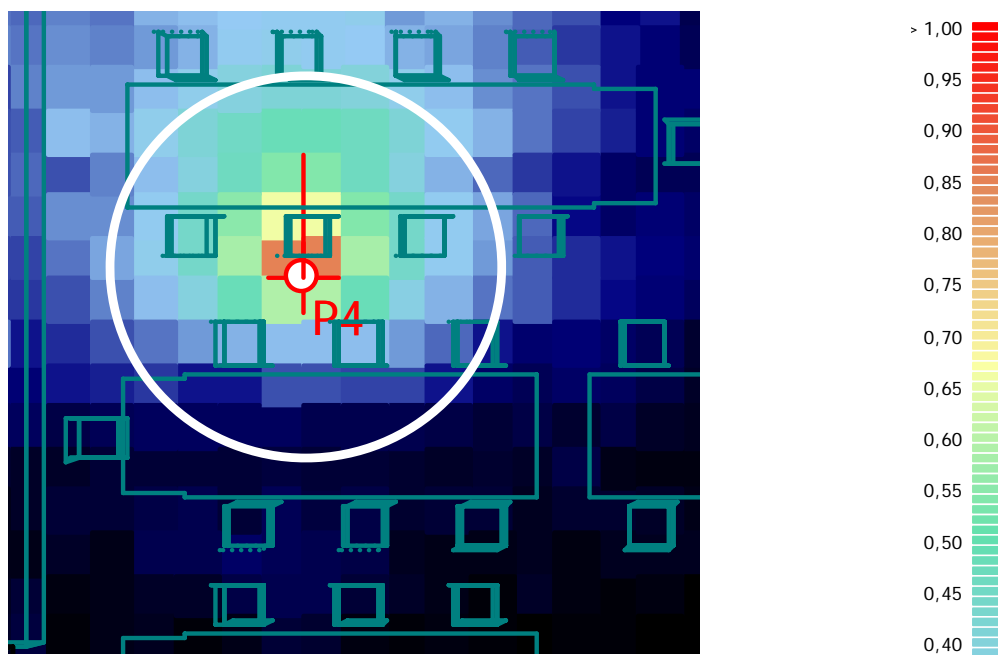
No quadro 4, observa-se que em nenhuma condição simulada os valores de T_r foram adequados para as normas norueguesa e sueca. A norma norueguesa estabelece como valor ideal de T_r 0,60 a 0,80s, para as frequências em banda de oitava de 125 a 2000 Hz. Nas situações A, B, D e E foram obtidos valores inferiores a 0,60s, já nas situações C e F os valores de T_r estão acima de 0,80s, não atendendo essa norma em nenhuma das situações simuladas. Já a norma sueca, estabelece como valor máximo para o T_r 0,40s para as frequências em banda de oitava de 250 a 4000 Hz, sendo admitido um acréscimo de 20% para a frequência de 125 Hz. Em todas as situações, os valores de T_r são superiores a 0,40s, não atendendo a essa norma.

Ainda em relação ao quadro 4, vê-se que as situações C e F não atendem a nenhuma norma. Os valores de T_r obtidos nas simulações sem absorção acústica no teto e no piso, situações C e F, são superiores aos valores estabelecidos pelas normas. Em relação às situações D e E, essas não atenderam à norma alemã. Essa norma estabelece o valor máximo de 0,50s para o T_r médio nas frequências em banda de oitava de 500 a 2000 Hz. Calculando

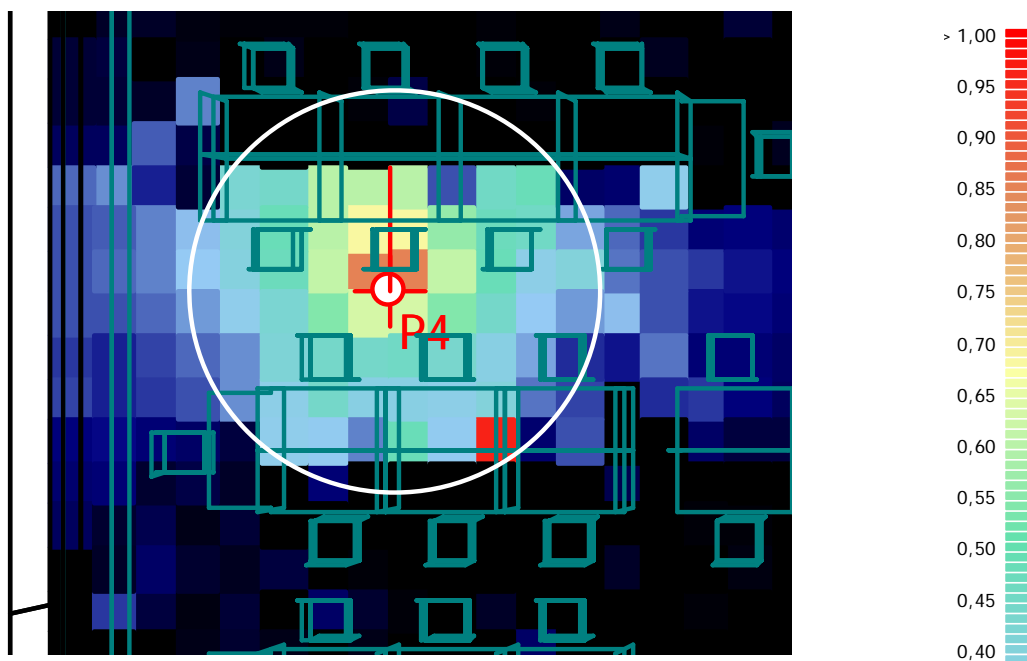
esse T_r médio para as situações D e E foram obtidos os valores de 0,52 e 0,53s, valores acima, mas muito próximos, ao estabelecido pela norma alemã.

Observando os valores de r_D , tabela 35, percebe-se que quando o ruído ambiente é elevado, 64,1 dB(A), o material utilizado no teto e no piso não interferem na inteligibilidade da fala, além disso, com tais níveis de ruído, a inserção de divisórias não provocou influência nos valores de r_D . Quando o ruído ambiente é reduzido para 55,4 dB(A), há um aumento significativo da inteligibilidade da fala, aumentando os valores de r_D .

Nas simulações sem divisórias, situações A, B e C, não houve interferência do material de acabamento do piso e do teto nos valores de r_D , mantendo-se inalterado para as três situações em 2,50m. Quando inseridas as divisórias, na situação D, o r_D se manteve igual ao das situações sem divisória. Entretanto, há grande diferença em relação aos postos de trabalho com maior inteligibilidade na situação A e D, como pode ser visto nos mapas 12 e 13. No mapa 12, situação A, percebe-se que os postos de trabalho mais afetados pela fala do orador estão a sua frente, já no mapa 13, situação D, observa-se a maior inteligibilidade nos postos de trabalho na parte posterior e lateral do orador.



Mapa 12. STI simulado no escritório 1, situação A, com ruído fraco. P4 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P4 indica a direção da fonte sonora.



Mapa 13. STI simulado no escritório 1, situação D, com ruído fraco. P4 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P4 indica a direção da fonte sonora.

Nas situações E e F, com ruído de fundo de 55,4 dB(A), observou-se uma redução do r_D em relação aos valores encontrados para a sala nas situações sem divisórias e na situação D. Essa redução pode ser explicada pela redução da inteligibilidade devido à redução da absorção sonora, se comparada a situação D, e através da limitação da voz do orador causada pelas divisórias, se comparada às situações A, B e C.

Segundo Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), para um escritório ser considerado excelente acusticamente, os valores de r_D devem ser inferiores a 5m (tabela 10). Assim, segundo essa classificação, o escritório 1 pode ser classificado como acusticamente excelente em todas as situações simuladas.

Em relação ao DL_2 , observando a tabela 35, percebe-se que esse parâmetro possui grande influência do material de acabamento do piso e do teto e da inserção/retirada das divisórias entre estações de trabalho. O maior DL_2 foi encontrado para a situação D, ou seja, com revestimento de material acústico tanto no piso quanto no teto, além da existência de divisórias entre as estações de trabalho. O menor DL_2 foi encontrado para a situação oposta, situação C, com material refletivo no piso e no teto e sem divisórias entre as estações de trabalho. Através desses dados, pode-se afirmar que para se obter elevada redução do som com a distância, o ambiente do escritório deve possuir: absorção sonora considerável e divisórias entre as estações de trabalho. Segundo a classificação de Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), escritórios panorâmicos com DL_2 inferior a 5 dB(A) são considerados

acusticamente pobres. Assim, seguindo essa classificação para esse parâmetro, o escritório 1 é considerado acusticamente pobre para todas as situações simuladas.

A tabela a seguir apresenta as características acústicas obtidas nas simulações do escritório 2.

Tabela 36. Características acústicas do escritório 2, com alterações no ambiente.

Características	Situação A	Situação B	Situação C	Situação D	Situação E	Situação F
Tr (1)	0,79	0,80	1,45	0,74	0,75	1,42
rD (m)	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50
	2,00	2,00	2,00	1,50	1,50	1,50
DL2,Co (dB(A))	3,76	3,79	2,75	3,97	4,02	3,31

Fonte: Autor.

Nota: A primeira linha dos valores de r_D apresenta os resultados obtidos nas simulações com NPS de 64,1 dB(A). A segunda linha apresenta os valores obtidos nas simulações com NPS de 55,4 dB(A).

(1) Valor médio (s) para as frequências em banda de oitava de 500 a 2000 Hz

Primeiramente, deve-se salientar que o escritório 2 apresenta volume, 4922,02m³, e pé-direito, 3,60m, muito superiores ao volume e pé-direito do escritório 1.

Observando os valores de T_r , vê-se que esse parâmetro é dependente do material do piso e do teto e da existência/ausência de divisórias. As simulações com material absorvente no teto e no piso resultaram em valores de T_r inferiores aos valores obtidos através das simulações sem absorção nessas áreas. Entretanto, a retirada de material absorvente do piso, sendo mantido o material no teto, gerou um acréscimo de apenas 0,01s, essa diferença é imperceptível ao ouvido humano (BORK, 2000). Diferentemente do ocorrido no escritório 1, em relação às divisórias, observou-se uma redução de 0,05s nos valores de T_r com a inserção dessas. Essa redução significa que a inserção das divisórias representou um aumento da absorção sonora no ambiente. Isso ocorreu, pois no escritório 2 o tempo de reverberação é superior ao T_r do escritório 1, além disso, o pé-direito é maior, o que reduz a absorção de sons diretos pelo forro. Assim, as divisórias não representam elementos refletoras do som, como no escritório 1, mas elementos de absorção sonora, apesar de serem compostas por material com α reduzido.

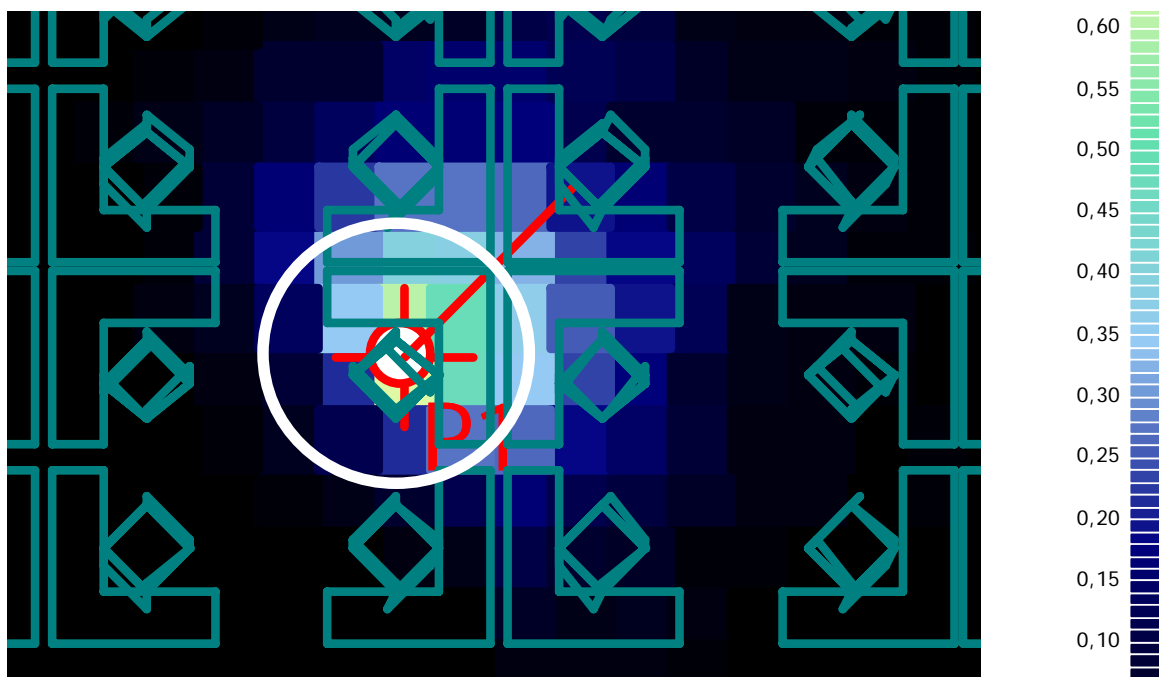
Em relação aos valores de T_r obtidos nas simulações do escritório 2 e as normas pertinentes, o quadro 5 apresenta uma comparação entre eles.

País de origem da norma		Comparação do T_r simulado com dados prescritos nas normas					
		Situação A	Situação B	Situação C	Situação D	Situação E	Situação F
Noruega		não atende	não atende	não atende	atende	atende	não atende
Finlândia		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
Suécia		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
Austrália/Nova Zelândia		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
Alemanha		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
França	desemp. normal	atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
	desemp. eficiente	atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
	desemp. alto	não atende	não atende	não atende	atende	atende	não atende

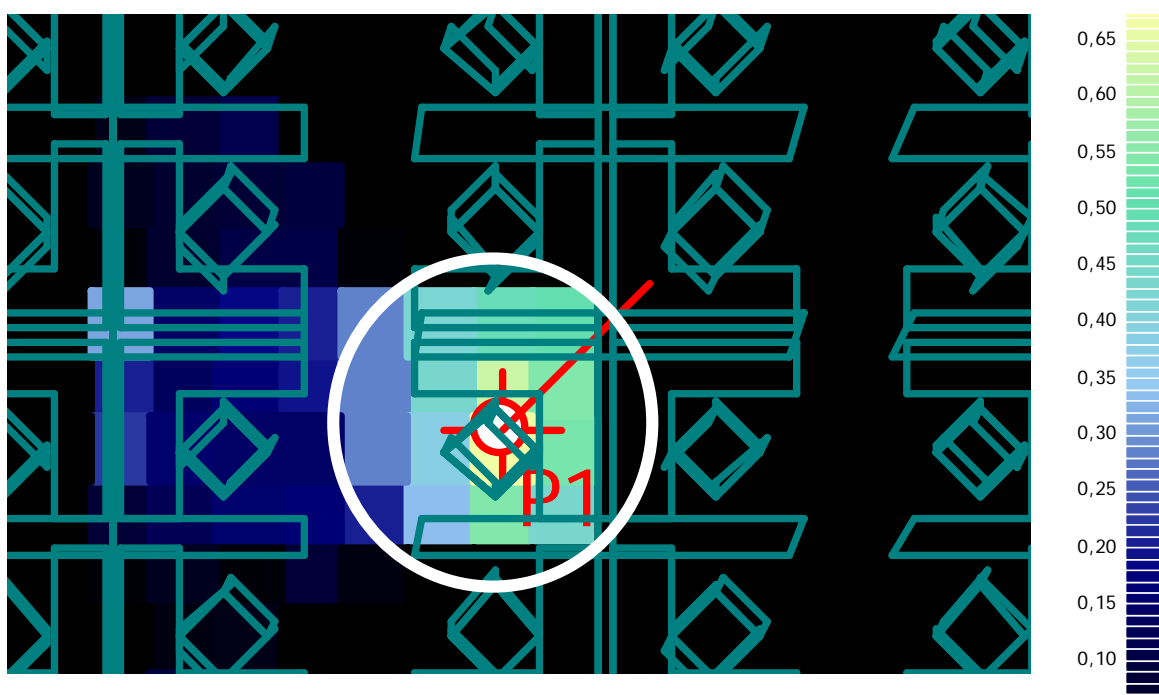
Quadro 5. Comparação dos valores de T_r simulados nos escritório 2, com alterações no ambiente, com os dados especificados por normas pertinentes.

Observando o quadro 5, vê-se que apenas as normas francesa e norueguesa são atendidas por algumas das situações avaliadas para o escritório 2. Nas situações A e B, os tempos de reverberação encontrados estão um pouco acima de 0,80s, não atendendo ao limite máximo da norma norueguesa e da norma francesa para alto desempenho, que é de 0,80s. Já nas situações D e E, os tempos de reverberação encontrados estão um pouco abaixo de 0,80s, atendendo à norma norueguesa e à norma francesa para todas as faixas de desempenho exigidas. As outras normas estabelecem valores máximos para o T_r bem inferiores a 0,80s, não sendo atendidas em nenhuma das situações simuladas.

Ao analisar os valores do r_D na tabela 36, vê-se que a inclusão das divisórias aumentou os valores desse parâmetro quando o ruído é elevado, já quando utilizado o NPS menor, a inserção das divisórias acarretou na redução desse parâmetro. Tal fato ocorreu, pois com o ruído elevado, a inteligibilidade da fala no escritório é muito baixa, a inserção das divisórias fez com que aumentasse a inteligibilidade da fala dentro da célula de trabalho, ou seja, o som é refletido pela divisória e volta para o orador, intensificando o som nos postos de trabalho nas costas e diagonal do orador. Os mapas 14 e 15 mostram o grid do STI simulado nas situações A, sem divisórias, e D, com divisórias, com ruído intenso.

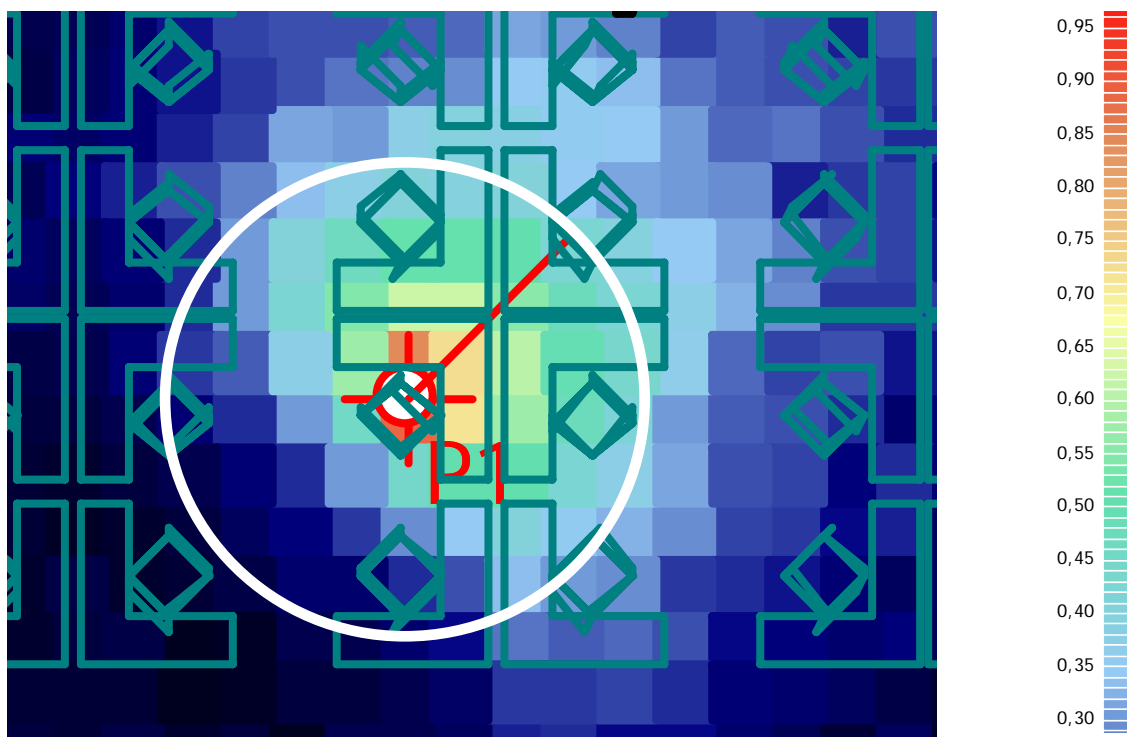


Mapa 14. STI simulado no escritório 2, situação A, com ruído intenso. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.

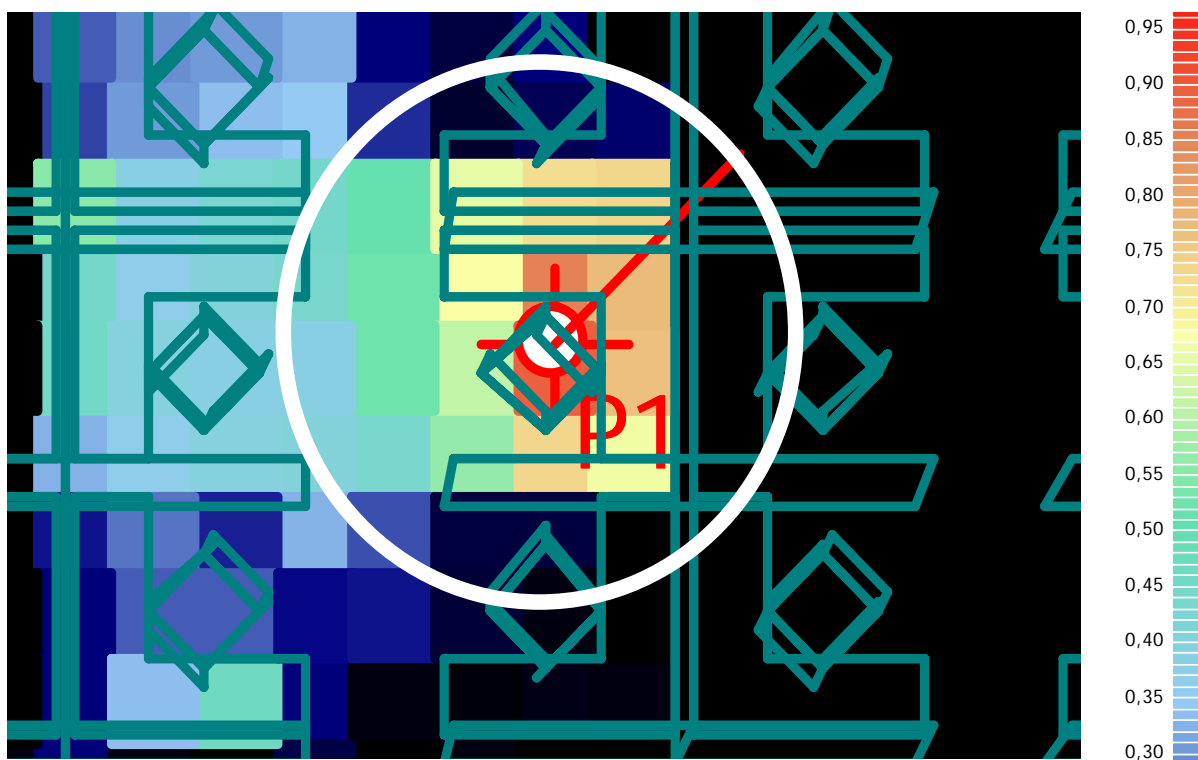


Mapa 15. STI simulado no escritório 2, situação D, com ruído intenso. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.

Já com ruído reduzido, a inteligibilidade da fala no ambiente é maior. Assim, a inserção das divisórias representou o bloqueio do som direto para as estações de trabalho em frente ao orador (mapas 16 e 17).



Mapa 16. STI simulado no escritório 2, situação A, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.



Mapa 17. STI simulado no escritório 2, situação D, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.

Através dos dados de r_D obtidos, não foi percebida a influência dos materiais de acabamento do teto e do piso nos valores desse parâmetro para o escritório 2. Além disso, nas situações com divisórias, situações D, E e F, os valores de r_D mantiveram-se inalterados independentemente do nível de ruído ambiente.

Segundo Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), escritórios com r_D inferior a 5m são classificados como acusticamente excelentes. Assim, como no escritório 1, seguindo essa classificação, o escritório 2 pode ser considerado acusticamente excelente em todas as situações simuladas.

Em relação ao DL_2 , observando a tabela 36, percebe-se que esse parâmetro é fortemente influenciado pelo tipo de material de revestimento do teto. Além disso, a inserção das divisórias resultou no aumento desse parâmetro. Assim, o maior valor de DL_2 obtido foi na simulação da situação E, ou seja, com material absorvente somente no teto e com divisórias. A inserção de material absorvente no piso representou ponto negativo para o aumento da redução do nível sonoro com a distância, havendo redução do DL_2 com a inserção desse material, isso considerando a manutenção da absorção no teto nas duas situações. O mesmo foi observado no escritório 1 entre as situações D e E.

Comparando os valores de DL_2 com a classificação de Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), tabela 10, o escritório 2 seria classificado como acusticamente pobre para todas as situações simuladas, pois em todos os casos o DL_2 resultou em valores inferiores a 5 dB(A).

A tabela 37, a seguir, apresenta os resultados obtidos nas simulações do escritório 4.

Tabela 37. Características acústicas do escritório 4, com alterações no ambiente.

Características	Situação A	Situação B	Situação C	Situação D	Situação E	Situação F
Tr (1)	0,32	0,31	0,79	0,35	0,36	0,77
r_D (m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2,50	2,50	3,50	2,00	2,00	2,50
$DL_{2,Co}$ (dB(A))	3,14	3,22	3,54	5,74	5,80	5,43

Fonte: Autor.

Nota: A primeira linha dos valores de r_D apresenta os resultados obtidos nas simulações com NPS de 64,1 dB(A). A segunda linha apresenta os valores obtidos nas simulações com NPS de 55,4 dB(A).

(1) Valor médio (s) para as frequências em banda de oitava de 500 a 2000 Hz

Deve-se salientar que esse escritório apresenta o menor volume entre os três escritórios estudados nessa etapa, 437,40m³. Além disso, possui também o menor pé-direito, 2,70m.

Como nos escritórios anteriores, em relação ao T_r , observou-se no escritório 4, tabela 37, que o aumento da absorção sonora do piso não interfere para a redução do T_r , quando existe absorção considerável no teto. A inserção de material absorvente no piso, situação B para A, aumentou o tempo de reverberação em 0,01s. Essa diferença é muito pequena, sendo imperceptível pelo ouvido humano (BORK, 2000). Assim, pode-se considerar que o T_r nas situações A e B, assim como nas situação D e E, se manteve constante.

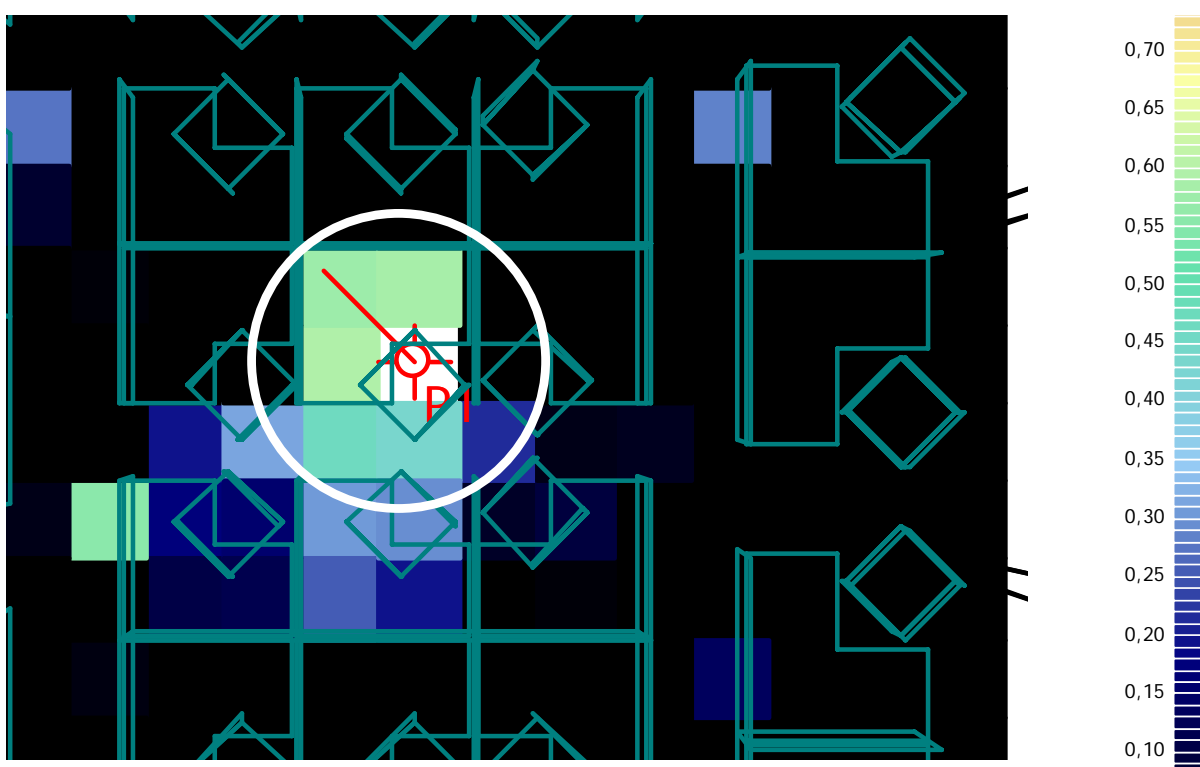
Em relação aos valores de T_r e a inserção/retirada das divisórias, vê-se o aumento desse parâmetro com a inserção das divisórias quando existe absorção considerável no local. Apenas quando há pouca absorção, situações C e E, tabela 37, a inserção das divisórias acarretou em uma pequena redução do T_r , 0,02s. O mesmo foi observado no escritório 1. Assim, novamente se explica tais resultados através do significado da inserção das divisórias para as diferentes situações. Nas situações A e B, a inserção das divisórias representa o aumento da reflexão no ambiente. Já na situação C, onde não existiam superfícies com elevado coeficiente de absorção, a inserção das divisórias representou o aumento dessa absorção, situação F.

Comparando os valores de T_r encontrados nas diferentes situações para o escritório 4 e os valores estabelecidos pelas normas, observa-se no quadro 6 que o escritório 4 nas situações A, B, D e E atende à maioria das normas. Os valores de T_r nessas situações são inadequados apenas para a norma norueguesa. Essa norma estabelece valores ideais de T_r entre 0,60 e 0,80s para as frequências em banda de oitava de 125 a 2000 Hz. Nessas frequências os valores de T_r nas situações A, B, D e E são inferiores a 0,60s, não atendendo à norma norueguesa. Já nas situações C e F, os valores nas frequências de 125 a 2000 Hz são superiores a 0,80s, não atendendo novamente a essa norma. As situações C e F não atenderam às demais normas pelos valores de T_r obtidos serem superiores ao estabelecido como valor máximo por essas normas. Nessas situações, apenas para a norma francesa, com exigência de desempenho normal e eficiente, esse escritório seria adequado acusticamente.

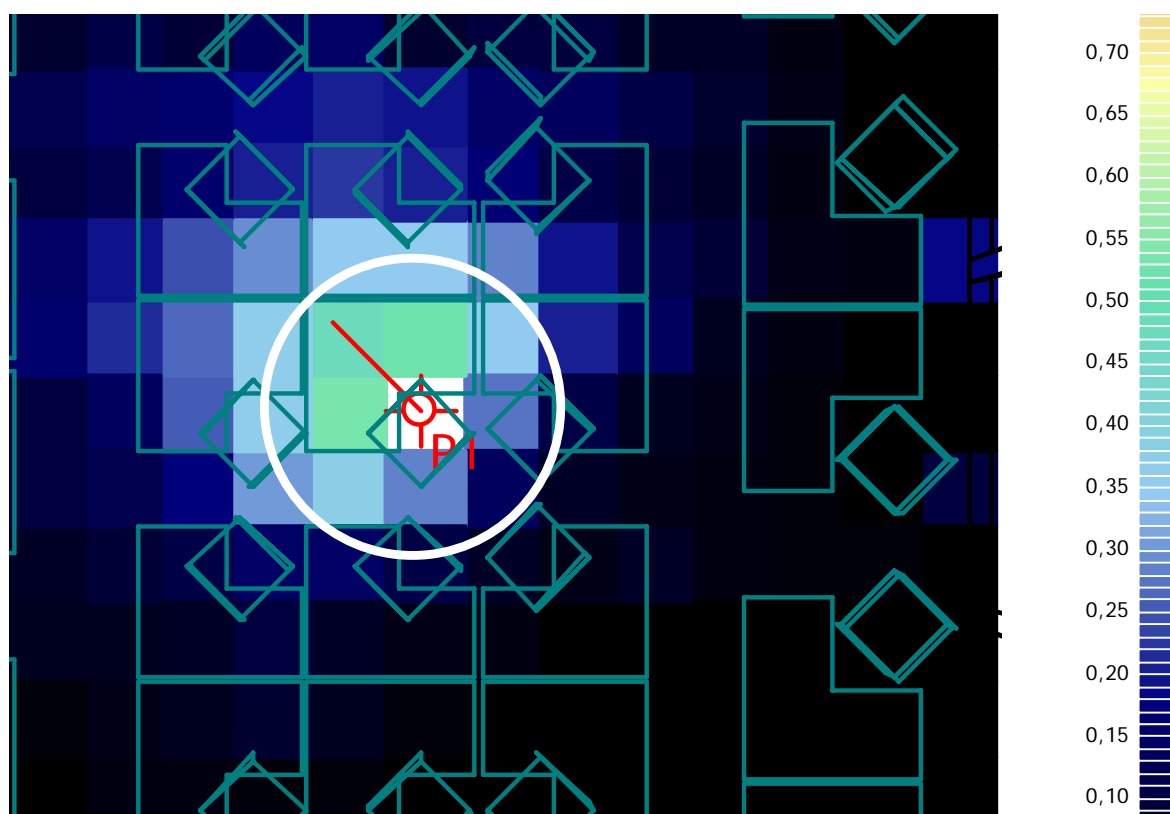
País de origem da norma		Comparação do T_r simulado com dados prescritos nas normas					
		Situação A	Situação B	Situação C	Situação D	Situação E	Situação F
Noruega		não atende	não atende	não atende	não atende	não atende	não atende
Finlândia		atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
Suécia		atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
Austrália/Nova Zelândia		atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
Alemanha		atende	atende	não atende	atende	atende	não atende
França	desemp. normal	atende	atende	atende	atende	atende	atende
	desemp. eficiente	atende	atende	atende	atende	atende	atende
	desemp. alto	atende	atende	não atende	atende	atende	não atende

Quadro 6. Comparação dos valores de T_r simulados nos escritório 4, com alterações no ambiente, com os dados especificados por normas pertinentes.

Quando observados os valores de r_D na tabela 37, constatou-se que esse parâmetro permaneceu constante, 1,00m, para as seis situações quando considerado o ruído intenso, 64,1 dB(A). Como pode ser visto no mapa 18, as divisórias reduzem a inteligibilidade nas estações de trabalho em frente ao orador, em comparação à situação sem divisórias, mapa 19. Entretanto, tal bloqueio realizado pelas divisórias não interferem nos valores de r_D , pois esse parâmetro considera o limite de 0,50 para o STI e, na situação sem divisórias, mapa 19, o valor do STI nas estações de trabalho em frente ao orador estão na faixa de 0,40, cor azul clara nos mapas.



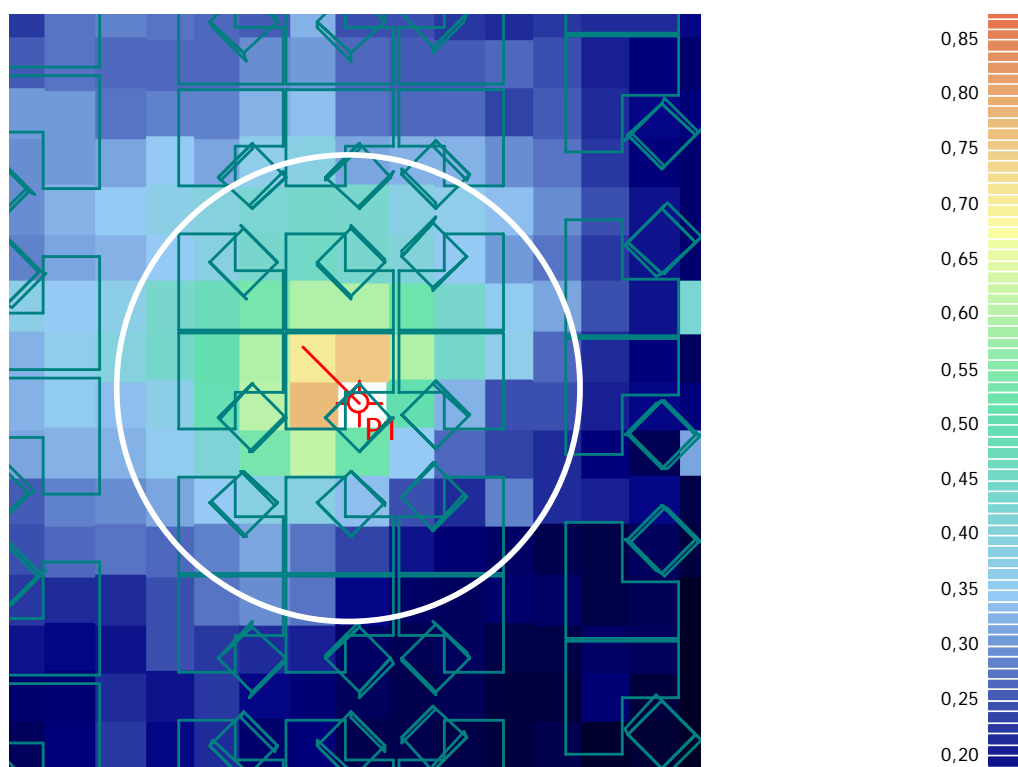
Mapa 18. STI simulado no escritório 4, situação D, com ruído intenso. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.



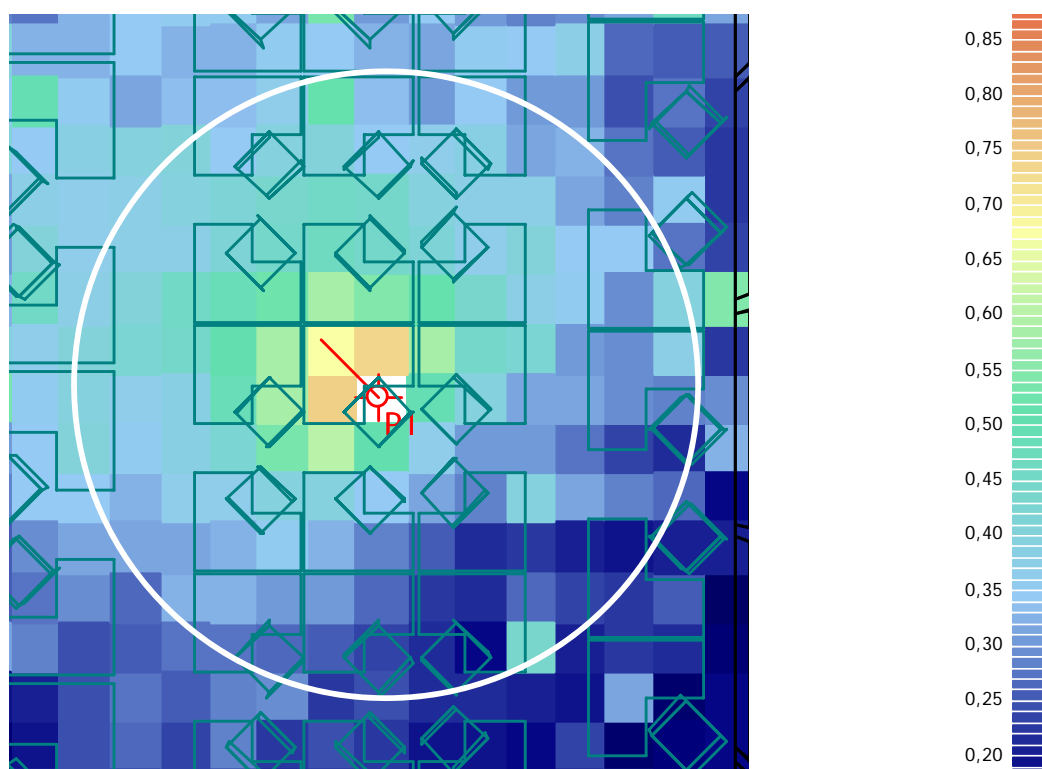
Mapa 19. STI simulado no escritório 4, situação A, com ruído intenso. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.

Ao reduzir o ruído, percebe-se grande interferência do aumento da absorção do material de acabamento do teto e da inserção de divisórias nos valores de r_D . Tais intervenções contribuíram para a redução desse parâmetro. O menor valor de r_D , com ruído fraco, $r_D=2,00\text{m}$, foi obtido nas situações D e E, ambas com material absorvente no teto e com divisórias. Já o maior, $r_D=3,50\text{m}$, foi obtido na situação C, essa situação é caracterizada pela absorção reduzida e ausência de divisórias.

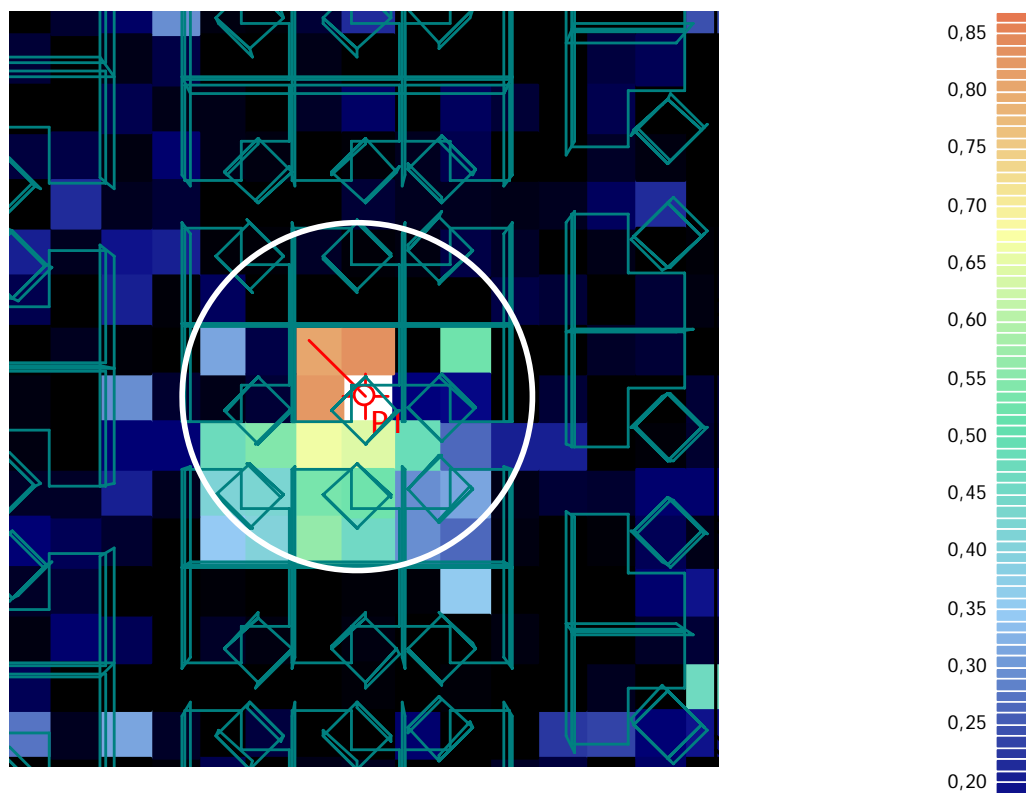
Os mapas 20, 21, 22 e 23 apresentam o grid do STI e o raio de distração nas situações A, C, D e F, respectivamente.



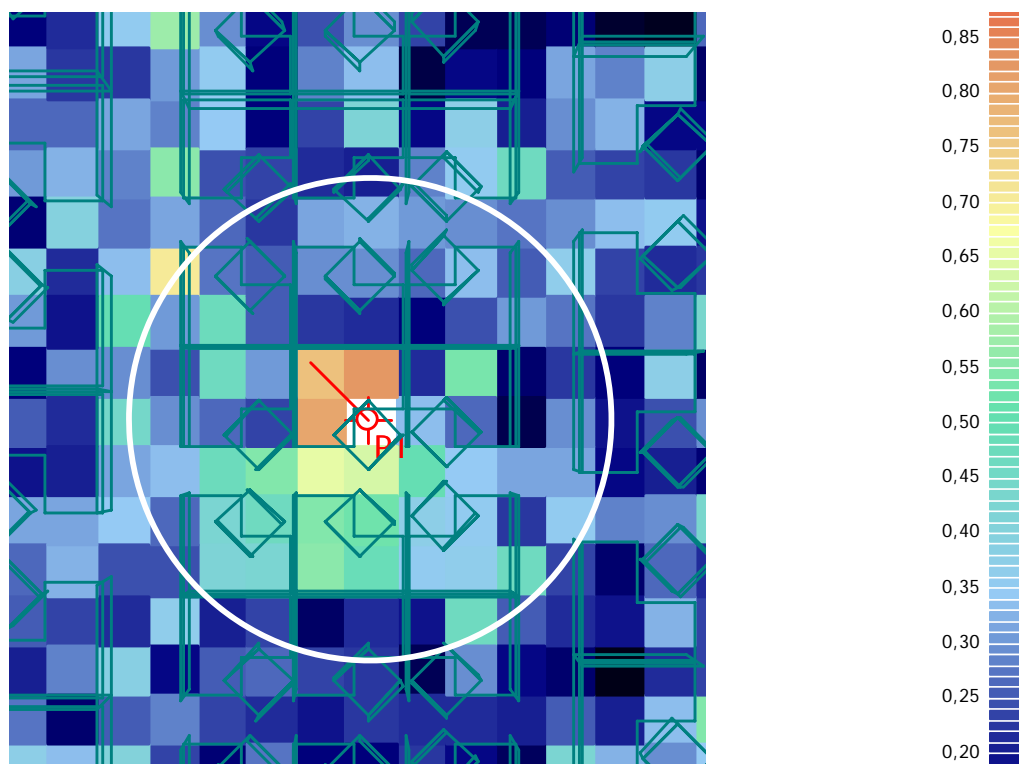
Mapa 20. STI simulado no escritório 4, situação A, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.



Mapa 21. STI simulado no escritório 4, situação C, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.



Mapa 22. STI simulado no escritório 4, situação D, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.



Mapa 23. STI simulado no escritório 4, situação F, com ruído fraco. P1 representa a fonte sonora, e o círculo branco ao seu redor representa o raio de distração. A linha mais longa em P1 indica a direção da fonte sonora.

Comparando os mapas 20 e 21, percebe-se que a retirada do material absorvente no teto e no piso resultou em uma inteligibilidade maior nas estações mais distantes, resultando em um raio de distração maior. Quando são inseridas as divisórias, mapas 22 e 23, o efeito no STI é a redução brusca desse parâmetro após as divisórias, em frente à fonte sonora. Além disso, há um aumento do STI nas estações de trabalho na parte posterior da fonte. Na situação D, mapa 22, na qual há elevada absorção e existência de divisórias, percebe-se uma inteligibilidade concentrada, com STI superior a 0,50 apenas na estação de trabalho onde está localizada a fonte sonora e na estação localizada na sua parte posterior. Já na situação F, mapa 23, pode-se ver uma inteligibilidade mais espalhada, com um maior número de estações de trabalho recebendo um STI superior a 0,50.

Em todas as situações, o r_D obtido foi inferior a 5m, caracterizando um ambiente acusticamente excelente segundo Hongisto, Virjonen e Keränen (2007).

Quando são observados os valores de DL_2 na tabela 37, vê-se que a inserção das divisórias resultou em um aumento considerável dos valores desse parâmetro. O maior DL_2 foi encontrado na situação E, caracterizada pela alta absorção do teto e existência de divisórias. A mudança do material de acabamento do piso e do teto provou pouca alteração nos valores de DL_2 .

Nas situações com divisórias, D, E e F, o escritório 4 pode ser classificado com acústica regular, conforme o prescrito por Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), considerando os valores de DL_2 , tabela 10. Segundo esses autores, escritórios com DL_2 entre 5 e 8 dB(A) possuem essa classificação. Já para as demais situações, A, B e C, o ambiente é classificado como acusticamente pobre, pois possui DL_2 inferior a 5 dB(A) (HONGISTO; VIRJONEN; KERÄNEN, 2007).

Assim, pode-se obter algumas conclusões com os dados e as análises desse capítulo. Nesse capítulo, observou-se que nos dois escritórios com volume e pé-direito menores, escritórios 1 e 4, a inserção das divisórias nas situações com absorção sonora elevada no piso e no teto (situação A), ou apenas no teto (situação B), resultou em um pequeno acréscimo aos valores de T_r . Entretanto, quando a absorção sonora é reduzida (situação C), a inserção das divisórias resulta na redução dos valores de T_r . Deve-se salientar que as divisórias utilizadas nas simulações são compostas de material de baixa absorção ($\alpha_{\text{médio}}=0,10$) quando comparada à absorção do forro acústico ($\alpha_{\text{médio}}=0,81$) e do carpete ($\alpha_{\text{médio}}=0,18$), mas de alta absorção comparada à absorção do teto de laje ($\alpha_{\text{médio}}=0,02$) e do piso cerâmico ($\alpha_{\text{médio}}=0,01$). Assim, quando há alta absorção no ambiente, as divisórias representam um material refletor, já quando a absorção é reduzida, as divisórias contribuem para o aumento dessa absorção.

Já no escritório 2, com volume e pé-direito superiores, a inserção das divisórias resultou na redução do T_r em todas as situações. Com esse resultado, entende-se que a inserção das divisórias contribuiu para o aumento da absorção sonora em todas as situações. Tal fato ocorre pelo T_r nesse escritório ser superior ao T_r obtido nos escritórios 1 e 4. Além disso, com um pé-direito maior, há menor absorção de sons diretos e de reflexões recentes pelo forro, sendo a divisória um elemento absorvente desses sons.

Ainda em relação ao T_r , observou-se pouca influência do material do piso nesse parâmetro. Foram realizadas simulações com material absorvente no piso e no teto (situações A e D), e com material absorvente apenas no teto (situações B e F). Os valores de T_r se mantiveram praticamente constantes quando o material absorvente, carpete, foi substituído por material reflexivo (cerâmica), isso mantendo o forro acústico de alta absorção no teto. A área disponível para colocação do material absorvente é a mesma tanto no teto como no piso, entretanto, os materiais utilizados para a absorção acústica no teto apresentam α muito superior ao α dos materiais utilizados no piso. Além disso, a área do teto é livre para a absorção acústica, já no piso, há outros elementos, como o mobiliário, que reduzem a eficácia do material absorvente instalado nessa superfície.

Quando os valores de T_r obtidos na simulações são comparados às normas, percebe-se a necessidade da especificação de valores ideais conforme o volume de cada ambiente. O tempo de reverberação é dependente do volume, quanto maior o volume de um ambiente, maior será o seu T_r . Assim, em escritórios com volumes muito elevados, como é o caso do escritório 2, 4922,02m³, torna-se praticamente impossível atingir o valor máximo de 0,40s especificado pela norma sueca, ou 0,50s especificado pela norma alemã. Além disso, normas que especificam valores ideais, como é o caso da norma norueguesa, também são difíceis de serem atendidas. Os dois escritórios com volumes menores, escritório 1 e 4, não atenderam à essa norma nas situações A, B, D e E, pois o T_r nessas situações é inferior ao mínimo estabelecido como ideal pela norma, 0,60s.

No gráfico 27, percebe-se claramente a relação direta do T_r com o volume dos escritórios, ou seja, quanto maior o volume, para uma mesma situação, maior é o T_r . Observa-se no gráfico que o valor do T_r para o escritório de menor volume na situação C, sem absorção acústica, é igual ao valor do T_r para o escritório de maior volume, volume 10 vezes maior que do escritório anterior, na situação A, com absorção sonora no teto e no piso. Assim, vê-se que não se pode estabelecer como ideal o mesmo valor de T_r para um escritório de 500 e outro de 5000 m³.

Ainda observando-se o gráfico 27, vê-se que as linhas que representam as situações A, B, E e F são praticamente coincidentes. Com isso, conclui-se que houve pouca diferença nos valores de T_r para as situações com absorção no teto e no piso (situações A e D) para as situações com absorção apenas no teto (situação B e E). Além disso, a inserção/retirada das divisórias entre estações de trabalho provocou também pouca alteração nos valores de T_r .

As linhas que representam as situações A e B são linhas praticamente retas, evidenciando uma função linear dos valores de T_r em relação ao volume dos ambientes. Assim, sugere-se como valores ideais para o T_r em escritórios panorâmicos os representados na linha da situação B no gráfico 27, situação com absorção elevada no teto e sem divisórias, com uma tolerância de $\pm 5\%$, diferença imperceptível ao ouvido humano segundo Bork (2000).

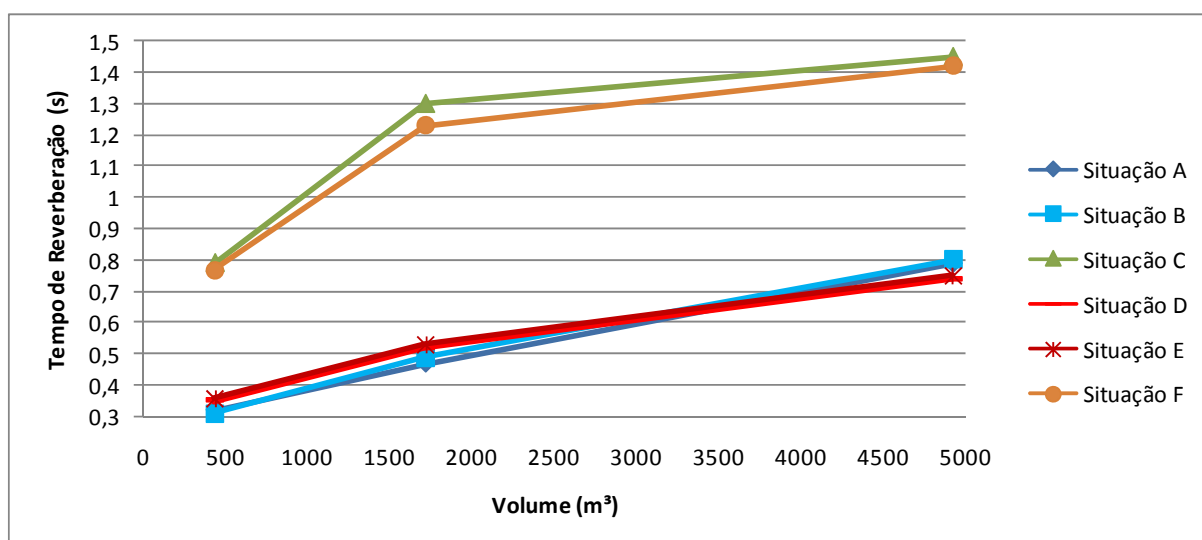


Gráfico 27. T_r médio para as frequências em banda de oitava de 500 a 2000 Hz, simulado nos escritórios nas seis situações, comparação com o volume.

Aproximando a curva que representa a situação B no gráfico 27 para uma função linear, é possível obter a seguinte equação:

$$T_{ideal} = 10^{-4}V + 0,28 \quad (15)$$

Onde T_{ideal} é o tempo de reverberação médio ideal nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz para escritórios panorâmicos (s) e V é o volume do escritório (m³).

Deve-se salientar que a equação 15 foi formulada através do estudo de escritórios panorâmicos com volumes entre 500 e 5000 m³, não sendo conhecida sua validade para escritórios com volumes superiores a 5000 m³ ou inferiores a 500 m³.

Observando os valores de r_D , vê-se que esse parâmetro possui grande dependência do nível de pressão sonora do ambiente. Quando o ruído no local é elevado, valor próximo a 65 dB(A), os valores de r_D são reduzidos, entre 1,00 e 1,50m. Com esse NPS, observou-se que a mudança dos materiais de acabamento não alteram os valores de r_D e a inserção/retirada das divisórias provocam pouca alteração nesse parâmetro, já que o raio de distração é muito pequeno.

Reduzindo o valor do NPS para aproximadamente 55 dB(A), há aumento significativo da inteligibilidade da fala e conseqüentemente há aumento do r_D , valores entre 1,50 e 3,50m. Com o ruído menor, a alteração dos materiais de acabamento provocam modificações nos valores de r_D , entretanto, não observou-se uma correlação clara entre os coeficientes de absorção dos materiais e os valores de r_D .

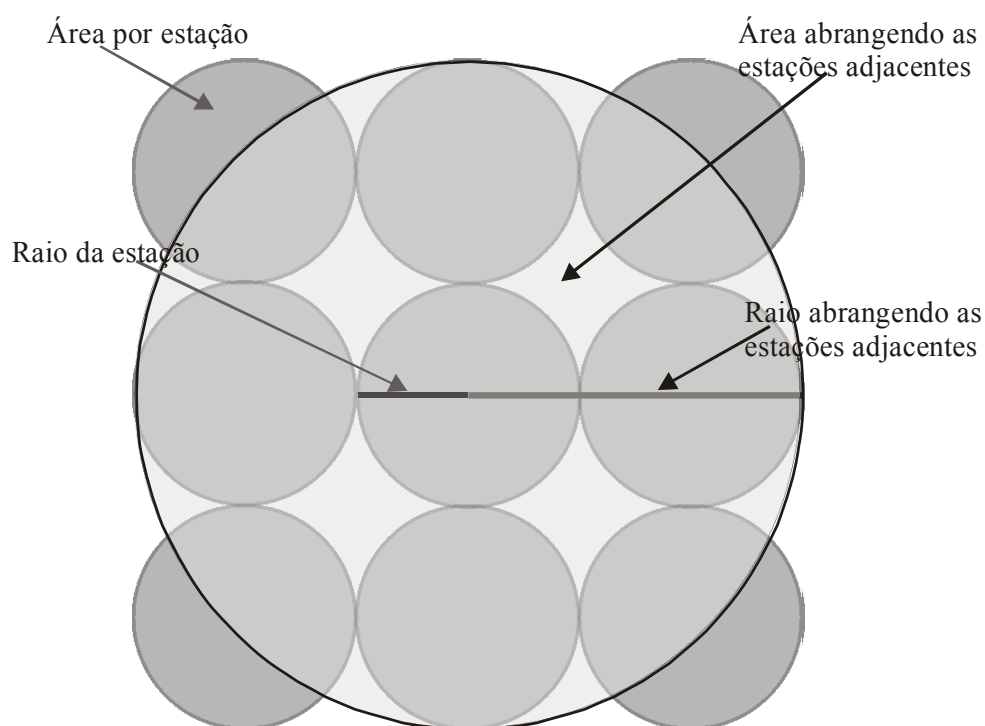
Em relação às divisórias, a influência dessas é melhor percebida nos mapas que representam a redução do STI com o distanciamento da fonte sonora. Quando o r_D é grande, ruído fraco, as divisórias provocam a redução desse parâmetro, bloqueando o som direto nas estações de trabalho após as divisórias, em frente à fonte sonora (mapas 20 e 22). Entretanto, quando o r_D é pequeno, ruído forte, a inserção das divisórias aumenta esse parâmetro, pois faz com que o STI seja intensificado na estação de trabalho onde está a fonte e nas estações na sua parte posterior (mapas 14 e 15).

Para o DL_2 , percebeu-se grande influência desse parâmetro com a inserção/retirada das divisórias. Em todos os escritórios, quando inseridas as divisórias, houve aumento dos valores de DL_2 . O maior aumento do DL_2 com a inserção das divisórias foi observado no escritório 4, na situação com absorção sonora no teto e no piso (A e D), na qual o aumento do DL_2 foi de 2,60 dB(A). Em relação aos materiais de acabamento do piso e do teto, não foi observada correlação clara entre os coeficientes de absorção desses materiais e os valores de DL_2 .

Hongisto, Virjonen e Keränen (2007) apresentaram uma classificação acústica para escritórios panorâmicos baseada nos valores de DL_2 e de r_D , tabela 10. Entretanto, essa classificação pareceu inadequada para a avaliação dos escritórios nas situações simuladas. Segundo a tabela 10, escritórios com valores de DL_2 inferior a 5 dB(A) são classificados como acusticamente pobres, já escritórios com r_D inferior a 5m são classificados como acusticamente excelentes. A maioria das situações simuladas para os três escritórios estudados apresentaram DL_2 inferior a 5 dB(A) e r_D inferior a 5m. Assim, segundo essa classificação, os escritórios seriam classificados acusticamente pobres considerando um dos parâmetros e acusticamente excelentes considerando o outro parâmetro, classificações totalmente opostas.

Segundo Ondet e Suer (1995), um valor de 0 dB para o DL_2 corresponde ao caso de uma sala muito reverberante, enquanto um valor de 6dB corresponde ao caso de uma sala tratada de forma ideal, correspondente ao campo aberto. A norma francesa NF S31-080 especifica valores de DL_2 conforme a exigência de desempenho dos funcionários: desempenho padrão, $DL_2 > 2\text{dB(A)}$; desempenho eficiente, $DL_2 > 3\text{dB(A)}$; alto desempenho, $DL_2 > 4\text{dB(A)}$ (CHIGOT, 2007). Assim, segundo essa norma, escritórios com DL_2 superior a 4 dB(A) teriam uma ótima condição acústica.

Em relação ao r_D , não foi encontrada outra referência na literatura relacionada a valores ideais para esse parâmetro, além de Hongisto, Virjonen e Keränen (2007). Entretanto, segundo Hongisto (2005), valores de STI entre 0,40 e 0,60 são encontrados entre estações de trabalho vizinhas em um escritório panorâmico bem projetado, tabela 7. Seguindo essa referência, como o r_D limita a área onde o STI é superior a 0,50, o r_D ideal, encontrado em um escritório panorâmico bem projetado, pode ser definido como aquele que abrange as estações de trabalho adjacentes. Assim, esse r_D foi calculado para cada escritório através da área por estação de trabalho, tabelas 35, 36 e 37. Através dessa área, foi calculado o raio do círculo que a define, e esse valor foi multiplicado por 3, a fim de abranger as estações de trabalho adjacentes. O desenho 15 apresenta graficamente como foi obtido o raio da estação e o raio abrangendo as estações adjacentes.



Desenho 15. Caracterização gráfica do raio da estação e do raio abrangendo as estações adjacentes. Fonte: Autor.

Considerando o raio que abrange as estações de trabalho adjacentes como o valor máximo para o raio de distração, garante-se que apenas as estações de trabalho adjacentes irão receber STI superior a 0,50. Além disso, considerando como valor mínimo para o r_D o raio da estação, garante-se que ao menos na estação de trabalho do orador o STI será superior a 0,50. Segundo a norma IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003), valores de STI entre 0,45 e 0,60 caracterizam uma inteligibilidade regular, tabela 6. Assim, praticamente todas as estações de trabalho localizadas fora do r_D terão uma inteligibilidade fraca ou ruim e as estações dentro desse raio terão uma inteligibilidade regular a excelente.

A tabela 38 apresenta os valores do raio da estação e o raio abrangendo as estações adjacentes calculados para os três escritórios avaliados. Assim, pode-se considerar como valores ideais para o r_D o intervalo entre o raio da estação, segunda coluna da tabela 38, e o raio abrangendo as estações adjacentes, terceira coluna da tabela 38. No entanto, esses valores podem ser utilizados como um parâmetro aproximado, devendo-se analisar a atividade a ser realizada no local e o leiaute dos grupos de trabalho.

Tabela 38. Raio da estação e raio abrangendo as estações adjacentes para os escritórios 1, 2 e 4 utilizando para cálculo área/estação em cada escritório.

Escritório	Raio da estação (m)	Raio abrangendo as estações adjacentes (m)
1	1,15	3,45
2	1,32	3,96
4	0,91	2,73

Fonte: Autor

Assim, considerando os valores especificados pela norma francesa NF S31-080 para o DL_2 e os valores da tabela 38 para o r_D , raio da estação $\leq r_D \leq$ raio abrangendo as estações adjacentes, pode-se realizar as conclusões a seguir:

- a) em relação ao DL_2 , o escritório 1 pode ser considerado um ambiente adequado para atividades com alto desempenho se tratado acusticamente, com material absorvente no teto e no piso ou apenas no teto, e com divisórias entre as estações de trabalho, situações D e E;

- b) já o escritório 2 possui os requisitos para abrigar atividades que exijam alto desempenho apenas na situação E, com material absorvente no teto e divisórias entre as estações;
- c) o escritório 4 deve possuir divisórias entre as estações para que seja adequado para a realização de atividades com alto desempenho, independente do material de acabamento do teto e do piso, situações D, E e F;
- d) em relação ao r_D , vê-se que esses valores são inferiores ao raio da estação no escritório 1, tabela 35, para todas as simulações com ruído intenso. Tal resultado mostra inteligibilidade ruim nessas situações. Com o ruído mais fraco, os valores de r_D simulado, tabela 35, estão dentro do intervalo entre o valor do raio da estação e do raio abrangendo as estações adjacentes, tabela 38.
- e) no escritório 2, tabela 36, ocorreu semelhantemente ao ocorrido no escritório 1, entretanto, os valores de r_D nas situações A, B e C com ruído intenso são inferiores ao raio da estação, situações sem divisórias, já as situações com divisórias, D, E e F, e ruído intenso, apresentaram valores de r_D superiores ao raio da estação e inferiores ao raio abrangendo as estações adjacentes. Semelhante ao escritório 1, em todas as simulações do r_D com o ruído fraco, os valores para esse parâmetro estiveram entre os raios da estação e o que abrange as estações adjacentes, tabela 38.
- f) para o escritório 4, tabela 37, na maioria das simulações, os valores de r_D se encontraram dentro do intervalo entre o raio da estação e o raio abrangendo as estações adjacentes. Apenas na situação C, com ruído fraco, o raio de distração simulado foi superior ao raio abrangendo as estações adjacentes, evidenciando inteligibilidade excessiva na situação sem absorção no teto e no piso e sem divisórias.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram realizadas avaliações acústicas objetivas e subjetivas em cinco escritórios panorâmicos reais. Essas avaliações foram efetuadas através da aplicação de questionários e através de medições e simulações acústicas de diversos parâmetros. Além disso, foram realizadas simulações acústicas com alterações arquitetônicas e do ruído ambiente em três dos cinco escritórios avaliados anteriormente.

Através dos resultados obtidos e das análises efetuados com o auxílio da bibliografia estudada, pôde-se obter diversas conclusões em relação à acústica em escritórios panorâmicos. Adicionalmente, foi possível responder ao problema de pesquisa e foram alcançados os objetivos estipulados no início desta tese.

Em relação à resposta subjetiva, obtida através da aplicação de questionários, verificou-se que na maioria dos escritórios, escritório 1, 2 e 3, a necessidade de concentração dos usuários é superior à necessidade de integração com os colegas de trabalho. Segundo Van der Voordt (2004b), a estrutura aberta, encontrada nos escritórios panorâmicos, propicia uma maior comunicação e facilita a troca de conhecimentos e habilidades entre os funcionários, ou seja, escritórios panorâmicos são mais adequados para a realização de atividades que exijam elevada integração entre os colegas de trabalho. Assim, observa-se que há necessidade de verificar a demanda real dos funcionários em relação à integração com os colegas de trabalho antes de decidir a forma de organizar os escritórios, através de plantas abertas ou fechadas.

Os escritórios foram classificados pela maioria dos entrevistados como sendo locais ruidosos. O local mais ruidoso foi apontado pelos ocupantes do escritório 1, o qual se mostrou o mais ruidoso na análise objetiva, com NPS próximo a 65 dB(A). Segundo Bradley (2007) e a norma brasileira NBR 10152 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA, 1987), o valor ideal para o nível de pressão sonora em um escritório com as características dos ambientes avaliados é de 45 dB(A). Entretanto, em nenhum escritório avaliado foi encontrado esse nível de ruído ambiente, sendo o menor NPS encontrado no escritório 4, 55,4 dB(A). Segundo estudos realizados por Evans e Johnson (2000), o ruído em escritórios panorâmicos pode ser estressante e desmotivante e, conforme Hedge (1982), pode ocasionar alto grau de distração e baixo nível de privacidade.

Através das análises subjetivas, observou-se que há maior demanda por privacidade que por inteligibilidade da fala em todos os escritórios avaliados. Segundo Yoon e Loftness

(2002), a falta de privacidade é apontada como o fator de maior insatisfação entre os ocupantes de escritórios panorâmicos.

Observando a resposta dos questionários, constatou-se que apenas no escritório 4 os ocupantes assinalaram a privacidade como regular. Nas simulações computacionais, foi encontrado nesse escritório o maior r_D entre todos os escritórios avaliados, devido ao menor NPS medido no local, além disso, foi encontrado nesse escritório, através das simulações, o maior DL_2 e menor T_r , evidenciando elevada redução do ruído com a distância e elevada absorção sonora, e, conseqüentemente, maior privacidade da fala, apesar do elevado r_D .

No escritório 1, os entrevistados evidenciaram inteligibilidade da fala reduzida, havendo nesse escritório demanda por maior inteligibilidade. Nas simulações computacionais, foi encontrado r_D reduzido para o escritório 1, menor r_D entre todos os escritórios estudados, evidenciando inteligibilidade da fala fraca nesse local. Com esses resultados, percebe-se a relação entre a resposta subjetiva de demanda por privacidade e inteligibilidade da fala e a análise objetiva através da simulação e medição de parâmetros acústicos.

Conforme as análises subjetivas, as fontes de maior incômodo nos escritórios avaliados são a voz humana e o toque do telefone. Resultados semelhantes foram encontrados em estudos realizados por Helenius et al. (2007), Hongisto, Virjonen e Keränen (2007) e Hongisto, Keranen e Larm (2004), principalmente no que diz respeito ao elevado incômodo dos funcionários causado pelas conversas dos colegas de trabalho. Nas medições físicas realizadas nos cinco escritórios, observou-se que a maior parte da energia sonora estava concentrada nas frequências de 500 e 1000 Hz, sons desse tipo caracterizam a fala humana (Harris, 1998). Esses resultados foram também encontrados em estudos realizados por Tang e Wong (1998)

Verificando a literatura, quadro 1 apresentado por Cavanaugh e Wilkes (1999), em escritórios com ruído de fundo de 55 dB(A) há possibilidade de comunicação relaxada a uma distância de 3,00m entre fonte e receptor, com esforço vocal normal. Já se esse ruído for de 65 dB(A), segundo os mesmos autores, a comunicação com esforço vocal normal deve ser realizada a uma distância máxima de 0,90m. Para distâncias de até 1,80m, há necessidade de voz intensa. Como dito anteriormente, nos escritórios estudados, foram encontrados valores de NPS entre aproximadamente 55 e 65 dB(A). As simulações do r_D com as condições originais dos escritórios mostrou que é possível ter um STI de 0,50, inteligibilidade regular segundo a norma IEC 60268-16 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003), tabela 6, a até 1,00m com NPS de 64,1 dBA(A), escritório 1, tabela 34, e a até 2,50m com NPS de 55,4 dB(A), escritório 4. Essa relação entre os valores de r_D e o

NPS encontrada neste estudo é semelhante à recomendação de distância entre fonte e receptor e valores de NPS realizada por Cavanaugh e Wilkes (1999) para a comunicação relaxada e com esforço vocal normal.

Nas medições do T_r , observou-se que a variação entre os valores obtidos nos diferentes pontos no interior de uma mesma sala foi superior ao limiar de percepção subjetiva, 5 % (BORK, 2000), para a maioria das frequências avaliadas. Segundo Chigot (2007), a variação de valores na medição do tempo de reverberação é um problema já conhecido: medições em uma mesma sala podem apresentar resultados diferentes e o mesmo ocorre para várias medições na mesma posição da sala.

Através das medições e simulações do STI, observou-se que os resultados desse parâmetro devem estar sempre relacionados à posição da fonte e receptor na sala avaliada. Além disso, foi verificada grande influência da orientação e diretividade da fonte nos resultados de STI. Essas observações concordam com a literatura nacional e internacional (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003; INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE, 2002; MÜLLER, 2007; SAN MARTÍN et al., 2007; BOZZOLI; VIKTOROVITCH; FARINA, 2005; NAYLOR; RINDEL, 1992; RONSSE, 2006; HOUTGAST; STEENEKEN, 1985).

Segundo Everest (2001), a medição é o modo mais preciso para quantificar salas acusticamente. Entretanto, segundo Cavanaugh e Wilkes (1999), em salas de grandes dimensões, a resposta impulsiva varia significativamente conforme a localização do ponto de medição na sala. Assim, a avaliação acústica dos escritórios através de medições se mostrou limitada, pois essa não permitiu a avaliação dos escritórios como um todo, devido à variação dos resultados conforme a localização do ponto de medição, tanto para o STI como para o T_r . Por isso, tornou-se necessária a realização de simulações acústicas com um maior número de pontos receptores, além disso, mais um parâmetro acústico, o DL_2 , foi obtido através das simulações, a fim de uma melhor avaliação das condições acústicas dos escritórios.

Por não se ter a certeza que os modelos computacionais são a representação perfeita da realidade, é importante realizar a calibração do modelo computacional, sendo a medição in situ utilizada para verificar a precisão do modelo. Assim, a medição se mostrou essencial para o desenvolvimento deste trabalho, pois tornou possível a calibração dos modelos computacionais. Essa importância das medições para a calibração do modelo já havia sido observada por Nijs et al. (2002), Long (2006), Bradley e Wang (2007) e Schroeder e Gealach (1974), Pop e Rindel (2005).

Foram encontradas dificuldades na calibração dos modelos computacionais causadas, em parte, pela imprecisão dos coeficientes de absorção e espalhamento dos materiais contidos na literatura, e pela imprecisão na transferência da localização dos pontos da medição para a simulação. Tais empecilhos já haviam sido apontados em literatura consultada (BORK, 2000, 2005a; NAYLOR; RINDEL, 1992; BRADLEY; WANG, 2007; KATZ; WETHERILL, 2007; RINDEL, 2000). Adicionalmente, observou-se grande dificuldade de calibração do modelo computacional para o T_r nas frequências de 250 e 500 Hz em escritórios com forro acústico. Tal dificuldade foi influenciada pela forma de inserção do coeficiente de espalhamento no software de simulação. O δ inserido para cada superfície é válido para todas as frequências, entretanto, como se sabe (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000), o δ é dependente da frequência sonora. Christensen (2003) afirma que o espalhamento sonoro em baixas frequências é dominado pela difração e pelo limite de tamanho das superfícies, já em altas frequências, é dominado pela irregularidade das superfícies. Tomando-se como exemplo os forros acústicos, esses materiais revestiam grandes superfícies em alguns dos escritórios estudados, entretanto, apresentavam irregulares devido à forma de instalação, com perfis, inserção de luminárias embutidas e existência de pequenas perfurações na superfície. Por isso, teve-se dúvida em relação ao valor do coeficiente de espalhamento, único para todas as frequências, que deveria ser estipulado para os forros acústicos nos cálculos no Odeon 9.0. Assim, os valores do coeficiente de espalhamento do forro e dos outros elementos que compõem as salas foram modificados até que se obtivessem nas simulações valores precisos de T_r , comparados aos valores medidos. Não foi possível relacionar os valores dos coeficientes de espalhamento com as características das superfícies e materiais de acabamento. Além disso, não houve a possibilidade de se utilizar valores estimados de δ , relacionados às características das superfícies, recomendados na literatura consultada (CHRISTENSEN, 2003; CHRISTENSEN, RINDEL, 2005a,b)

Observou-se neste trabalho que não seria possível calibrar os modelos computacionais apenas através dos valores de STI, pois uma pequena mudança entre a localização dos pontos de medição e a localização dos pontos na simulação provocava grande variação desse parâmetro, não sendo possível averiguar se a diferença entre os valores de STI simulados e medidos eram devido a imprecisões no modelo ou se apenas a localização de fonte e receptores estava inadequada. Assim, a calibração através dos valores de STI foi importante para a verificação de discordâncias entre o real e o modelo computacional, como mobiliários e equipamentos não considerados durante a modelagem das salas, mas que, durante a comparação dos dados medidos e simulados de STI, observou-se que a retirada desses

elementos alterava os valores desse parâmetro. Então, através da calibração, foi possível corrigir tais discordâncias.

Após a calibração dos modelos, com o objetivo de avaliar as salas como um todo, foram realizadas simulações do T_r e do STI com receptores em malha. Das simulações do T_r foi obtido o T_r médio, por frequência em banda de oitava, e das simulações do STI foi obtido o r_D para cada escritório. Além desses parâmetros, foi simulado o DL_2 . Essas simulações foram realizadas com os cinco escritórios nas condições originais. Esse método de avaliação se mostrou eficiente para a verificação da qualidade acústica de escritórios panorâmicos.

Além das simulações nas situações originais, através do mesmo método, foram realizadas simulações com alterações arquitetônicas e do ruído ambiente em três dos escritórios avaliados anteriormente. Essas simulações tornaram possível a obtenção de conclusões referentes à: valores ideais para o T_r , o r_D e o DL_2 em escritórios panorâmicos; elementos que provocam maior influência nos valores de cada parâmetro; relação entre os parâmetros, entre outras. Essas conclusões estão descritas a seguir.

Em relação ao tempo de reverberação, observou-se a importância do material de revestimento do teto na redução do valor do T_r em escritórios panorâmicos. Já o material de revestimento do piso provocou pouca interferência sobre os valores de T_r simulados. Entretanto, deve-se salientar que as situações simuladas não incluíam a situação com material absorvente apenas no piso. Assim, foi observado neste trabalho que há pouca interferência do material de revestimento do piso nos valores de T_r , quando há absorção elevada na superfície do teto em escritórios panorâmicos. Tal constatação concorda com a afirmação de Knudsen e Harris (1998) e Roy (2007), segundo esses autores, para ambientes onde a dimensão do pé-direito é muito inferior às dimensões da sala em planta, o teto é a melhor superfície para o tratamento da absorção.

Nas simulações com modificações do ambiente, foi observado que quando havia absorção acústica considerável nos escritórios, a inserção das divisórias, com α médio de 0,1, provocava o aumento do tempo de reverberação. Já com menor absorção no ambiente, a inserção das divisórias contribuía para a redução do T_r . Isso ocorreu, pois, quando havia alta absorção no ambiente, as divisórias representavam um material refletor, por apresentar α inferior ao α médio da sala. Entretanto, quando a absorção era reduzida, as divisórias contribuía para o aumento dessa absorção. Tal constatação não foi observada no escritório 2, no qual, com volume e pé-direito superiores aos demais escritórios, a inserção das divisórias resultou na redução do T_r em todas as situações. Com esse resultado, entende-se que a inserção das divisórias contribuiu para o aumento da absorção sonora em todas as

situações nesse escritório. Tal fato ocorre pelo T_r nesse escritório ser superior ao T_r obtido nos escritórios 1 e 4. Além disso, com um pé-direito maior, há menor absorção de sons diretos e de reflexões recentes pelo forro, sendo a divisória um elemento absorvente desses sons.

Observou-se a necessidade da especificação de valores ideais de T_r conforme o volume de cada escritório avaliado, o que não ocorre nas normas consultadas. Como constatado por Wallace Sabine há mais de um século, o tempo de reverberação é fortemente dependente do volume do ambiente, quanto maior esse volume, maior será o T_r do local, independentemente dos materiais de acabamento utilizados (equação 8). Assim, em escritórios com volumes muito elevados, como é o caso do escritório 2, volume próximo a 5000m^3 , torna-se praticamente impossível atingir o valor máximo de 0,40s especificado pela norma sueca, ou 0,50s especificado pela norma alemã.

Assim, através deste estudo, foram sugeridos como valores ideais para o T_r médio, para as frequências em banda de oitava de 500 a 2000 Hz, em escritórios panorâmicos com volumes entre 500 e 5000 m^3 , os valores obtidos através da equação 15, com uma tolerância de $\pm 5\%$, variação imperceptível ao ouvido humano segundo Bork (2000).

Assim, comparando os valores de T_r na tabela 34, simulados na situação original, e os valores ideais obtidos através da equação 15, observa-se que os escritórios 1, 4 e 5 poderiam ser considerados acusticamente adequados conforme essa classificação e os escritórios 2 e 3 seriam considerados inadequados. Segundo a avaliação subjetiva, tabela 16, usuários do escritório 2 são os trabalhadores mais insatisfeitos com o ambiente acústico do escritório. Essa insatisfação pode estar relacionada ao elevado T_r simulado neste ambiente, 1,08s (T_r médio para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz). Esse escritório possui volume de $4922,02\text{m}^3$, assim, conforme a equação 15, teria como tempo de reverberação ideal $T_{\text{ideal}}=0,77\text{s}$, com uma tolerância de 5%, teria como valor máximo para o T_r 0,81s. O valor do T_r médio obtido nas simulações na situação original desse escritório é muito superior a 0,81s, evidenciando o desconforto acústico devido à reverberação excessiva nesse local.

Em relação aos valores de r_D simulados nas situações com alterações no ambiente e do ruído, esses apresentaram grande relação com a variação do ruído ambiente. Quando o ruído no local era elevado, valor próximo a 65 dB(A), os valores de r_D eram reduzidos. Com esse NPS, observou-se que a mudança dos materiais de acabamento não alteravam os valores de r_D e a inserção/retirada das divisórias provocavam pouca alteração nesse parâmetro, já que o raio de distração era muito pequeno. Reduzindo o valor do NPS para aproximadamente 55 dB(A), observou-se aumento significativo da inteligibilidade da fala e conseqüentemente o aumento dos valores de r_D . Com o ruído menor, a alteração dos materiais de acabamento provocavam

modificações nos valores de r_D , entretanto, não observou-se uma correlação clara entre os coeficientes de absorção dos materiais e os valores de r_D .

Em relação às divisórias, quando o r_D era elevado, as divisórias provocavam a redução desse parâmetro, bloqueando o som direto nas estações de trabalho após as divisórias, em frente à fonte sonora. Entretanto, quando o r_D era pequeno, a inserção das divisórias aumentava esse parâmetro, pois fazia com que o STI fosse intensificado na estação de trabalho onde estava a fonte e nas estações na sua parte posterior. Essa observação concorda com a afirmação de Kang (2002). Segundo esse autor, as barreiras podem ser projetadas não apenas para evitar o som direto de um orador para outros grupos de conversação, mas também para aumentar o nível do sinal, por manter a energia do som do orador em seu grupo de conversação.

Em relação ao DL_2 , segundo Asselineau (2007), quanto maior for os valores desse parâmetro, melhores são as condições acústicas, pois o ruído será mais atenuado. Para o DL_2 , percebeu-se grande variação desse parâmetro com a inserção/retirada das divisórias. Escritórios com divisórias apresentavam valores superiores de DL_2 . Essa observação concorda com os resultados obtidos por Hongisto, Virjonen e Keränen (2007). Como exemplo, tem-se os valores de DL_2 obtidos para as simulações na situação original nos escritórios 2 e 4. Nesses escritórios foram obtidos os maiores valores de DL_2 entre os cinco ambientes avaliados. Os escritórios 2 e 4 eram os únicos que possuíam divisórias parciais entre todas estações de trabalho. Em relação ao material de acabamento do teto e do piso, não foi observada influência clara dessas variáveis nos valores de DL_2 . Hongisto, Virjonen e Keränen (2007) constataram que quanto maior é a absorção sonora de um ambiente, maiores são os valores de DL_2 , essa afirmação não concorda com os resultados obtidos nesta tese, pois tal relação ocorreu apenas em algumas situações avaliadas. Por exemplo, na tabela 37, as situações A e B apresentam absorção sonora muito superior à apresentada na situação C, entretanto, o valor de DL_2 obtido nessa situação foi superior ao obtido nas situações A e B.

Hongisto, Virjonen e Keräne (2007) apresentaram uma classificação acústica para escritórios panorâmicos baseada nos valores de DL_2 e de r_D . Entretanto, essa classificação pareceu inadequada para a avaliação dos escritórios nas situações avaliadas.

A norma francesa NF S31-080 especifica valores de DL_2 conforme a exigência de desempenho dos funcionários. Comparando com os valores para esse parâmetro obtidos nos escritórios avaliados, essa norma se mostrou mais adequada para a classificação da qualidade acústica desses ambientes conforme os valores de DL_2 .

Em relação ao r_D , não foi encontrada outra referência na literatura relacionada a valores ideais para esse parâmetro, além de Hongisto, Virjonen e Keränen (2007). Entretanto, como dito anteriormente, segundo Hongisto (2005), valores de STI entre 0,40 e 0,60 são encontrados entre estações de trabalho vizinhas em um escritório panorâmico bem projetado. Asselineau (2007) afirma que a inteligibilidade da fala deve ser boa localmente, a fim de promover a conversação de membros de um mesmo grupo. Seguindo essas referências, como o r_D limita a área onde o STI é superior a 0,50, o r_D ideal, encontrado em um escritório panorâmico bem projetado, pode ser definido como aquele que abrange as estações de trabalho adjacentes. Assim, considerar o raio que abrange as estações de trabalho adjacentes (desenho 15) como o valor máximo para r_D e o raio da estação de trabalho (desenho 15) como o valor mínimo para o r_D pareceu ser uma classificação geral adequada para a avaliação da inteligibilidade e privacidade da fala em escritórios panorâmicos, através desse parâmetro. Entretanto, devem-se observar as necessidades particulares de cada escritório, principalmente no que diz respeito à necessidade de concentração e de integração com outros colegas de trabalho, a forma de organização dos grupos de trabalho, e analisar os mapas de STI para verificar o melhor leiaute a ser utilizado.

Com esse estudo, pôde-se observar que para um escritório panorâmico apresentar condições acústicas adequadas para abrigar atividades que exijam alto desempenho, observando-se a redução do ruído com a distância, esse escritório deve possuir absorção acústica no teto e divisórias entre as estações de trabalho. Já para ser adequado em relação à inteligibilidade e à privacidade da fala, deve ter ruído ambiente pouco intenso, na faixa de 55 dB(A), sendo que o ruído ambiente próximo a 65 dB(A) resulta em uma inteligibilidade reduzida. Além disso, escritórios com menor volume, aproximadamente 500 m³, e alta densidade de trabalhadores devem possuir divisórias entre as estações de trabalho e/ou material absorvente no teto, isso para reduzir a inteligibilidade da fala nas estações de trabalho mais distantes, não adjacentes ao orador. Em relação ao tempo de reverberação, esse parâmetro se mostrou muito importante para a calibração dos modelos computacionais e para a verificação da quantidade de absorção necessária para um bom condicionamento acústico. Contradizendo o exposto por Hongisto, Virjonen e Keränen (2007), os quais não recomendam que o T_r seja utilizado como um parâmetro de projeto de acústica em escritórios panorâmicos. Segundo os valores obtidos para o T_r , um escritório panorâmico acusticamente adequado deve possuir absorção acústica elevada na superfície do teto.

Assim, este trabalho possibilitou a análise dos elementos que influenciam na adequação acústica de escritórios panorâmicos. Foram gerados dados que tornaram possível a definição

dos parâmetros acústicos adequados para a avaliação desses ambientes. Além disso, através deste trabalho, pôde-se observar a interferência das características arquitetônicas, dos materiais de acabamento e do ruído ambiente sobre os valores desses parâmetros.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões de trabalhos futuros são relacionadas à simulação acústica de escritórios panorâmicos com diferentes alterações no ambiente. Tais como:

- a) divisórias entre as estações de trabalho com diferentes alturas e materiais;
- b) absorção sonora somente no piso e utilização de material refletivo no teto;
- c) NPS inferior a 55 dB(A), por exemplo 45 dB(A), nas simulações do STI;
- d) alterações das dimensões em proporção dos escritórios: altura, comprimento e largura;
- e) alterações no volume dos escritórios, reforçando ou reduzindo a validade da equação 15, principalmente para volumes inferiores a 500m³ e superiores a 5000m³.

Além dessas, outras sugestões são referentes à utilização de outro software de simulação computacional, o qual preferencialmente considere o δ por frequência, para a simulação de escritórios panorâmicos. Além disso, outros escritórios panorâmicos poderiam ser avaliados através do método sugerido, instaladas as proposições de melhorias expostas nesta tese e verificada a alteração do ambiente acústico dos escritórios, através da aplicação de questionários e medições in situ antes e após a instalação do projeto acústico.

REFERÊNCIAS

ALLEN, J. B.; BERKLEY, D. A. Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 65, n. 4, p. 943-950, 1979.

ASSELINÉAU, M. Integration of Furnishing in Open Plan Office Design: Case Studies. In: International Congress on Acoustics, 19., 2007, Madrid. **Anais eletrônicos...** United Kingdom: Institute of Acoustics, 2007. Disponível em http://www.sea-acustica.es/WEB_ICA_07/fchrs/papers/rba-10-010.pdf. Acesso em 22 out. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade: procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 10152**: Níveis de ruído para conforto acústico: procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 12179**: Tratamento acústico em recintos fechados: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

ATAL, B. S. et al. Evaluation of Acoustic Properties of Enclosures by Means of Digital Computers. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 40, n. 2, p. 428-433, 1966.

BATISTA, N. N. **A importância do projeto acústico como um dos parâmetros para obtenção da qualidade do espaço edificado**. 1998. 154 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

BERANEK, L. **Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture**. 2th ed. New York: Springer, 2004.

BERANEK, L.; VÉR, I. L. **Noise and vibration control engineering: Principles and applications**. USA: John Wiley & Sons, 1992.

BISTAFÀ, S.; BRADLEY, J. Reverberation time and maximum background-noise level for classroom from a comparative study of speech intelligibility metrics. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 107 n. 2, p. 861-875, 2000.

BOBRAN, H. W. **Handbuch der Bauphysik**. Stuttgart: völlig neubearbeitete Auflage, 1995.

BORK, I. A. Comparison of Room Simulation Software- The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. **Acta Acustica**, Stuttgart, v. 86, p. 943-956, 2000.

_____. Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part I: Measurements. **Acta Acustica**, Stuttgart, v. 91, p. 740–752, 2005. (a)

_____. Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part II: Calculation. **Acta Acustica**, Stuttgart, v. 91, p. 753 – 763, 2005. (b)

BOZZOLI, F.; VIKTOROVITCH, M.; FARINA, A. Balloons of Directivity of Real and Artificial Mouth Used in Determining Speech Transmission Index. In: AES Convention, 118., 2005, Barcelona. **Anais eletrônicos...** New York: Audio Engineering Society, 2005. Convention Paper 6492. Disponível em: <<http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/203-AES118.pdf>>. Acesso em 22 out. 2008.

BRADLEY, D. T.; WANG, L. M. Comparison of Measured and Computer-Modeled Objective Parameters for an Existing Coupled Volume Concert Hall. **Building Acoustics**, Brentwood, UK, v. 14, n. 2, p.79–90, 2007.

BRADLEY, J. S. Designing and Assessing Speech Privacy in Open-plan Offices. In: International Congress on Acoustics, 19., 2007, Madrid. **Anais eletrônicos...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2007. Disponível em http://www.sea-acustica.es/WEB_ICA_07/fchrs/papers/rba-10-007.pdf. Acesso em 24 out. 2008.

_____. The Acoustical Design of Conventional Open Plan Offices. **Canadian Acoustics Journal**, Toronto, v. 31 n. 2, p. 23-31, 2003.

_____. Optimising Sound Quality for Classrooms. In: Encontro da SOBRAC, XX., Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações, II.,2002, **Anais...** Rio de Janeiro. CD-ROM.

BROOKS, C. N. **Architectural Acoustics**. United States of America: McFarland e Company, 2003.

CAVANAUGH, W. J.; WILKES J. A. **Architectural Acoustics: Principle and Practice**. United States of America: John Wiley & Sons, 1999.

CAVANAUGH, W. R. et al. Speech Privacy in Buildings. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 34, n. 4, p. 475- 492, 1962.

CHIGOT, P. Alternative Room Acoustic Descriptors for Open Offices- Progresses in Standardization. In: International Congress on Acoustics, 19., 2007, Madrid. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2007. PACS 43.55.

_____. Controlled transparency in workplace design: balancing visual and acoustic interaction in office environments. **Journal of Facilities Management**, Bradford, v. 2, n. 2, p. 121-131, 2003.

_____. Effects of sound in offices: subjective experience vs objective assessment. **Facilities**, Bradford, v. 23 n. 3/4, p. 152-163, 2005.

CHISTENSEN, C. L. **Odeon Room Acoustics Program: Version 7.0**, Industrial, Auditorium and Combined Editions. Denmark: Technical University of Denmark, 2003.

CHRISTENSEN, C. L.; RINDEL, J. R. A new scattering method that combines roughness and diffraction effects. In: Forum Acusticum, 2005, Budapest. **Anais Eletrônicos...** Madrid: EAA, 2005. Disponível em: <http://www.odeon.dk/pdf/CLC%20fa2005.pdf>. Acesso em 24 out. 2008 (a).

_____. Predicting Acoustics in Class Rooms. In: Internoise, 34., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** United States of America: I-INCE, 2005. CD-ROM (b).

CHU, W. T. Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 63, n. 5, p. 1444-1450, 1978.

CORDEIRO, C. V. C. **Qualidade Acústica em Escritórios Panorâmicos: A Utilização de Sistemas Eletrônicos de Mascaramento**. 1996. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Arquitetura)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

DANCE, S. M.; SHIELD, B. M. Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces. Part I: performance spaces. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 58, p. 1-18, 1999.

DUBOC, M. **Propagação do Som em Ambiente Panorâmico Caracterizando os Aspectos da Absorção**. 1998. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

DUCOURNEAU, J.; PLANEAU, V. The average absorption coefficient for enclosed spaces with non- uniformly distributed absorption. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 64, p. 845-862, 2003.

DUFFY, F. **Oficinas**. Madrid: H. Blume Ediciones, 1980.

DURVAL, C. L.; CHARLES, K. E.; VEITCH, J. A. Open-Plan Office Density and Environmental satisfaction. **National Research Council Canada**, Canada, IRC Research Report RR-150, 2002. Disponível em: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/rr/rr150/rr150.pdf>. Acesso em 24 out. 2008.

EGAN, M. D. **Architectural Acoustics**. New York: McGraw Hill, 1988.

EVANS, G. W.; JOHNSON, D. **Stress and open-office noise**. **Journal of Applied Psychology**, Washington, v. 85, p. 779-783, 2000.

ENVIRONMENTAL Noise. Denmark: Bruel & Kjaer: Sound & Vibration Measurement, 2001.

EVEREST, F. A. **Master Handbook of Acoustics**. 4. ed. United States of America: McGraw-Hill, 2001.

EYRING, C. F. Reverberation Time in "Dead" Rooms. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 1, p. 217-241, 1930.

FARINA, A. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. In: AES Convention, 122nd, 2007, Vienna, Austria. **Anais Eletrônicos...** New York: Audio Engineering Society. Disponível em <<http://www.ramsete.com/Public/Papers/226-AES122.pdf>>. Acesso em 27 out. 2008.

_____. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In: AES Convention, 108th, 2000, Paris. **Anais Eletrônicos...** New York: Audio Engineering Society. Disponível em < <http://www.ramsete.com/Public/Papers/134-AES00.PDF>>. Acesso em 27 out. 2008.

_____. Verification of the accuracy of the Pyramid Tracing algorithm by comparison with experimental measurements by objective parameters. In: International Conference on Acoustic, 1995, Trondheim, Norway. **Anais Eletrônicos...** Norway: ICA95. Disponível em <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/073-ICA95.PDF>. Acesso em 27 out. 2008.

FARINA, A.; TRONCHIN, L. Advanced techniques for measuring and reproducing spatial sound properties of auditoria. In: International Symposium on Room Acoustics: Design and Science, 2004, Hyogo, Japan. **Anais...** Japan: Acoustical Society of Japan. CD-ROM.

FASOLD, W.; VERES, E. **Schallschutz und raumakustik in der praxis**: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. Berlin: Verlag Bauwesen, 2003.

FRENCH, N. R.; STEINBERG, J. C. Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 19, n. 1, p. 90-119, 1947.

FREYMUTH, H. et al. **Lehrbuch der Bauphysik**. 5. ed Stuttgart: B. G. Teubner, 2002.

HARRIS, C. M. **Handbook of acoustical measurements and noise control**. USA: Acoustical Society of America, 1998.

_____. **Noise Control in Buildings: A Practical Guide for Architects and Engineers**. USA: McGraw-Hill, 1994.

HEDGE, A. The open-plan office, a systematic investigation of employee reaction of their work environment. **Environment and Behavior**, Thousand Oaks, CA, USA, v. 14, p. 519-542, 1982.

HELENIUS, R. et al. Acoustic Environment in Finnish Offices: The Summary of Questionnaire Studies. In: International Congress on Acoustics, 19., 2007, Madrid. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2007. CD-ROM.

HONGISTO, V. Work Performance and Office Noise: Do they correlate? In: International Congress on Acoustics, 19., 2007, Madrid. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2007. CD-ROM.

HONGISTO, V.; KERANEN, J.; LARM, P. Simple model for acoustical design of open-plan offices. **Acta Acustica**, Stuttgart, v. 90, p. 481- 495, 2004.

HONGISTO, V.; VIRJONEN, P.; KERÄNEN, J. Determination of Acoustic Conditions in Open Offices and Suggestions for Acoustic Classification. In: International Congress on Acoustics, 19., 2007, Madrid. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2007. CD-ROM.

HOSGITO, V. A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. **Indoor Air**, USA, v. 15, n. 6, p. 458-468, 2005.

HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. M. A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 77, n. 3, pp. 1069-1077, 1985.

_____. The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Prediction of Speech Intelligibility. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 54, n. 2, p. 557, 1973.

HUCHINGSON, R. D. **New Horizons for Human Factors in Design**. USA: Mc Graw- Hill, 1981.

INSTRUCTION Manual Dirac Room Acoustics Software Type 7841. Denmark: Bruel & Kjaer: Sound & Vibration Measurement, 2003.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60268- 16**: Sound system equipment- Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Switzerland, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14257**: Acoustics- Measurement and parametric description of spatial sound distribution curves in workrooms for evaluation of their acoustical performance. Switzerland, 2001.

_____. **ISO 3382**: Acoustics- Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Switzerland, 1997.

_____. **ISO/DIS 3382-1**: Acoustics- Measurement of room acoustic parameters- Part 1: Performance rooms. Switzerland, 2006.

INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE. **E 1374-02**: Open Office Acoustics and Applicable ASTM Standards. USA, 2002.

JEON, J. Y.; LEE, S. C. ; VORLÄNDER, M. Development of scattering for concert halls. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 65, p. 341-355, 2004.

KANG, J. Numerical modeling of speech intelligibility in dining spaces. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 63, p. 1315- 1333, 2002.

KATZ, B. F. G. International Round Robin on Room Acoustical Impulse Response Analysis Software 2004. **Acoustics Research Letters Online**, Melville, NY, v. 5, n. 4, p. 158 – 164, 2004.

KATZ, B. F. G.; WETHERILL, E. A. The Fall and Rise of the Fogg Art Museum Lecture Hall: A Forensic Study. **Acoustics Today**, Melville, NY, v. 3, n. 3, p. 10-16, 2007.

KJELLBERG, A. et al. The Effects of Nonphysical Noise Characteristics, Ongoing Task and Noise Sensitivity on Annoyance and Distraction due to Noise at Work. **Journal of Environmental Psychology**, USA, v. 16, p. 123-136, 1996.

KNUDSEN, V. O. The Hearing of Speech in Auditoriums. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 1, n. 1, p. 56-82, 1929.

KNUDSEN, V. O.; HARRIS, C. M. **Acoustical Designing in Architecture**. 5. ed. USA: Acoustical Society of America, 1988.

KRAJCARZ, F. Open Office Acoustic Design: Multi- dimensional Case Studies. In: International Congress on Acoustics, 19., 2007, Madrid. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2007. CD-ROM.

KRYTER, K. D. Methods for the Calculation and Use of the Articulation Index. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 34, n. 11, p. 1689- 1697, 1962.

LEE, S. Y.; BRAND J. L. Effects of control over office workspace on perceptions of the work environment and work outcomes. **Journal of Environmental Psychology**, USA, v. 25, p. 323-333, 2005.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. San Diego: Elsevier, 2006.

MAKRINENKO, L. I. **Acoustics of Auditoriums in Public Buildings**. USA: Acoustical Society of America, 1994.

MASIERO, B. S.; IAZZETTA, F. Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva. **Acústica e Vibrações**, Rio de Janeiro, n. 36, p. 34-41, 2005.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural Acoustics: Principles and Design**. New Jersey: Prentice- Hall, 1999.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Normas Regulamentadoras**: NR-17: ergonomia. Brasília-DF, 2005.

MOMMERTZ, E. Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 60, p. 201-203, 2000.

MÜLLER, S. Avaliação da Inteligibilidade com o STI. . **Acústica e Vibrações**, Rio de Janeiro, n. 38, p. 25-38, 2007.

NAYLOR, G.; RINDEL, J. H. Predicting Room Acoustical Behavior with the ODEON Computer Model. In: ASA meeting, 124th., 1992, New Orleans. **Anais...** New York: Acoustical Society of America, 1992. Paper 3aAA3.

NEUBAUER, R. Classroom acoustics: Do existing reverberation time formulae provide reliable values? In: International Congress on Acoustics, 17., 2001, Rome. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2001. CD-ROM.

NEUBAUER, R.; KOSTEK, B. Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Sound Absorption. **Archives of Acoustics**, Poland, v. 26, n. 3, p. 183-201, 2001.

NIJS, L. et al. Absorbing Surfaces in Ray-tracing Programs for Coupled Spaces. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 63, p. 611–626, 2002.

NOGUEIRA, F. F.; **Análise Paramétrica do Campo Acústico de Escritórios Panorâmicos**. 2002. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ONDET, A. M.; SUER, J. Development and validation of a criterion for assessing the acoustic performance of industrial rooms. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 97, n. 3, p. 1727- 1731, 1995.

PAULO, J. P.; MARTINS, C. R.; COELHO, J. L. B. Técnica Híbrida Segmentada Ponderada Aplicada à Estimação de Parâmetros Acústicos de Salas. In: Jornadas de Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores, 3., 2005, Lisboa. **Anais Eletrônicos...** Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2005. Disponível em: <<http://www.deetc.isel.ipl.pt/jetc05/JETC05/Artigos/Electronica/Poster%20ET/121.pdf>>. Acesso em 28 out. 2008.

PFEIFFER, B. B. **Frank Lloyd Wright: 1867 – 1959: Construir para a Democracia.** Germany: Taschen, 2004.

PEJTERSEN, J. et al. Indoor climate, psychosocial work environment and symptoms in open-plan offices. **Indoor Air**, USA, v. 16, n. 5, p. 392- 401, 2006.

POP, C. B.; RINDEL, J. H. Perceived Speech Privacy in Computer Simulated Open-plan Offices. In: : *Internoise*, 34., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** United States of America: I-INCE, 2005. CD-ROM.

RINDEL, J. H.; CHRISTENSEN, C. L. Room Acoustic Simulation and Auralization: How close can we get to the real room? In: *Western Pacific Acoustics Conference*, 8., 2003, Melbourne. **Anais Eletrônicos...** Seoul: Acoustical Society of Corea. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.8.9022>>. Acesso em 28 out. 2008.

RINDEL, J.H. The use of computer modeling in room acoustics. **Journal of Vibroengineering**, Kaunas, Lithuania, v. 3, n. 4, p. 219-224, 2000.

RONSSSE, L. Speech Intelligibility of Lecture Halls. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 119, n. 5, p. 3207, 2006.

ROY, K. Acoustic Design in the New Architectural Trend of “Exposed Structures”. In: *International Congress on Acoustics*, 19., 2007, Madrid. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2007. CD-ROM.

SAN MARTÍN, R. et al. Influence of Source Orientation on the Measurement of Acoustic Parameters. **Acta Acustica**, Stuttgart, v. 93, p. 387-397, 2007.

SCHLITTMEIER, S. J. et al. Background Speech Varying in Intelligibility: Effects on Cognitive Performance and Perceived Disturbance. In: *International Congress on Acoustics*, 19., 2007, Madrid. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 2007. CD-ROM.

SCHROEDER, M. R. Computers in Acoustics: Symbiosis of an Old Science and a New Tool. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 45 n. 5, p. 1077- 1088, 1969.

_____. Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 66, n. 2, p. 497-500, 1979.

_____. New Method of Measuring Reverberation Time. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 37, p. 409-412, 1965 (a).

_____. Response to “Comments on ‘New Method of Measuring Reverberation Time’”. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 38, p. 359-361, 1965 (b).

SCHROEDER, M. R.; GEALACH, R. Diffusion, room shape and absorber location: influence on reverberation time. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 56, n. 4, p. 1300, 1974.

STEENEKEN, H. J. M.; HOUTGAST, T. A physical method for measuring speech-transmission quality. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 67, p. 318- 326, 1980.

_____. Validation of the revised STIr method. **Speech Communication**, USA, v. 38, p. 413-425, 2002.

STEINBERG, J. C. Effects of Distortion upon the Recognition of Speech Sounds. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 1, n. 1, p. 121-137, 1929.

TANG, S. K.; WONG, C. T. Performance of noise Indices in Office Environment Dominated by Noise from Human Speech. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 55, n. 4, p.293-305, 1998.

VAN DER VOORDEN, T. J. M. et al. The applicability of ray- tracing based simulation tools to predict sound pressure levels and reverberation times in “coupled spaces”. In: International Building Performance Simulation Association Conference, 6., 1999, Kyoto. **Anais...** USA: IBPSA, 1999. v. 3, p. 1211 – 1218.

VAN DER VOORDT, T. J. M. Cost and benefits of flexible workspaces: work in progress in The Netherlands. **Facilities**, Bradford, v. 22, n. 9/10, p. 240-246, 2004. (a)

_____. Productivity and employee satisfaction in flexible workplaces. **Journal of Corporate Real Estate**, United Kingdom, v. 6, n. 2, p. 133- 148, 2004. (b)

VIVEIROS, E.B. Acústica de Salas e Técnicas Impulsivas. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, III., 1995, Gramado. **Anais...** Porto Alegre: Antac, 1995. p. 725-730.

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

VORLÄNDER, M. International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations. In: International Congress on Acoustics, 15., 1995, Trondheim. **Anais...** United Kindom: Institute of Acoustics, 1995. p. 689-692.

VORLÄNDER, M.; MOMMERTZ, E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. **Applied Acoustics**, United Kingdom, v. 60, p. 187-199, 2000.

WANG, L. M.; BOWDEN, E. E. Finding connections among indoor noise criteria, human perception, and worker performance. **Acoustics Today**, Melville, NY, v. 2, n. 1, p. 33-37, 2006.

YOON W. C.; LOFTNESS V. Comparison of two speech privacy measurements, articulation index (AI) and speech privacy noise isolation class (NIC), in open workplaces. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY. v. 111, p. 2441, 2002.

APÊNDICE

APÊNDICE A- Questionário aplicado para a análise subjetiva dos escritórios avaliados.



As respostas deste questionário serão utilizadas para trabalho acadêmico, tese de doutorado. Esta tem por objetivo avaliar a resposta subjetiva no ambiente de trabalho e compará-la com resultados objetivos coletados no escritório. Agradeço a sua participação e compreensão.

Empresa/ sede:

Área ou setor em que trabalha:

Sexo:

Idade:

1. Quanto tempo você trabalha neste tipo de ambiente (escritório aberto- sem paredes até o teto entre postos de trabalho)

- Menos de 1 ano
- Entre 1 e 2 anos
- Entre 2 e 5 anos
- Mais de 5 anos

Nas perguntas a seguir, circule um número (de 0 a 4) conforme sua resposta estiver mais próxima ao indicado no extremo esquerdo ou extremo direito.

2. Quanta concentração você necessita para a realização de seu trabalho no escritório?

nada					muita
0	1	2	3		4

3. Quanto é importante a integração com outros colegas para a realização de seu trabalho?

nada					muito
0	1	2	3		4

4. O barulho atrapalha a realização de suas tarefas no escritório?

nada					muito
0	1	2	3		4

5. Assinale o nível de **incômodo** causado por cada uma dessas fontes sonoras durante o horário de trabalho:

	nada				muito
a. Voz humana	0	1	2	3	4
b. Ar-condicionado	0	1	2	3	4
c. Impressoras e fotocópias	0	1	2	3	4
d. Telefone	0	1	2	3	4
e. Externo ao escritório, mas interno a empresa	0	1	2	3	4
f. Externo a empresa	0	1	2	3	4
g. Outros	0	1	2	3	4

6. Você se sente incomodado em seus colegas estarem escutando suas conversas?

nada				muito
0	1	2	3	4

7. Há dificuldade de entender seus colegas quando falam com você?

nenhuma				muita
0	1	2	3	4

8. Quanto ao barulho, você acha que este ambiente de trabalho é: (assinale apenas uma resposta)

- muito silencioso
- silencioso
- agradável
- ruidoso
- muito ruidoso

9. Você está satisfeito acusticamente com seu ambiente de trabalho?

nada				muito
0	1	2	3	4

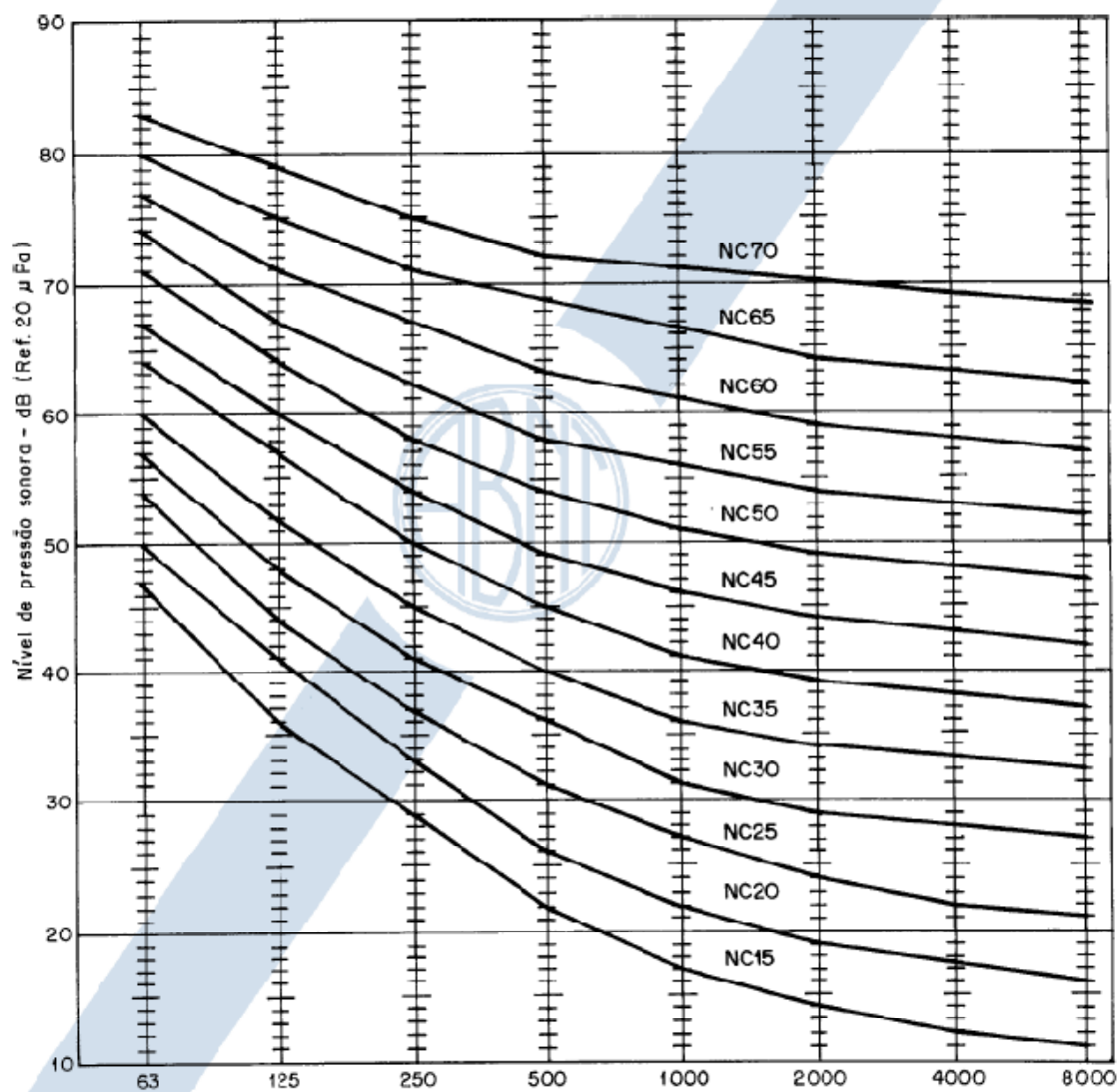
ANEXOS

ANEXO A - Critérios recomendados de ruído de fundo em edifícios típicos.

Tipo de espaço ou atividade	Curva NC	Nível sonoro (dB(A))
Locais de trabalho onde não é necessária comunicação da fala constante nem uso do telefone.	60-70	65-75
Garagens	45-60	52-65
Cozinhas, lavanderias.	45-60	52-65
Salas de computadores	45-55	52-61
Escritórios secretariais e de negócios em geral.	40-50	47-56
Laboratórios, clínicas, salas de espera.	40-50	47-56
Espaços públicos, corredores, circulações.	40-50	47-56
Lojas, restaurantes, cafeterias.	35-45	42-52
Grandes escritórios, secretarias, áreas de descanso.	35-45	42-52
Salas de jantar e estar em residências.	30-40	38-47
Salas de aula e bibliotecas.	30-40	38-47
Escritórios privados e semi-privados.	30-40	38-47
Quartos e apartamentos com ar-condicionado em hotéis.	30-40	38-47
Quartos em residências e hospitais.	25-35	34-42
Escritórios executivos e espaços de conferência.	25-35	34-42
Auditórios múltiplo uso pequenos (até 500 assentos) e salas de conferência.	Max. 35	Max. 42
Igrejas e sinagogas pequenas.	Max. 25	Max. 38
Estúdios de gravação, rádio e TV (utilização de microfone próximo).	Max. 25	Max. 38
Igrejas e sinagogas (para música litúrgica).	Max. 25	Max. 38
Grandes auditórios para música sem amplificação e drama.	Max. 25	Max. 38
Estúdios de gravação, rádio e TV (utilização de microfone afastado).	Max. 20	Max. 30
Salas para ópera.	Max. 20	Max. 30
Salas para recitais de música.	Max. 20	Max. 30

Fonte: Cavanaugh e Wilkes (1999, p. 38, tradução nossa).

ANEXO B - Curvas de critério de ruído (NC).



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987).

ANEXO C - Níveis de pressão sonora correspondentes às curvas de avaliação (NC)

Curva NC	Nível de pressão sonora (dB) por frequência (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
15	47	36	29	22	17	14	12	11
20	50	41	33	26	22	19	17	16
25	54	44	37	31	27	24	22	21
30	57	48	41	36	31	29	28	27
35	60	52	45	40	36	34	33	32
40	64	57	50	45	41	39	38	37
45	67	60	54	49	46	44	43	42
50	71	64	58	54	51	49	48	47
55	74	67	62	58	56	54	53	52
60	77	71	67	63	61	59	58	57
65	80	75	71	68	66	64	63	62
70	83	79	75	72	71	70	69	68

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987).

ANEXO D – Níveis de pressão sonora ideais para edificações com diferentes funções, correlação às curvas NC.

Locais	Nível de pressão sonora (dB(A))	Curva NC
Hospitais		
Apartamentos, enfermarias, berçários, centro cirúrgicos.	35-45	30-40
Laboratórios, áreas para uso do público.	40-50	33-45
Serviços	45-55	40-50
Escolas		
Biblioteca, salas de música, salas de desenho.	35-45	30-40
Salas de aula, laboratórios.	40-50	35-45
Circulação.	45-55	40-50
Hotéis		
Apartamentos	35-45	30-40
Restaurantes e salas de estar.	40-50	35-45
Portaria, recepção, circulação.	45-55	40-50
Residências		
Dormitórios	35-45	30-40
Salas de estar	40-50	35-45
Auditórios		
Salas de concertos, teatros.	30-40	25-30
Salas de conferências, cinemas, salas de uso múltiplo.	35-45	30-35
Restaurantes	40-50	35-45
Escritórios		
Salas de reunião	30-40	25-35
Salas de gerência, salas de projetos e de administração.	35-45	30-40
Salas de computadores.	45-65	40-60
Salas de mecanografia	50-60	45-55
Igrejas e templos (cultos meditativos)	40-50	35-45
Locais para esporte		
Pavilhões fechados para espetáculos e atividades esportivas	45-60	40-55

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)