

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
NÍVEL MESTRADO**

JOÃO PEDRO COLNAGHI

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DIVISÓRIAS ACÚSTICAS PARCIAIS:
Estudo experimental em escritório de planta livre**

São Leopoldo

2022

JOÃO PEDRO COLNAGHI

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DIVISÓRIAS ACÚSTICAS PARCIAIS:
Estudo experimental em escritório de planta livre**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

Coorientador: Prof. Me. Rafael Ferreira Heissler

São Leopoldo

2022

C717c Colnaghi, João Pedro.
Caracterização e avaliação de divisórias acústicas
parciais : estudo experimental em escritório de planta
livre / por João Pedro Colnaghi. – 2022.
104 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do
Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2022.
Orientadora: Dra. Maria Fernanda de Oliveira.
Coorientador: Me. Rafael Ferreira Heissler.

1. Acústica arquitetônica. 2. Escritório de planta livre.
3. Divisórias acústicas parciais. 4. Privacidade acústica.
5. Decaimento espacial da fala. 6. Ruído. I. Título.

CDU: 72:531.77

JOÃO PEDRO COLNAGHI

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DIVISÓRIAS ACÚSTICAS PARCIAIS:
Estudo experimental em escritório de planta livre**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Aprovado em 21 de outubro de 2022

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira – Presidente da Banca e Orientadora -
UNISINOS

Prof. Me. Rafael Ferreira Heissler – Coorientador - UNISINOS

Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González – Avaliador - UNISINOS

Profa. Dra. Ranny Loureiro Xavier Nascimento Michalski – Avaliador - UNISINOS

AGRADECIMENTO À UNISINOS

O presente trabalho foi desenvolvido com o apoio do Programa de Bolsas Unisinos de Apoio à Pesquisa da COVID-19.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha irmã e colega de profissão, Ana Maria, por ser uma fonte inesgotável de inspiração, por se mostrar sempre disposta a me aconselhar e a aprender comigo e por me desafiar constantemente em prol da minha evolução pessoal e profissional.

À minha mãe, Mirna, por ser uma referência de força, superação e afeto, por se dedicar de forma incondicional à nossa família e nos proporcionar carinho e alento nos momentos mais críticos e desafiadores.

Ao meu pai e colega de profissão, Álvaro, pelas oportunidades e conselhos que sempre ofereceu para o meu desenvolvimento profissional e por me incentivar a ser autêntico.

À minha orientadora, Prof. Dra. Maria Fernanda de Oliveira, por ter me introduzido ao tema da acústica arquitetônica, por incentivar minha busca pelo conhecimento e crescimento acadêmico e pela confiança depositada em mim ao longo do desenvolvimento do presente trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Me. Rafael Ferreira Heissler, pela parceria que construímos ao longo da nossa trajetória acadêmica e pelos seus ensinamentos e orientações que foram fundamentais para a elaboração do programa experimental desta pesquisa.

Aos incansáveis membros da equipe do laboratório de acústica do Itt Performance pela ajuda oferecida durante a realização dos ensaios.

Ao meu amigo, Eduardo Müller, pela generosidade de ter se voluntariado para me auxiliar no desenvolvimento e na produção das divisórias acústicas e pela troca de conhecimentos ao longo do processo.

Por fim, agradeço aos meus queridos amigos e colegas de mestrado por todo apoio e companheirismo durante minha trajetória acadêmica.

“Eu chamo arquitetura de música congelada.
(...) a influência que flui sobre nós da arquitetura é como a da música”.

Johann Wolfgang Von Goethe

RESUMO

Escritórios são ambientes de longa permanência onde são desenvolvidas atividades que demandam elevado nível de concentração e atividade cognitiva e, portanto, merecem atenção especial em relação ao conforto ambiental. Dentre os fatores que influenciam as condições ambientais, o impacto causado por elevados níveis de ruído e pela falta de privacidade acústica é um dos mais relevantes em ambientes de trabalho, ao causar fadiga, estresse e decréscimo de produtividade. O projeto arquitetônico está diretamente relacionado à qualidade acústica de escritórios. Em ambientes de trabalho compartilhados como escritórios de planta livre, onde tarefas que demandam níveis distintos de privacidade e concentração são executadas simultaneamente, a implementação de um conjunto de soluções arquitetônicas que cumprem funções distintas e complementares é essencial para o condicionamento acústico desses ambientes. Pesquisas comprovam que escritórios que não contam com divisórias acústicas parciais apresentam baixa taxa de decaimento espacial do nível sonoro da fala e alto nível de inteligibilidade da fala, resultando em ambientes excessivamente ruidosos e com pouca privacidade. Isto posto, o objetivo deste estudo experimental é caracterizar e avaliar a eficiência de divisórias acústicas parciais no condicionamento acústico de escritórios de planta livre. Para tal finalidade, foi elaborado um programa experimental que consistiu em projetar e produzir divisórias acústicas parciais, determinar sua capacidade de absorção sonora através de ensaios em laboratório (ISO 354:2003 e ISO 20189:2018) e analisar sua influência nos parâmetros e descritores utilizados para avaliação da qualidade acústica de escritórios de planta livre através de medições realizadas em 3 configurações diferentes de sala, com e sem a presença das divisórias (ISO 3382-3:2022 e ISO 22955:2021). Os resultados obtidos no programa experimental proposto apontam que as divisórias proporcionaram um aumento na taxa de decaimento espacial do nível sonoro da fala e uma redução no tempo de reverberação da sala. Porém, a falta de tratamento acústico adequado nas superfícies da sala limitou o efeito das divisórias e não permitiu que os resultados desejados para a qualificação acústica do escritório fossem alcançados.

Palavras-chave: Acústica arquitetônica. Escritório de planta livre. Divisórias acústicas parciais. Privacidade acústica. Decaimento espacial da fala.

ABSTRACT

Offices are long-stay environments where activities that demand a high level of concentration and cognitive activity are carried out and, therefore, deserve special attention in relation to environmental comfort. Among the factors that influence environmental conditions, the impact caused by high noise levels and lack of acoustic privacy is one of the most relevant in work environments, causing fatigue, stress and decreased productivity. The architectural design is directly related to the acoustic quality of offices. In shared work environments such as open-plan offices, where tasks that demand different levels of privacy and concentration are performed simultaneously, the implementation of a set of architectural solutions that fulfill distinct and complementary functions is essential for the acoustic conditioning of these environments. Researches show that offices that do not have acoustic screens have a low spatial decay rate of speech sound level and a high level of speech intelligibility, resulting in excessively noisy environments with little privacy. That said, the aim of this experimental study is to characterize and evaluate the efficiency of acoustic screens in the acoustic conditioning of open-plan offices. For this purpose, an experimental program was developed consisting on designing and producing acoustic screens, determining their sound absorption capacity through laboratory tests (ISO 354:2003 and ISO 20189:2018) and analyzing their influence on the parameters and descriptors used for evaluating the acoustic quality of open-plan offices through measurements carried out in 3 different room configurations, with and without the presence of screens (ISO 3382-3:2022 and ISO 22955:2021). The results obtained in the proposed experimental program indicate that the screens provided an increase in the spatial decay rate of speech sound level and a reduction in the reverberation time of the room. However, the lack of adequate acoustic treatment on the surfaces of the room limited the effect of the screens and did not allow the desired results for the acoustic qualification of the office to be achieved.

Key-words: Architectural Acoustics. Open-plan office. Acoustic screens. Acoustic privacy. Spatial decay of speech.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sombra acústica gerada pelo fenômeno de difração na cabeça.....	20
Figura 2 – Propagação do som em recintos fechados	21
Figura 3 – Relação entre campo direto e campo reverberante de uma sala	22
Figura 4 – Diagramas polares de índices de diretividade da voz humana em bandas de oitava.....	24
Figura 5 – Relação sinal-ruído entre o nível de pressão sonora da fala (sinal) e do ruído de fundo (ruído).....	25
Figura 6 – Fatores influentes no controle da relação sinal-ruído em escritórios.....	26
Figura 7 – Meios de atenuação sonora em escritórios compartimentados (a) e em escritórios de planta livre (b)	27
Figura 8 – Transmissão do som pelos flancos de uma divisória parcial.....	32
Figura 9 – Exemplos de tratamento do teto com absorção sonora promovida por forro plano (a) e painéis suspensos (b)	33
Figura 10 – Representação esquemática da propagação do som em um escritório com instalação alta (a) e baixa (b) de nuvens acústicas	33
Figura 11 – Reflexões sonoras no teto provocadas por luminária reflexiva	35
Figura 12 – Transmissão sonora pela reflexão das paredes ao lado das divisórias parciais.....	36
Figura 13 – Prolongamento da divisória parcial até a parede	37
Figura 14 – Exemplos de layouts para estações de trabalho visando elevar o nível de privacidade da fala	39
Figura 15 – Escritório de planta livre antes (a) e depois (b) de receber tratamento acústico	40
Figura 16 – Exemplo de divisórias de piso e de mesa instaladas em um escritório de planta livre.....	41
Figura 17 – Implementação de conjunto de elementos em escritórios de planta livre	47
Figura 18 – Relação entre a porcentagem de entrevistados altamente perturbados pelo ruído (%HD) e os descritores da norma ISO 3382-3	51
Figura 19 – Relação entre o raio de distração (r_D) e a taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,s}$) em simulações com diferentes tempos de reverberação (TR), com e sem divisórias	54

Figura 20 - Relação entre o raio de distração (r_D) e nível de pressão sonora da fala a 4 m ($L_{p,A,S,4m}$) em simulações com diferentes tempos de reverberação (TR), com e sem divisórias	55
Figura 21 – Resultados do decaimento espacial do SPL da fala ponderado em A (a) e do STI (b) obtidos através de medições realizadas em estudo de caso para 4 configurações diferentes de sala.....	57
Figura 22 – Relação entre o SPL do ruído de fundo e o raio de distração com base em resultados de medições realizadas em estudo de caso para 4 configurações diferentes de sala.....	58
Figura 23 – Fluxograma das etapas do programa experimental	60
Figura 24 – Desenho esquemático da composição das divisórias de piso	62
Figura 25 - Montagem das divisórias na etapa estrutural (a) e na etapa de acabamento (b).....	63
Figura 26 - Divisórias de piso e de mesa instaladas	64
Figura 27 – Planta baixa (a) e corte AA' (b) do escritório.....	65
Figura 28 - Escritório do Portal da Inovação em sua configuração original.....	66
Figura 29 – Planta baixa (a) e corte (b) da câmara reverberante do itt Performance.....	68
Figura 30 - Tipo de montagem das divisórias de mesa (a) e das divisórias de piso (b) em câmara reverberante	69
Figura 31 - Divisórias de mesa (a) e de piso (b) instaladas na câmara reverberante para medições dos coeficientes de absorção sonora.....	70
Figura 32 – Planta baixa (a) e corte AA' (b) do escritório com posições de fonte, microfone e divisórias de piso (azul) e de mesa (vermelho) adotadas.....	75
Figura 33 - Medições sendo realizadas com a sala vazia (a) e com as divisórias de mesa instaladas (b)	77
Figura 34 - Operador realizando os ensaios no interior do escritório	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Área de absorção equivalente por divisória em bandas de terço de oitava	82
Gráfico 2 – Coeficientes de absorção sonora por divisória em bandas de oitava	83
Gráfico 3 – Tempo de reverberação médio nas 3 configurações de sala e áreas de absorção inseridas pelas divisórias de mesa (DM) e pelas divisórias de piso e de mesa (DPM) em bandas de oitava	85
Gráfico 4 - SPL da fala ponderado em A medido na linha de medição A para as 3 configurações de sala.....	88
Gráfico 5 - SPL da fala ponderado em A medido na linha de medição B para as 3 configurações de sala.....	89
Gráfico 6 - STI medido na linha de medição A para as 3 configurações de sala	90
Gráfico 7 - STI medido na linha de medição B para as 3 configurações de sala	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de atenuação sonora entre estações de trabalho	43
Tabela 2 – Valores referenciais dos descritores de valor único para más e boas condições acústicas em escritórios de planta livre.....	49
Tabela 3 – Características da câmara reverberante do itt Performance	68
Tabela 4 – Distâncias entre fonte e posições dos microfones para ambas linhas de medição.....	76
Tabela 5 - SPL não ponderado da fala omnidirecional a 1,0 m de distância da fonte sonora em campo livre	80
Tabela 6 – Coeficientes de absorção sonora por divisória em bandas de oitava.....	83
Tabela 7 – Nível de potência sonora da OSS em bandas de oitava e SPL a uma distância de 1 m da OSS em campo livre em bandas de oitava	84
Tabela 8 – Tempo de reverberação médio medido nas 3 configurações de sala em bandas de oitava	86
Tabela 9 – SPL médio do ruído de fundo ponderado em A ($L_{p,A,B}$) para as 3 configurações de sala.....	87
Tabela 10 – Descritores de valor único calculados para as 3 configurações de sala	92

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
OSS	Fonte Sonora Omnidirecional
SV	Sala Vazia
SDM	Sala com Divisórias de Mesa
SDPM	Sala com Divisórias de Piso e de Mesa
SPL	Nível de Pressão Sonora
STI	Índice de Transmissão da Fala
TR	Tempo de Reverberação

LISTA DE SÍMBOLOS

dB	Decibel
Hz	Hertz
α_w	Coeficiente de absorção sonora ponderado
A_{obj}	Área de absorção sonora equivalente de um objeto único
α_{obj}	Coeficiente de absorção sonora de um objeto único
$D_{2,S}$	Decaimento espacial da fala
$L_{p,A,S}$	Nível de pressão sonora da fala ponderado em A
$L_{p,A,S,4m}$	Nível de pressão sonora da fala ponderado em A a 4 m da fonte
r_C	Raio de conforto
r_D	Raio de distração
$L_{p,A,B}$	Nível médio de pressão sonora residual ponderado em A
$TR_{250-4000Hz}$	Tempo de reverberação médio entre 250 Hz e 4000 Hz
r_P	Raio de privacidade
%HD	Highly disturbed percentage
R^2	Coeficiente de determinação
$D_{A,S}$	Atenuação acústica in situ da fala
$L_{eqA,T}$	Nível sonoro na estação de trabalho
°C	Graus Celcius
$L_{W,oss}$	Nível de potência sonora da fonte omnidirecional
r	Distância entre OSS e microfone
$L_{p,B}$	Nível de pressão sonora residual
$L_{p,oss,1m,ff}$	Nível de pressão sonora a distância de 1 m da OSS em campo livre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Tema	14
1.2 Problematização	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 Justificativa.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Princípios de propagação do som em escritórios.....	19
2.2 Projeto acústico de escritórios	28
2.2.1 Parâmetros do projeto arquitetônico em escritórios de planta livre	28
2.2.2 Divisórias acústicas parciais.....	41
2.2.3 Sistemas de mascaramento do som	46
2.3 Parâmetros de avaliação da qualidade acústica de escritórios	48
2.3.1 Parâmetros e descritores acústicos em escritórios de planta livre	48
2.3.2 Relação entre os descritores acústicos e soluções arquitetônicas.....	53
3 MÉTODO	60
3.1 Etapas do programa experimental.....	60
3.2 Determinação dos objetos de estudo.....	61
3.2.1 Projeto e produção das divisórias acústicas parciais	61
3.2.2 Escritório de planta livre	64
3.3 Caracterização acústica de dispositivos em câmara reverberante	67
3.3.1 Absorção sonora das divisórias acústicas parciais.....	67
3.3.2 Calibração da potência sonora da OSS	72
3.4 Medições acústicas em campo	73
3.5 Equações para caracterização dos descritores acústicos	78
4 RESULTADOS	82
4.1 Características acústicas das divisórias e da OSS	82
4.2 Estudo experimental em escritório de planta livre.....	85
4.3 Discussão dos resultados	93
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

A necessidade da permanência por longos períodos dentro de casa, como consequência das medidas restritivas de isolamento social adotadas para combater a pandemia da COVID-19, mudou a forma como algumas pessoas se relacionam com os ambientes internos. Aspectos relacionados ao bem estar como conforto acústico, conforto térmico, qualidade lumínica, privacidade, flexibilidade de uso do espaço e contato com a natureza passaram a ser mais valorizados na avaliação das edificações (PETERS *et al.*, 2020; PETERS *et al.*, 2022).

Ao serem solicitados abruptamente a aderir ao modelo de trabalho remoto em casa, conhecido popularmente como *home office*, grande parte dos trabalhadores relataram um declínio no estado geral de saúde desde o início da implementação desse novo modelo. Os principais motivos para esse declínio foram relacionados ao aumento de distrações devido ao ruído intrusivo no ambiente de trabalho, à convivência com filhos pequenos, à dificuldade de comunicação com colegas de trabalho, à falta de espaço adequado e designado para trabalho, à diminuição da atividade física e à alimentação desequilibrada (XIAO *et al.*, 2020; KARANIKA-MURRAY *et al.*, 2022). Dentre esses aspectos, o impacto do ruído intrusivo ganha destaque em muitos casos por demandar soluções mais complexas e custosas, principalmente quando se trata de problemas relacionados ao isolamento acústico em edificações existentes (HEISSLER *et al.*, 2017).

O estresse causado pelo compartilhamento dos espaços de trabalho com familiares, as deficiências na mecânica corporal causadas pela falta de uma estação de trabalho ergonomicamente adequada e a atividade sedentária prolongada podem causar problemas de saúde física e mental e, conseqüentemente, a redução da produtividade (XIAO *et al.*, 2020). Outros efeitos adversos percebidos no ambiente de trabalho residencial durante a pandemia foram a supervisão limitada das lideranças das empresas, a dificuldade de estabelecer uma rotina saudável em relação ao tempo diário dedicado às atividades profissionais e o apoio social reduzido devido às medidas restritivas de isolamento social (BABAPOUR CHAFI *et al.*, 2022).

Em contrapartida aos impactos negativos percebidos em muitos casos, alguns trabalhadores relataram se sentir beneficiados pela experiência forçada de trabalhar

em casa e aproveitaram essa mudança de paradigma para explorar novas rotinas de trabalho que proporcionassem ganhos de produtividade pessoal. Os principais efeitos positivos destacados foram o aumento da flexibilidade e autonomia e a melhora na gestão do tempo e no equilíbrio entre a vida profissional e pessoal devido à capacidade de atender com mais facilidade às responsabilidades de trabalho e às não relacionadas ao trabalho (CHAN *et al.*, 2022; BABAPOUR CHAFI *et al.*, 2022; BARATH *et al.*, 2022).

A crescente aceitação do modelo de trabalho remoto por empresas de diversos setores incentivou a discussão e a investigação científica sobre as condições de saúde, produtividade e satisfação dos trabalhadores perante os modelos tradicionais de trabalho adotados antes da ocorrência da pandemia. Essa discussão abriu espaço para que modelos híbridos que intercalam o trabalho remoto com o trabalho presencial sejam adotados e para que as legislações existentes relacionadas à flexibilidade dos modelos de trabalho e à qualidade ambiental dos escritórios sejam reformadas e aprimoradas (CHAN *et al.*, 2022; KARANIKA-MURRAY *et al.*, 2022).

A casa tornou-se um espaço multifuncional que deve facilitar o trabalho, a escolaridade, a prática de exercícios, a culinária, a socialização, o entretenimento e o repouso. Devido à necessidade de conciliar a prática de atividades que demandam níveis distintos de concentração e privacidade, os layouts de apartamentos que podem ser adaptados para serem utilizados de várias formas são essenciais para apoiar essa mudança de paradigma. Os novos edifícios residenciais devem focar mais atenção na separação acústica entre ambientes e no conforto ambiental dos espaços de *home office* (PETERS *et al.*, 2020).

Entretanto, é importante considerar que, conforme a pandemia passou a ser controlada por meio da medicina e os espaços públicos voltaram a ser ocupados normalmente, muitas pessoas retomaram suas atividades profissionais presenciais, mesmo que de forma intercalada com o trabalho remoto em casa. Com isso, o uso de espaços públicos de *coworking* e de escritórios privados de uso compartilhado por longos períodos diários voltou a ser uma realidade na vida dos trabalhadores de muitas empresas. Portanto, é fundamental que esses escritórios sejam reavaliados do ponto de vista arquitetônico para que apresentem soluções que comportem essas mudanças de paradigma e ofereçam aos usuários condições ambientais que favoreçam a produtividade, a concentração, a privacidade e momentos de repouso e

descontração (GRUENWALD, 2020; BERBEGAL-MIRABENT, 2021; BABAPOUR CHAFI *et al.*, 2022; BARATH *et al.*, 2022).

Os escritórios podem ser divididos em duas diferentes categorias: escritórios compartimentados e escritórios de planta livre. Em escritórios compartimentados os profissionais, individualmente ou pequenas equipes, têm suas próprias salas inteiramente separadas por divisórias piso-teto (ou paredes), portas e janelas. Já o layout dos escritórios de planta livre (*open plan offices*) consiste em várias estações de trabalho posicionadas em uma única sala, ocupadas por profissionais do mesmo setor da empresa ou não, que podem ser separadas por divisórias de altura parcial e pelo mobiliário (HONGISTO, 2005; HONGISTO *et al.*, 2016; ISO, 2021).

O conceito de escritório de planta livre foi desenvolvido na década de 1950 por dois consultores alemães, Eberhard e Wolfgang Schenel. Os principais objetivos da implementação desse modelo eram a melhora na comunicação entre colegas de trabalho, facilitando o trabalho em equipe, e a redução de custos devido à otimização de espaço, possibilitando uma quantidade maior de funcionários por área de escritório (PIERRETTE *et al.*, 2013; RIBEIRO, 2018; BARATH *et al.*, 2022).

Os layouts de escritórios de planta livre apresentam uma série de benefícios, primordialmente econômicos, que o tornam atrativos para empresários e projetistas. Por conta disso, esse modelo de escritório cresceu em popularidade nas últimas décadas e se tornou um dos mais comuns entre empresas de diversos setores (HONGISTO, 2005; PIERRETTE *et al.*, 2015; RIBEIRO, 2018; PARK *et al.*, 2020; TROCKA-LESZCZYNSKA *et al.*, 2021).

1.2 Problematização

No que diz respeito à produtividade e à satisfação dos funcionários com o ambiente de trabalho, estudos sugerem que o modelo de escritório de planta livre é prejudicial em comparação ao escritório compartimentado, levando em consideração fatores como a perturbação pela falta de espaço, falta de privacidade acústica e visual, distrações por ruídos intrusivos, má qualidade lumínica, condições térmicas inadequadas, entre outros (HONGISTO *et al.*, 2016; DI BLASIO *et al.*, 2019).

Em comparação a outros fatores ambientais, o impacto de sons ou ruídos indesejados é um dos mais relevantes em escritórios. O condicionamento acústico desses ambientes está diretamente relacionado com problemas de saúde física e

mental, como estresse, hipertensão, diminuição da qualidade do sono e dores de cabeça, além de comprometer o desenvolvimento adequado de atividades de trabalho, estudo, lazer e repouso (SEDDIGH *et al.*, 2015; PIERRETTE *et al.*, 2015; BISTAFA, 2018).

O controle dos ruídos entre estações de trabalho é mais fácil de ser resolvido em escritórios compartimentados devido à presença de sistemas de vedação verticais que, com as configurações adequadas, permitem alcançar altos níveis de isolamento acústico. Em escritórios de planta livre, as soluções são mais limitadas e, portanto, o condicionamento acústico se torna mais complexo (LONG, 2014).

O projeto arquitetônico de espaços de trabalho compartilhados em edifícios públicos e residenciais (isto é, *open plan office* e *home office*, respectivamente), onde tarefas que demandam diferentes níveis de concentração e privacidade são praticadas simultaneamente no mesmo ambiente, deve propor soluções específicas para garantir condições acústicas adequadas e, conseqüentemente, tornar o cotidiano dos trabalhadores mais saudável e produtivo (RIBERIO, 2018; TROCKALESZCZYNSKA *et al.*, 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Caracterizar a eficiência quanto ao condicionamento acústico de um escritório de planta livre frente ao uso de divisórias acústicas parciais.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar a capacidade de absorção sonora das divisórias;
- b) Determinar os parâmetros acústicos objetivos em um escritório de planta livre em uso e com a inserção das divisórias acústicas parciais;
- c) Analisar a influência da implementação de divisórias nos descritores de avaliação da qualidade acústica de escritórios de planta livre.

1.4 Justificativa

Os parâmetros acústicos de uma sala podem ser descritos usando duas abordagens: subjetiva, associada à percepção humana; e objetiva, expressa através de resultados de medições, cálculos e fórmulas (BRANDÃO, 2016). Devido à complexidade em associar essas duas abordagens, proporcionar boas condições acústicas através de soluções arquitetônicas pode ser percebido como complicado e, em algumas ocasiões, inadequado. A falta de discernimento e compreensão sobre o assunto pode ser um dos motivos pelos quais uma série de espaços de escritório com design contemporâneo (incluindo não apenas espaços de planta livre, mas também salas de conferências e reuniões, corredores e zonas de relaxamento) são resolvidos incorretamente do ponto de vista acústico (TROCKA-LESZCZYNSKA *et al.*, 2021).

Escritórios que não proporcionam condições acústicas adequadas têm sido uma fonte de insatisfação para os usuários. As reclamações incluem tanto os ruídos perturbadores (ex.: telefone tocando, conversas paralelas e ruídos de equipamentos) quanto a falta de privacidade da fala (HONGISTO *et al.*, 2016; HAAPAKANGAS *et al.*, 2017; PARK *et al.*, 2020). O incômodo das pessoas com o ruído ambiente está relacionado diretamente com a capacidade das mesmas em controlar seu espaço de trabalho e com o nível de privacidade (PIERRETTE *et al.*, 2015; HONGISTO *et al.*, 2016; HARVIE-CLARK *et al.*, 2019; PARK *et al.*, 2020). A privacidade e o conforto acústico em um ambiente de trabalho compartilhado podem ser alcançados apenas quando um conjunto de elementos, que cumprem funções distintas e complementares, estão presentes e devidamente implementados (LONG, 2014).

Pesquisas comprovam que escritórios de planta livre que não contam com divisórias acústicas parciais apresentam baixas taxas de decaimento espacial do nível sonoro da fala, resultando em ambientes muito ruidosos e permitindo que as conversas paralelas sejam percebidas com alto nível de inteligibilidade, comprometendo a concentração e a sensação de privacidade acústica dos trabalhadores (WENMAEKERS *et al.*, 2019; HAAPAKANGAS *et al.*, 2017; RINDEL, 2018; KERÄNEN *et al.*, 2020). Portanto, caracterizar e avaliar a eficiência de elementos como as divisórias acústicas parciais a fim de aprofundar o conhecimento sobre sua influência no condicionamento acústico de salas se mostra fundamental para qualificação dos projetos arquitetônicos de escritórios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica da presente pesquisa foi organizada em 3 seções. A primeira seção contém conceitos fundamentais relacionados a propagação do som em ambientes fechados, destacando as principais fontes de ruído e a problemática associada ao condicionamento acústico de escritórios.

Na segunda seção são apresentadas diretrizes para projetos acústicos de escritórios, contemplando as principais soluções arquitetônicas adotadas para o tratamento acústico desses ambientes, a caracterização de divisórias acústicas parciais e uma breve introdução de aspectos relevantes relacionados ao uso de sistemas eletroacústicos de mascaramento sonoro.

Por fim, na terceira seção estão descritos os parâmetros e descritores utilizados para avaliação da qualidade acústica de escritórios de planta livre, incluindo valores referenciais estabelecidos por norma e resultados de estudos de caso que relacionam os descritores com diferentes soluções arquitetônicas.

2.1 Princípios de propagação do som em escritórios

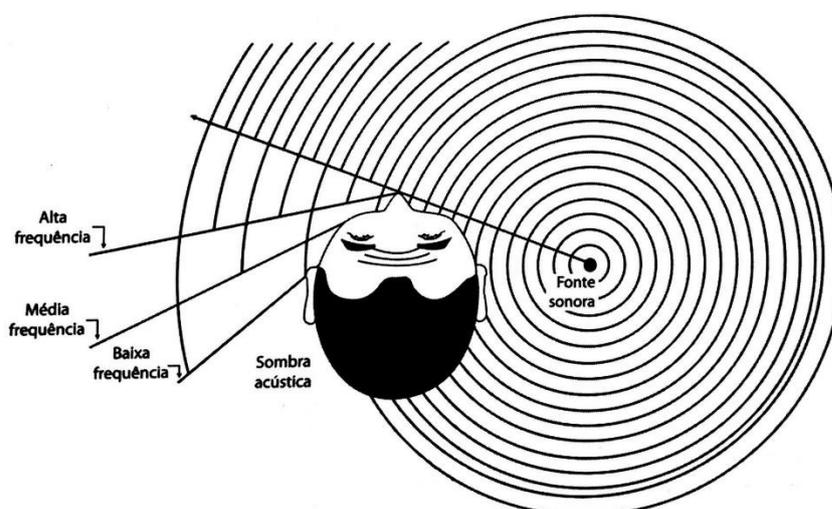
Ao emitir um sinal acústico impulsivo no interior de um recinto fechado, ondas sonoras complexas se propagam pelo ar em várias direções, refletem nas superfícies da sala (piso, paredes e teto), e vão reduzindo gradativamente sua intensidade ao longo do tempo até se tornarem inaudíveis. A persistência da energia sonora no interior do recinto após o impulso devido às múltiplas reflexões provocadas pelas superfícies constitui o fenômeno denominado reverberação. Esse fenômeno é quantificado através de um parâmetro acústico objetivo chamado tempo de reverberação (TR) que representa o tempo necessário, em segundos, para que haja um decaimento de 60 dB do nível de pressão sonora após o impulso sonoro (EGAN, 1988; KUTRUFF, 2017).

A energia das ondas sonoras que se propagam em campo livre é atenuada pela capacidade de absorção sonora do ar. Ao incidir sobre um obstáculo (superfícies da sala ou objetos), as ondas sonoras provocam a vibração do mesmo e tem uma parcela da sua energia incidente refletida de volta para o ambiente e outra absorvida. A energia absorvida é parcialmente dissipada sob a forma de energia mecânica ou

calorífica conforme as propriedades acústicas do material de revestimento e parcialmente transmitida para o lado oposto da superfície incidente na forma de som aéreo (COX; D'ANTONIO, 2016; BISTAFSA, 2018).

Em casos em que as ondas sonoras incidem sobre objetos finitos como divisórias de altura parcial, além da energia sonora incidente ser parcialmente refletida e absorvida, também ocorre a transmissão em torno do objeto devido ao fenômeno da difração sonora. O efeito da difração gera a atenuação da energia sonora no lado oposto à superfície incidente e a área afetada por essa atenuação é denominada sombra acústica. O que define a intensidade da energia sonora que irá se propagar atrás do objeto depende da relação entre o comprimento da onda incidente e as dimensões do objeto. Quanto menor for o comprimento da onda sonora em relação às dimensões do objeto, ou seja, quanto mais alta for a frequência do som emitido, maior será a área de sombra acústica. A Figura 1 ilustra um exemplo da área de sombra acústica gerada pelo fenômeno de difração em torno da cabeça (GERGES, 1992; BARRON, 2010; LONG, 2014; BISTAFSA, 2018).

Figura 1 – Sombra acústica gerada pelo fenômeno de difração na cabeça



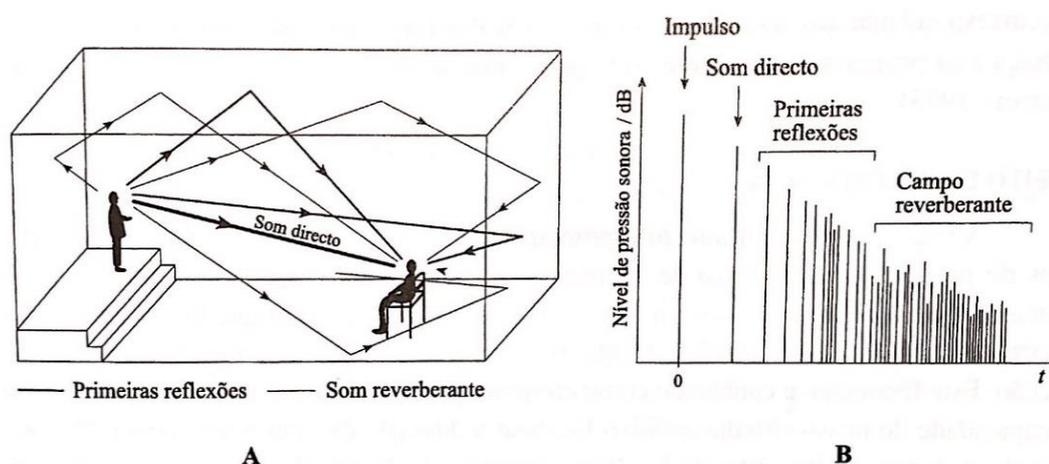
Fonte: Bistafa (2018, p. 83)

A percepção de um ouvinte posicionado a uma determinada distância de uma fonte sonora é determinada pela soma do som direto com a energia sonora residual que permanece no ambiente após a excitação sonora e que pode ser dividida entre as primeiras reflexões e o campo reverberante. O som direto é caracterizado pela energia sonora que se propaga em campo livre da fonte emissora diretamente até o ouvinte, ou seja, sem refletir em nenhuma superfície da sala. As primeiras reflexões

são proporcionadas por superfícies próximas à fonte ou ao ouvinte e são captadas em um curto período após o som direto. A parcela da energia sonora que chega ao ouvinte de forma tardia é caracterizada como campo reverberante (BERANEK, 2004; HENRIQUE, 2007; BRANDÃO, 2016; KUTRUFF, 2017).

A Figura 2 apresenta um desenho esquemático que representa como ocorre a propagação do som de um interlocutor até um ouvinte em um recinto fechado (a) e um reflectograma indicando a relação do nível de pressão sonora das múltiplas reflexões de um impulso sonoro com o tempo (b).

Figura 2 – Propagação do som em recintos fechados

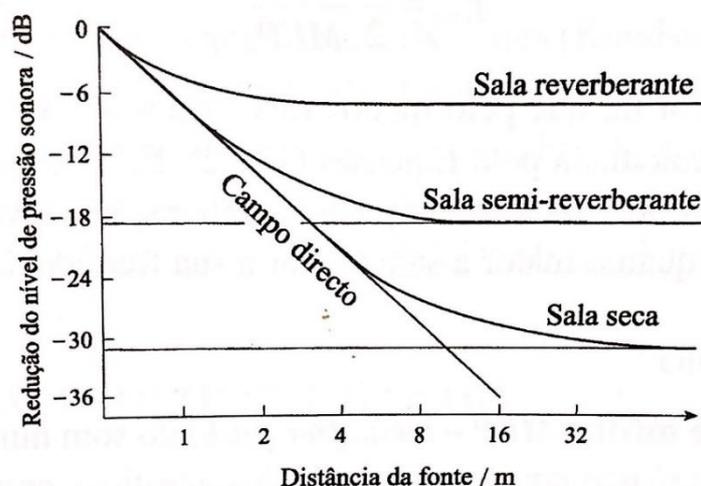


Fonte: Henrique (2007, p. 787)

O som direto perde intensidade conforme aumenta a distância entre a fonte e o receptor devido à absorção sonora do ar. Por chegarem ao ouvinte em um curto período após o impulso sonoro, as primeiras reflexões podem ser captadas de forma inteligível e podem servir de apoio ao som direto, enquanto as reflexões tardias que compõem o campo reverberante são captadas com pouca definição, prejudicando a inteligibilidade do som (BARRON, 2010; ROSSING, 2014). Portanto, quanto maior for a distância entre a fonte e o receptor, maior será a influência da reverberação da sala na inteligibilidade do som captado pelo ouvinte, pois o som reverberante passará a mascarar o som direto (HENRIQUE, 2007; FUCHS, 2013).

A Figura 3 demonstra a relação do som direto com o campo reverberante em três tipos de sala. É possível perceber que em uma sala com baixo tempo de reverberação (sala seca), o som direto pode ser captado de forma mais inteligível em distâncias maiores da fonte em relação a uma sala reverberante.

Figura 3 – Relação entre campo direto e campo reverberante de uma sala



Fonte: Henrique (2007, p. 786)

Cada ambiente é projetado com características únicas que irão determinar como o som irá se propagar em seu interior, como suas dimensões, volume, forma geométrica e materiais de acabamento (BRANDÃO, 2016; KUTRUFF, 2017). Quanto maior for o volume da sala e mais reflexivas forem as suas superfícies, mais longo será o tempo de reverberação. O controle do tempo de reverberação é realizado através da aplicação de materiais que proporcionem absorção sonora nas superfícies da sala, reduzindo a intensidade das reflexões sonoras e o volume do campo reverberante (EGAN, 1988; COX; D'ANTONIO, 2016; BISTAFA, 2018).

O objetivo de um projeto de condicionamento acústico é otimizar as características da sala para que a distribuição do som seja adequada à realização das atividades praticadas no espaço. Para isso, é fundamental identificar quais tipos de sinais acústicos serão executados, visando enaltecer os sons desejáveis e atenuar os indesejáveis (BRANDÃO, 2016).

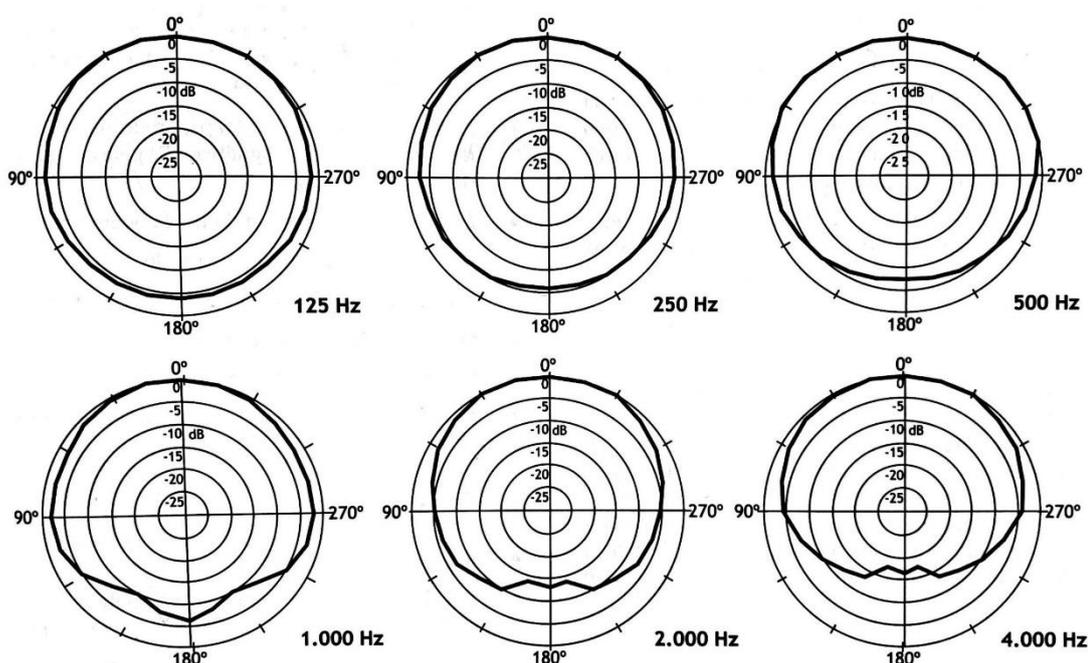
Sons indesejáveis que produzem sensações de conotação negativa são denominados ruídos. Portanto, a definição de ruído depende do contexto, pois está ligada ao julgamento de utilidade do som (OSELAND *et al.*, 2015; BISTAFA, 2018). Em salas de aula, por exemplo, onde a principal fonte sonora é a voz de um professor direcionada a um grupo de ouvintes, a fala é um som desejável que demanda um alto nível de inteligibilidade para que a mensagem sonora seja claramente compreendida (LONG, 2014; BRANDÃO, 2016). Em escritórios, cada usuário pode ser considerado um interlocutor isolado e nem sempre os sons emitidos são desejáveis para os colegas

de trabalho, pois podem não ter ligação com a atividade que está sendo desenvolvida. Nesses casos, o som da voz humana é percebido como ruído e, ao ser transmitido de forma inteligível, pode prejudicar tanto a sensação de privacidade do interlocutor quanto a concentração e o desempenho cognitivo dos colegas de trabalho (FUCHS, 2013; BISTAFA, 2018).

Segundo Hongisto (2005), o efeito da fala pode ser percebido em dois mecanismos que reduzem o desempenho cognitivo: reação de orientação, que ocorre quando uma fala repentina é emitida após um momento de silêncio; e sobreposição com o processamento cognitivo, que ocorre quando a pessoa assimila o conteúdo da mensagem sonora emitida por um colega de trabalho. O primeiro está relacionado à percepção da origem do som, do posicionamento e características da fonte sonora e seu efeito é de curta duração após a fala. O segundo está relacionado à inteligibilidade da mensagem falada e seu efeito é mais duradouro, sendo mais prejudicial para o desempenho cognitivo. A reação de orientação não pode ser eliminada, mas a sobreposição com o processamento cognitivo pode ser atenuada através da redução do nível de inteligibilidade da fala, diminuindo as chances de a mensagem sonora indesejada interferir na atividade cognitiva e prejudicar a concentração e o desempenho dos trabalhadores.

A voz humana é uma fonte direcional que projeta a maior parcela da energia sonora do eixo da cabeça para frente, espalhando-se no eixo horizontal para direita e para esquerda e no eixo vertical para cima e para baixo. A diferença entre o nível de pressão sonora medido na frente e atrás de um locutor é significativa, principalmente nas frequências acima de 500 Hz, conforme ilustram os diagramas polares da Figura 4 (LONG, 2014; BISTAFA, 2018).

Figura 4 – Diagramas polares de índices de diretividade da voz humana em bandas de oitava



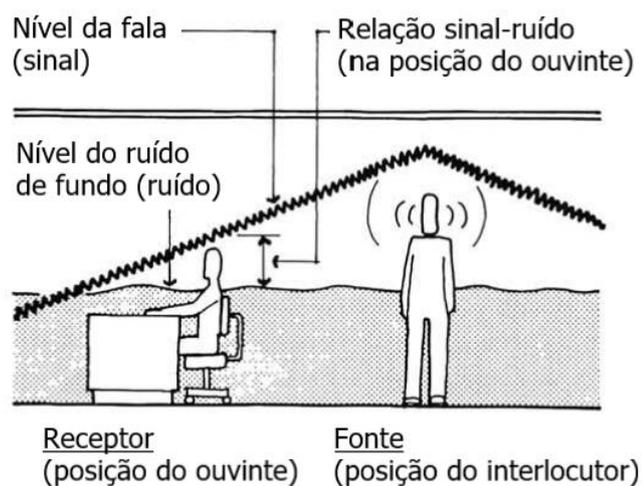
Fonte: Bistafa (2018, p. 159)

O som residual ou ruído de fundo em escritórios é comumente produzido por sistemas de climatização e ventilação, telefones, impressoras, máquinas de café, computadores, entre outros elementos típicos de escritórios. Porém, por ser a principal fonte causadora de distrações, a voz humana é o sinal acústico que merece mais atenção (EGAN, 1988; TROCKA-LESZCZYNSKA *et al.*, 2021). Além do ruído produzido em conversas paralelas, o tráfego de pessoas nos corredores, o arrastar de cadeiras e móveis e o toque do telefone, por exemplo, também podem contribuir significativamente, pois sons que variam em amplitude e composição espectral ao longo do tempo tendem a causar mais interrupções e, conseqüentemente, exigem maior esforço dos profissionais para manter a concentração. Sons estáveis e previsíveis, como o ruído dos sistemas de climatização e ventilação, causam menos distrações porque o nível sonoro costuma ser consideravelmente inferior em comparação ao ruído das atividades humanas (HONGISTO, 2005; BISTAFA, 2018).

Portanto, a privacidade na comunicação oral e o conforto acústico dependem da relação sinal-ruído entre o nível sonoro da fala (sinal) e do ruído de fundo (ruído) (EGAN, 1988). Quanto maior for a relação sinal-ruído, isto é, quanto mais elevado for o nível de pressão sonora da fala em relação ao nível de pressão sonora do ruído de fundo, mais inteligível será o som da fala, o que compromete a sensação de

privacidade acústica do interlocutor e aumenta a dificuldade do ouvinte de manter a concentração devido à sobreposição com o processamento cognitivo (LONG, 2014). A Figura 5 representa graficamente a relação sinal-ruído em um ambiente de trabalho.

Figura 5 – Relação sinal-ruído entre o nível de pressão sonora da fala (sinal) e do ruído de fundo (ruído)



Fonte: Egan (1988, p. 320) – Adaptada pelo autor

Diversas pesquisas apontam que o elevado nível de ruído e a falta de privacidade acústica estão entre os problemas ambientais mais sérios em ambientes de trabalho compartilhados (SEDDIGH *et al.*, 2015; PIERRETTE *et al.*, 2015; HONGISTO *et al.*, 2016; HAAPAKANGAS *et al.*, 2017; PARK, *et al.*, 2020). O controle da reverberação é fundamental para preservação da qualidade acústica desses espaços, pois limita o nível de ruído geral na sala e melhora as condições de trabalho e comunicação entre funcionários (TROCKA-LESZCZYNSKA *et al.*, 2021). No entanto, a combinação de baixo nível de ruído de fundo, baixo tempo de reverberação e, conseqüentemente, alto nível de inteligibilidade da fala pode levar à falta de privacidade acústica e provocar distrações por conversas paralelas (LONG, 2014). O controle da relação sinal-ruído em escritórios pode ser realizado através de uma combinação de fatores que influenciam a propagação espacial do som e a inteligibilidade da fala, conforme esquema apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fatores influentes no controle da relação sinal-ruído em escritórios

$$\left[\begin{array}{c} \text{Nível} \\ \text{sonoro} \\ \text{da fonte} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Atenuação} \\ \text{do som} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Nível sonoro} \\ \text{de} \\ \text{mascaramento} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Relação} \\ \text{sinal-ruído} \\ \text{(privacidade)} \end{array} \right]$$

Fonte: Long (2014, p. 598) – Adaptada pelo autor

Para que se alcance a privacidade acústica desejada, a relação sinal-ruído pode ser influenciada pelo controle da fonte sonora, pela atenuação do som entre estações de trabalho e pelo controle do nível do ruído de fundo. A fonte sonora pode ser controlada através do seu posicionamento, com o aumento das distâncias entre as pessoas e a orientação das mesas e cadeiras de forma a aproveitar a diretividade¹ natural da voz humana. A atenuação do som direto entre as estações de trabalho pode ser proporcionada por divisórias de altura total ou parcial (escritórios compartimentados e escritórios de planta livre, respectivamente) e as reflexões podem ser atenuadas com aplicação de materiais fonoabsorventes nas superfícies da sala. Por último, o nível do ruído de fundo pode ser controlado através de um sistema eletroacústico de mascaramento do som para ajudar a reduzir a inteligibilidade da fala intrusiva. Os detalhes de cada um desses recursos dependem da configuração do escritório e de outras considerações de projeto (LONG, 2014; ROSSING, 2014; EGAN, 1988).

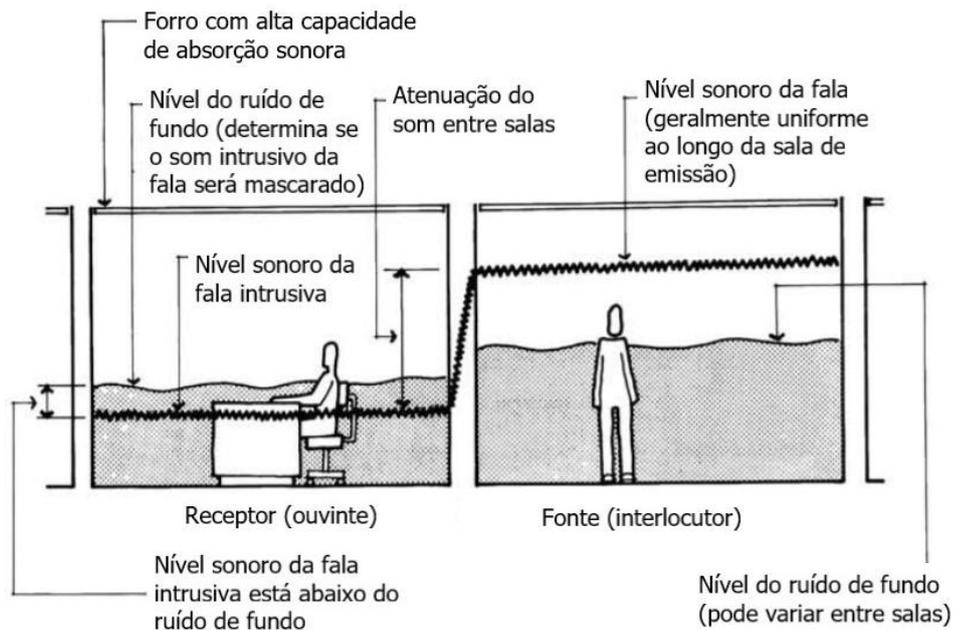
Os escritórios são classificados a partir do seu layout. Convencionalmente, os escritórios compartimentados são caracterizados por designar uma sala isolada por pessoa ou por equipes (geralmente formadas por duas a cinco pessoas, dependendo do tipo de trabalho) e os escritórios de planta livre se organizam em um único espaço aberto, com cinco ou mais pessoas posicionadas em estações de trabalho distribuídas no ambiente (HONGISTO *et al.*, 2016; ISO, 2021).

Diferentemente dos escritórios compartimentados onde a transmissão dos ruídos é predominantemente indireta e limitada conforme a capacidade de isolamento acústico dos sistemas de vedação (paredes, forro, portas e janelas) que dividem os espaços de trabalho, em escritórios de planta livre o som chega aos receptores de forma direta, somado à parcela de difração sonora que ocorre sobre e ao redor das divisórias de altura parcial e do mobiliário e às reflexões sonoras que ocorrem em

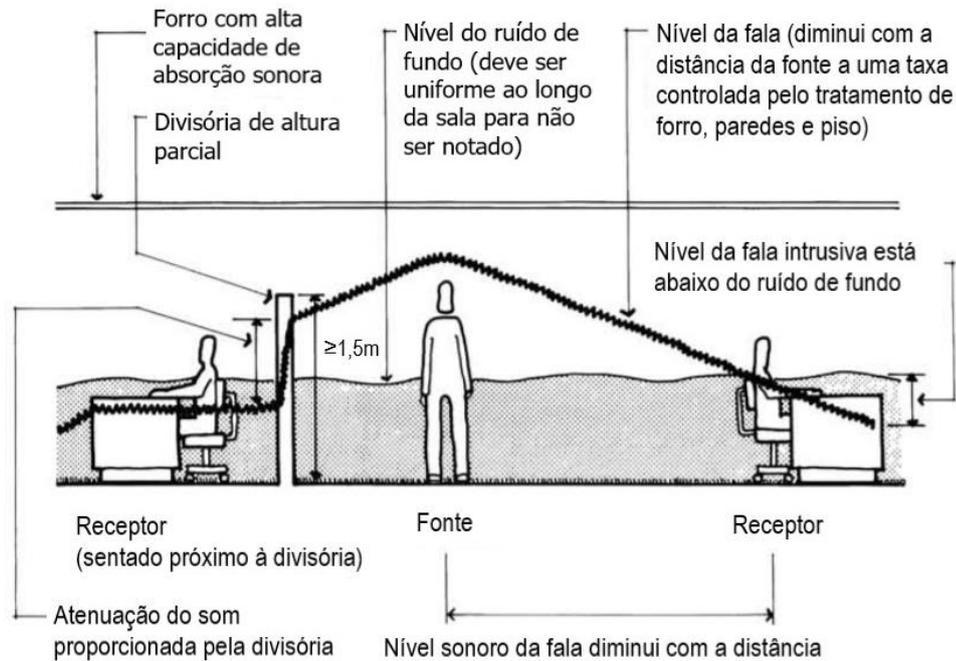
¹ O termo diretividade é utilizado por Bistafa (2018), enquanto Brandão (2016) utiliza o termo direcionalidade para expressar como a energia sonora radiada pela fonte é distribuída no espaço.

superfícies internas como paredes, piso, forro e mobiliário (EGAN, 1988). A Figura 7 ilustra os meios de atenuação sonora da fala em escritórios compartimentados (a) e em escritórios de planta livre (b).

Figura 7 – Meios de atenuação sonora em escritórios compartimentados (a) e em escritórios de planta livre (b)



(a)



(b)

Fonte: Egan (1988, p. 324) – Adaptada pelo autor

Devido a essas diferenças, um nível de privacidade confidencial, em que nenhuma parte de uma conversa possa ser compreendida no ambiente adjacente, não pode ser esperado em escritórios de planta livre, pois exige que o espaço seja isolado por um sistema de vedação que proporcione elevada atenuação sonora como nos escritórios compartimentados. Para alcançar um nível adequado de privacidade da fala em um escritório de planta livre, deve-se encontrar um equilíbrio entre a capacidade de atenuação sonora das divisórias de altura parcial e um nível de ruído de fundo mais elevado, alcançado muitas vezes com o uso de um sistema eletroacústico de mascaramento do som (ROSSING, 2014).

2.2 Projeto acústico de escritórios

2.2.1 Parâmetros do projeto arquitetônico em escritórios de planta livre

A acústica em escritórios é influenciada diretamente pelas características do ambiente (como suas dimensões, volume, forma geométrica e materiais de revestimento) e pelos elementos de mobiliário (WENMAEKERS *et al.*, 2019). Portanto, é fundamental enfatizar a influência do planejamento arquitetônico na qualidade acústica de escritórios (RIBEIRO, 2018; TROCKA-LESZCZYNSKA *et al.*, 2021).

Os layouts de escritórios de planta livre são adotados por empresas de diversos setores devido a uma série de motivos. A necessidade de espaço por pessoa é consideravelmente menor do que em escritórios convencionais, levando a economias significativas de implementação. As modificações de layout também são mais acessíveis e fáceis de realizar, possibilitando a reorganização das estações de trabalho para atender às possíveis mudanças de grupos e departamentos. Do ponto de vista do proprietário do edifício, o escritório de planta livre é mais fácil de alugar devido à ausência de divisórias fixas. Os argumentos econômicos para a escolha de um escritório de planta livre são geralmente abordados enfatizando as características positivas esperadas para esses escritórios, como espaço mais amplo, custos reduzidos com iluminação e climatização, acesso mais eficaz à luz natural, design arquitetônico moderno, comunicação e relacionamentos aprimorados, melhor fluxo de informações, maior senso de envolvimento no trabalho e distâncias mais curtas para espaços comuns (HONGISTO, 2005; ROSSING, 2014; PARK *et al.*, 2020).

Seguindo o aspecto financeiro e as tendências contemporâneas de estilo minimalista na arquitetura de interiores, os escritórios de planta livre são frequentemente privados de revestimentos porosos e elementos que proporcionam um nível significativo de absorção sonora como: estofamento de móveis, cortinas, revestimentos de parede ou soluções de forro mais avançadas. As paredes são simplesmente rebocadas e pintadas. O mesmo acontece no teto, pois muitas vezes não é instalado algum tipo de forro, deixando a superfície da laje superior aparente, ou é instalado um forro convencional com acabamento liso e reflexivo. Além disso, as divisórias estão cada vez mais baixas e as estações de trabalho menores e por vezes compartilhadas, reduzindo as distâncias entre funcionários. As salas dispostas nesse modelo, em que há predominância de superfícies acusticamente reflexivas, proporcionam ambientes com tempo de reverberação excessivamente longo e, conseqüentemente, um nível de ruído elevado, impactando negativamente a saúde humana, eficiência no trabalho e conforto geral dos usuários (RIBEIRO, 2018; TROCKA-LESZCZYNSKA *et al.*, 2021).

Ao realizar o projeto acústico de um escritório, é importante reconhecer que empresários e investidores precisam de uma estimativa da rentabilidade dos investimentos para tomada de decisões. Se a implementação de soluções voltadas para o condicionamento acústico do escritório pode gerar um aumento na produtividade dos funcionários, é esperado também que esse investimento proporcione um maior retorno financeiro para a empresa (HONGISTO, 2005; FUCHS, 2013). De acordo com a pesquisa realizada por Kemppainen *et al.* (2018), os custos para a construção de um escritório com boas condições acústicas podem de fato ser consideravelmente mais elevados em comparação a um escritório que atende apenas os requisitos mínimos. Porém, os autores afirmam que, com o passar do tempo, a diminuição da produtividade dos funcionários associada à baixa qualidade acústica pode trazer prejuízos econômicos para a empresa. Em poucos anos, o custo associado à baixa produtividade pode ser significativamente maior que o custo de implementação de soluções acústicas adequadas.

Estudos têm demonstrado que o modelo de escritório de planta livre tem impactos negativos sobre os funcionários em vários aspectos, em especial quanto à preservação da privacidade e do conforto acústico (HONGISTO *et al.*, 2016; KOSTALLARI *et al.*, 2020; PARK *et al.*, 2020). Ao contrário do argumento original de que o escritório de planta livre promove eficiência na comunicação entre colegas de

trabalho, pesquisadores relataram que os funcionários tendem a sentir que tais escritórios inibem conversas confidenciais devido à falta de privacidade acústica e comprometem o desempenho no trabalho devido às distrações causadas por conversas entre colegas e telefonemas (KIM *et al.*, 2013; PIERRETTE *et al.*, 2015; DI BLASIO *et al.*, 2019; KOSTALLARI *et al.*, 2020).

Os requisitos acústicos para usuários de um escritório são fortemente dependentes do tipo de atividade a ser exercida e não podem ser determinados de forma realista sem compreender como as pessoas operam no espaço de trabalho. Portanto, é importante que sejam levados em consideração os hábitos de trabalho dos funcionários, suas demandas por espaço e ergonomia e as características culturais da empresa (OSELAND *et al.*, 2015; HARVIE-CLARK *et al.*, 2019).

As premissas básicas em um projeto de condicionamento acústico de escritórios são: preservar a privacidade acústica, ou seja, a capacidade de falar sem que as conversas possam ser compreendidas pelos colegas; atenuar ao máximo as distrações causadas por ruídos (especialmente de conversas paralelas); proporcionar conforto acústico para melhorar as condições de comunicação entre colegas de trabalho e por telefone (EGAN, 1988).

Algumas estratégias de projeto dedicadas a melhorar as condições de comunicação entre colegas de trabalho podem interferir negativamente na privacidade acústica, pois o nível de inteligibilidade da fala almejado para essas premissas é divergente. As áreas ruidosas e as áreas sensíveis ao ruído devem estar distantes entre si e devidamente isoladas. Portanto, é importante que o layout dos escritórios de planta livre contemple espaços isolados por sistemas de vedação com alta capacidade de atenuação sonora para atividades ocasionais que exigem um nível elevado de privacidade e que podem interferir na concentração do restante dos funcionários, como reuniões, telefonemas particulares, videoconferências e momentos de descontração e descanso (ROSSING, 2014; HONGISTO *et al.*, 2016; RIBEIRO, 2018; HARVIE-CLARK *et al.*, 2019).

Em salas de reuniões, videoconferências e espaços de descontração e descanso, o foco principal é proporcionar conforto acústico e boas condições de comunicação, ou seja, baixo tempo de reverberação e alta inteligibilidade da fala. Já nos espaços compartilhados de planta livre que abrigam funcionários de diferentes setores da empresa, o objetivo é garantir um nível adequado de privacidade acústica

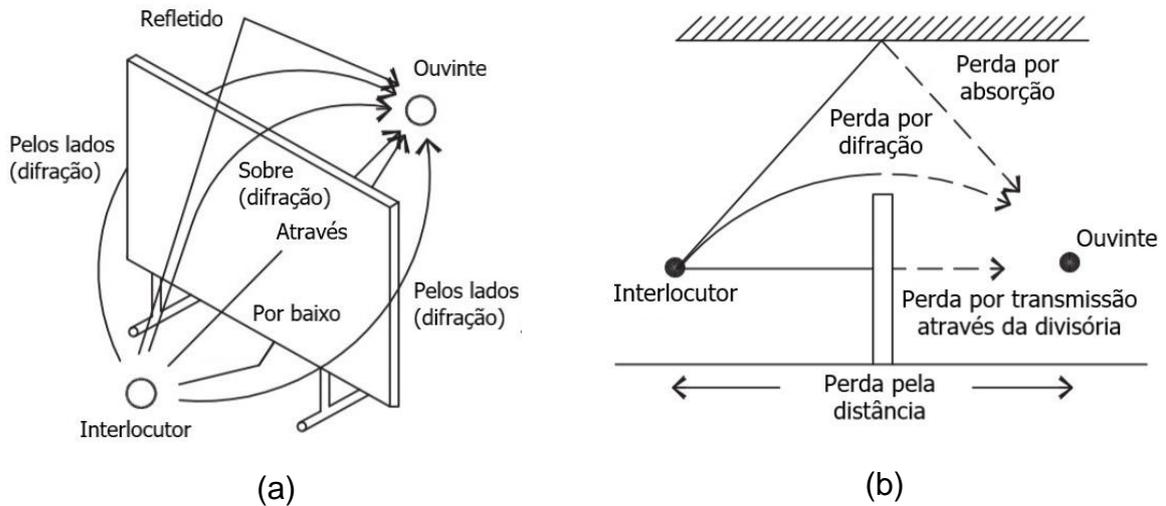
entre as estações de trabalho, ou seja, baixa inteligibilidade da fala (LONG, 2014; RIBEIRO, 2018).

A privacidade da fala em um escritório de planta livre pode ser alcançada quando um conjunto de elementos, que cumprem funções distintas e complementares, estão presentes e devidamente implementados. Esse conjunto inclui: um arranjo cuidadoso dos móveis e ocupantes, incluindo a orientação de interlocutores e ouvintes; divisórias de altura parcial com as configurações e localizações adequadas; forro com alta capacidade de absorção sonora e revestimentos fonoabsorventes nas paredes, principalmente próximas às fontes ruidosas; sistema eletroacústico de mascaramento do som com o conteúdo e nível espectral adequados (LONG, 2014; HONGISTO *et al.* 2016; KERÄNEN *et al.*, 2020). Portanto, conforme afirmam Trocka-Leszczynska *et al.* (2021), é fundamental resolver adequadamente tetos, paredes e pisos na etapa inicial do projeto, antes de planejar a introdução de materiais absorventes na forma de divisórias, mobiliário, acessórios e sistemas adicionais.

O uso de materiais de acabamento com elevada capacidade de absorção sonora tem como principal objetivo atenuar o efeito da reverberação na sala e a energia sonora das primeiras reflexões. Como o tempo de reverberação deve ser reduzido e as primeiras reflexões devem ser evitadas ao máximo, é necessário que a sala tenha grandes áreas de absorção (ROSSING, 2014). Porém, conforme alertam Trocka-Leszczynska e Jablonska (2021), é indispensável que sejam verificadas as propriedades de segurança contra incêndio e requisitos sanitários dos materiais fonoabsorventes para introduzi-los no projeto. É importante que seja levada em consideração a rotina de higienização, principalmente das áreas de circulação, para que os materiais especificados atendam aos requisitos acústicos sem comprometer a limpeza do ambiente.

A aplicação dos materiais fonoabsorventes deve ser realizada prioritariamente em superfícies que promovem a reflexão do som pelos flancos das divisórias parciais, como o teto, as paredes e em alguns casos o piso (LONG, 2014; ROSSING, 2014). A Figura 8 demonstra de forma esquemática como o som é transmitido pelos flancos de uma divisória parcial (a) e como ocorre a perda de energia sonora da fala (b).

Figura 8 – Transmissão do som pelos flancos de uma divisória parcial

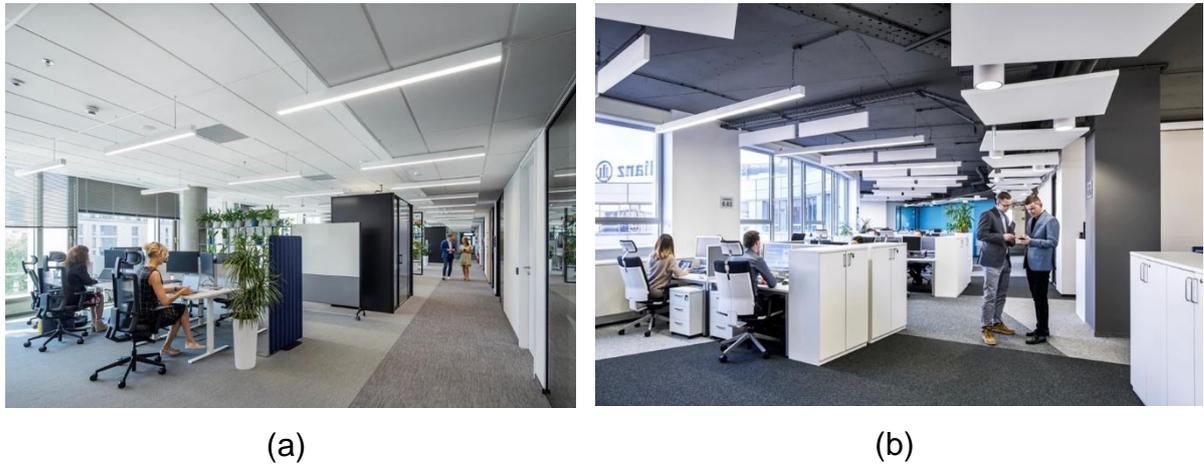


Fonte: Long (2014, p. 599, 605) – Adaptada pelo autor

Como pode ser visto na Figura 8, a energia sonora refletida no teto sobre a divisória de altura parcial realça o som emitido e prejudica de forma significativa a capacidade já limitada de atenuação sonora das divisórias. O mesmo acontece com outras superfícies que estejam próximas às estações de trabalho e possibilitem que o som seja refletido entre a posição do interlocutor e do ouvinte (LONG, 2014; ROSSING, 2014).

O teto é a superfície mais crítica em escritórios de planta livre, pois geralmente representa a maior área superficial e é a superfície mais exposta aos ruídos em geral. Portanto, deve ser tratado com a maior capacidade de absorção sonora possível (LONG, 2014; KERÄNEN *et al.*, 2020). Como a voz humana é a principal fonte sonora, os materiais escolhidos para o tratamento do teto devem apresentar elevados coeficientes de absorção na faixa de frequências que mais contribui para a inteligibilidade da fala, entre 250 Hz e 4000 Hz. A absorção sonora no teto pode ser promovida através de forros planos (forros de materiais porosos, placas perfuradas e microperfuradas, entre outros) ou através de painéis suspensos (*baffles* e nuvens) (EGAN, 1988; ROSSING, 2014; RIBEIRO, 2018). A Figura 9 (a) ilustra um escritório em que o tratamento da superfície do teto foi promovido por um forro plano composto por material fonoabsorvente e a Figura 9 (b) ilustra um exemplo da instalação de painéis suspensos de material fonoabsorvente posicionados na vertical (*baffles*) sobre as estações de trabalho e na horizontal (nuvens) sobre o corredor.

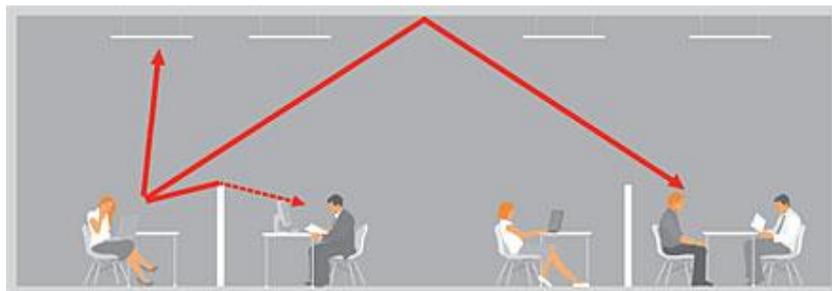
Figura 9 – Exemplos de tratamento do teto com absorção sonora promovida por forro plano (a) e painéis suspensos (b)



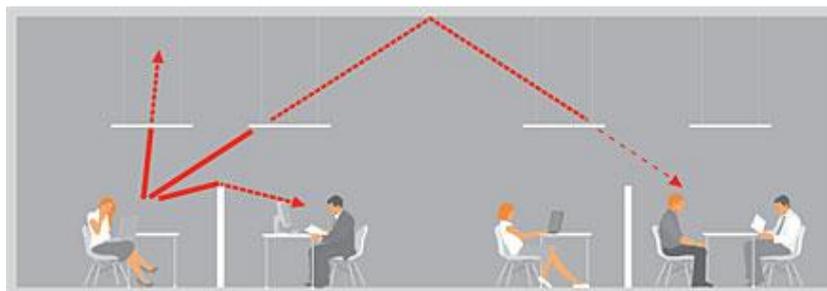
Fonte: Ecophon (2022)

Os painéis suspensos podem proporcionar uma área maior de absorção por área de superfície do teto em relação aos forros planos devido à maior área de exposição ao campo sonoro do material fonoabsorvente. Para isso, é importante posicioná-los na menor altura possível em relação ao chão que os requisitos ergonômicos e outras definições de projeto permitirem. No caso das nuvens, a área de absorção e, conseqüentemente, a eficiência desses elementos aumenta quando a face voltada para o teto é exposta ao campo sonoro (BARROS *et al.*, 2018; ISO, 2021; KLIPPEL, 2021). A Figura 10 representa de forma esquemática o caminho de propagação do som em um escritório com a instalação alta (a) e baixa (b) de nuvens acústicas. A partir dessa representação, é possível verificar o aumento da eficiência do sistema na segunda opção em que som é atenuado (linha tracejada) por ambas as faces das nuvens.

Figura 10 – Representação esquemática da propagação do som em um escritório com instalação alta (a) e baixa (b) de nuvens acústicas



(a)



(b)

Fonte: Ecophon (2022)

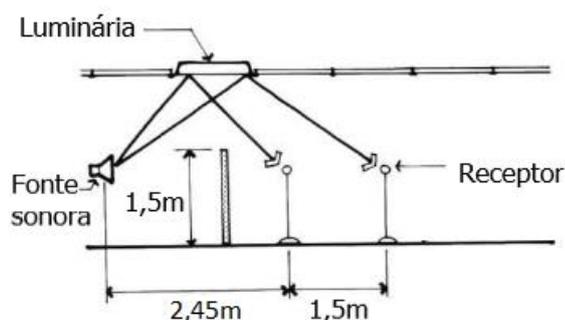
Os *baffles*, por estarem posicionados no sentido vertical, podem ser posicionados de forma estratégica para bloquear os principais ângulos de incidência da fala sobre as estações de trabalho, funcionando como barreiras para que o som não se espalhe ao longo do escritório, elevando o decaimento espacial do som (EGAN, 1988). Segundo Klippel Filho (2021), é importante que o espaçamento entre os *baffles* seja superior à sua altura para aumentar a área de exposição do material e a eficiência do sistema. O autor comprovou através de ensaios em laboratório que com o espaçamento adequado entre *baffles*, é possível aumentar a capacidade de absorção sonora do sistema e reduzir a quantidade de material por área de teto.

Os painéis suspensos também podem ser atrativos por outros motivos que vão além da sua eficiência acústica, como a flexibilidade de instalação (posicionamento, altura, sobreposições) e a diversidade de formas geométricas, dimensões e cores que permitem que o projetista explore diferentes padrões estéticos e crie métodos particulares de compatibilização dos elementos de iluminação, climatização, entre outros, de acordo com as demandas e o caráter de cada projeto (BARROS *et al.*, 2018; SOUZA, 2020).

Em forros planos, a espessura da camada de ar entre a superfície da laje e do forro influencia diretamente nos coeficientes de absorção do sistema. Se o forro for composto por material poroso, quanto maior for a camada de ar, maior será a absorção nas médias e baixas frequências. Já se o forro for de placa perfurada, os coeficientes de absorção dependerão, além da espessura da camada de ar, de outros fatores como a razão de área perfurada, o padrão de perfuração adotado (diâmetro e espaçamento entre os furos), a presença de material poroso sobre a placa e a espessura da placa. Portanto, é importante observar as especificações do forro para que a absorção seja efetiva na faixa de frequências desejada (COX; D'ANTONIO, 2016; BRANDÃO, 2016; BISTAFA, 2018).

Outra preocupação na instalação de forros planos gira em torno do posicionamento das luminárias, pois elas podem gerar áreas de reflexão do som (ROSSING, 2014). A Figura 11 demonstra o posicionamento inadequado de uma luminária gerando reflexões sonoras no teto direcionadas à posição do receptor.

Figura 11 – Reflexões sonoras no teto provocadas por luminária reflexiva



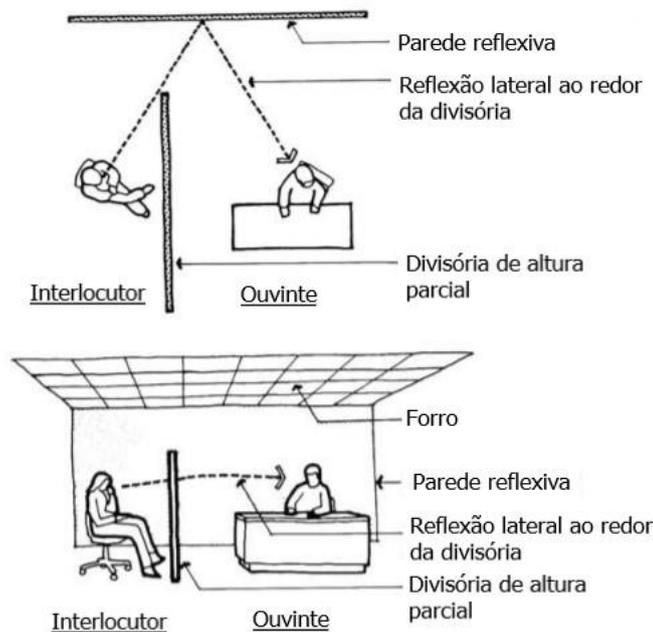
Fonte: Egan (1988, p. 341) – Adaptada pelo autor

Luminárias não devem ser instaladas em posições onde possam provocar reflexões sonoras que comprometam o efeito da absorção sonora do forro. Se uma luminária plana e reflexiva for posicionada entre estações de trabalho, como no exemplo da Figura 11, o nível de inteligibilidade do som na estação de trabalho adjacente pode ser elevado. Portanto, luminárias que proporcionam áreas de reflexão sonora devem ser instaladas somente em corredores e áreas de circulação onde o som refletido não seja direcionado para as estações de trabalho. Como solução, recomenda-se o uso de iluminação integrada ao mobiliário das estações de trabalho para uso exclusivo de cada funcionário e um forro com alto nível de reflexão da luz para proporcionar uma iluminação ambiente indireta refletida no teto (EGAN, 1988; LONG, 2014; HONGISTO *et al.*, 2016).

Outra consideração importante sobre o teto é a influência da altura do pé direito. Quanto menor for a altura do pé direito, menor será o caminho percorrido pelas ondas sonoras da fonte até o receptor, tornando necessária a instalação de um forro com altíssima capacidade de absorção para atenuar a energia sonora refletida nessa superfície. Como a atenuação sonora da fala é obtida através da combinação da distância percorrida pelo som e da capacidade de absorção sonora da superfície refletora, é recomendado encontrar um equilíbrio entre esses dois fatores, pois uma altura de pé direito mais elevada possibilita uma escolha mais econômica dos materiais de tratamento do forro (LONG, 2014).

A instalação de revestimentos fonoabsorventes em paredes também pode exercer um papel bastante importante, principalmente em casos em que essas superfícies se encontram ao lado de equipamentos ruidosos (impressoras, máquina de café, telefone, entre outros) ou muito próximas às estações de trabalho. Nesses casos, a parede tratada com absorção sonora atenua a parcela refletida do som emitido pelos equipamentos e evita que sons indesejáveis sejam refletidos diretamente para as pessoas localizadas ao lado da parede. Os painéis fonoabsorventes colocados em superfícies refletoras devem ser longos o suficiente para cobrir toda área exposta onde o som possa refletir entre o interlocutor e ouvinte em suas respectivas estações de trabalho (ROSSING, 2014; EGAN, 1988; LONG, 2014). A Figura 12 ilustra a transmissão do ruído pela reflexão das paredes ao lado das divisórias parciais.

Figura 12 – Transmissão sonora pela reflexão das paredes ao lado das divisórias parciais

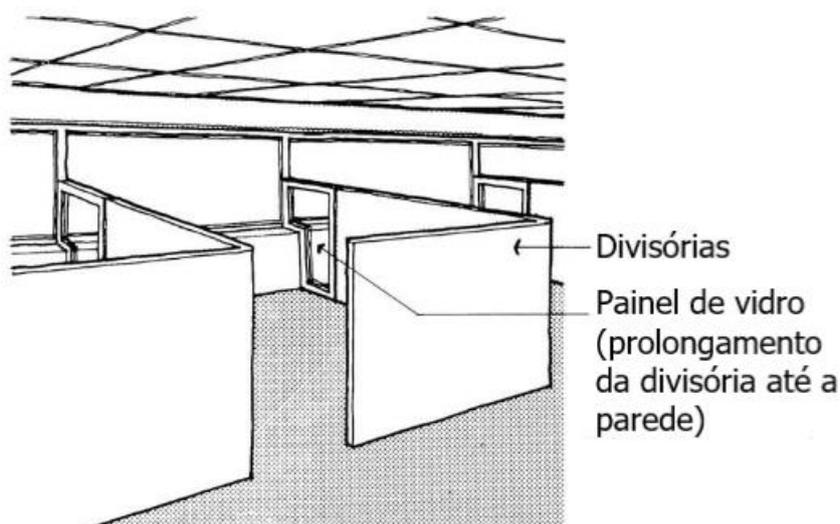


Fonte: Egan (1988, p. 342) – Adaptada pelo autor

Contudo, o tratamento das paredes com absorção sonora pode não promover a atenuação adequada, especialmente se o tipo de trabalho exercido no escritório exige um nível maior de privacidade. Além disso, há situações em que não é possível promover absorção sonora nas paredes devido à presença de mobiliário ou de janelas. No estudo realizado por Wenmaekers *et al.* (2019), foram realizadas

medições acústicas em um escritório de planta livre com diferentes configurações de divisórias parciais e propriedades de absorção sonora nas superfícies da sala visando apontar aspectos relevantes de projeto para se alcançar uma qualidade acústica adequada. Os autores afirmam que a aplicação de materiais fonoabsorventes nas paredes ao lado das estações de trabalho não proporcionou uma atenuação sonora significativa. A solução mais eficiente nesse caso foi bloquear a reflexão sonora da parede através da instalação de divisórias laterais ou do prolongamento da divisória frontal até a parede, conforme ilustra o exemplo da Figura 13.

Figura 13 – Prolongamento da divisória parcial até a parede



Fonte: Egan (1988, p. 343) – Adaptada pelo autor

É importante destacar que uma grande parcela da área das paredes nesse modelo de escritório é geralmente destinada às aberturas da edificação e acaba sendo predominantemente reflexiva, devido às propriedades acústicas do vidro. Nesses casos, intervenções como a instalação de cortinas grossas ou prolongamento das divisórias podem ser necessárias (EGAN, 1988).

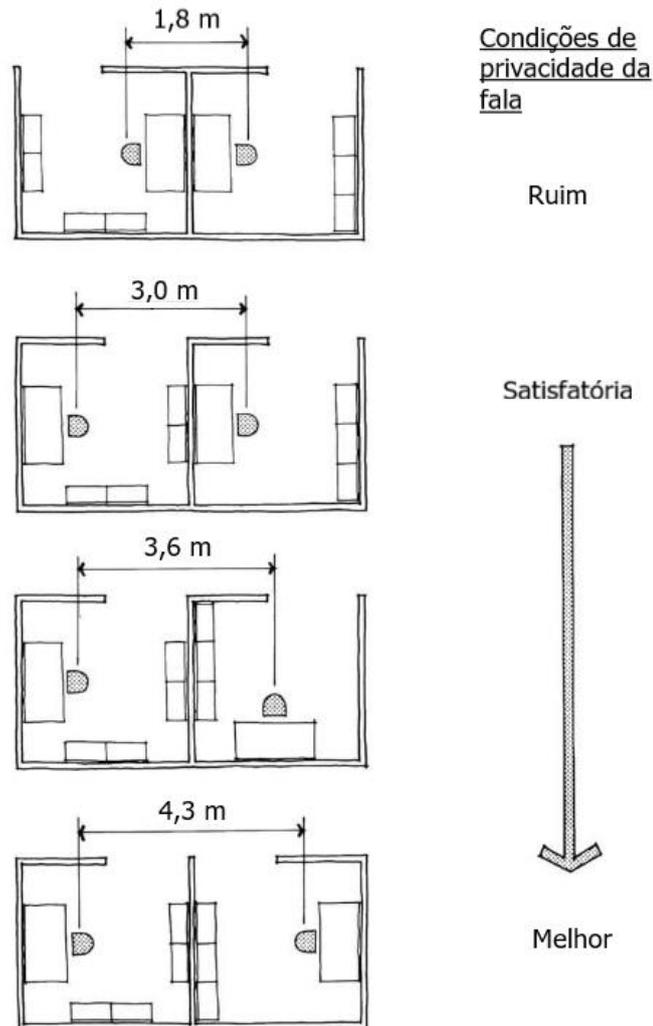
O tratamento do piso também cumpre um papel importante em escritórios de planta livre. O efeito da aplicação de material fonoabsorvente no piso (como carpete, por exemplo), pode contribuir significativamente para o controle da reverberação se as demais superfícies forem predominantemente reflexivas. Em casos em que há revestimentos com alta capacidade de absorção sonora no forro, paredes e divisórias, o efeito da absorção no piso passa a ser pouco expressivo, pois boa parte dessa superfície fica abaixo das estações de trabalho e mobiliário e as fontes sonoras

tendem a direcionar a maior parcela da energia sonora acima das mesas (LONG, 2014; KERÄNEN *et al.*, 2020).

A aplicação de carpete no piso oferece melhorias pouco significativas para a privacidade da fala quando as divisórias parciais se estendem até o chão (LONG, 2014). Quando as divisórias são instaladas somente sobre a mesa, a instalação do carpete é recomendada, pois auxilia no controle da propagação sonora por baixo das mesas (EGAN, 1988). Outra função importante do carpete é atenuar o ruído superficial causado pelo tráfego de pessoas em corredores, pela queda de objetos no chão e pelo arrastar de cadeiras e móveis (ROSSING, 2014).

As escolhas dos tratamentos dados para as superfícies da sala devem levar em consideração o layout do escritório e a disposição das estações de trabalho. Quanto maior for a distância entre os funcionários, maior será a atenuação sonora da fala e, conseqüentemente, maior será a sensação de privacidade. Além disso, a orientação em que os funcionários são posicionados é relevante devido às características direcionais da voz humana, sendo que a pior situação é quando os colegas de trabalho estão sentados frente a frente (EGAN, 1988). Portanto, conforme demonstra a Figura 14, o nível de privacidade aumenta com o aumento da distância e com a mudança de orientação das mesas e cadeiras.

Figura 14 – Exemplos de layouts para estações de trabalho visando elevar o nível de privacidade da fala



Fonte: Egan (1988, p. 349) – Adaptada pelo autor

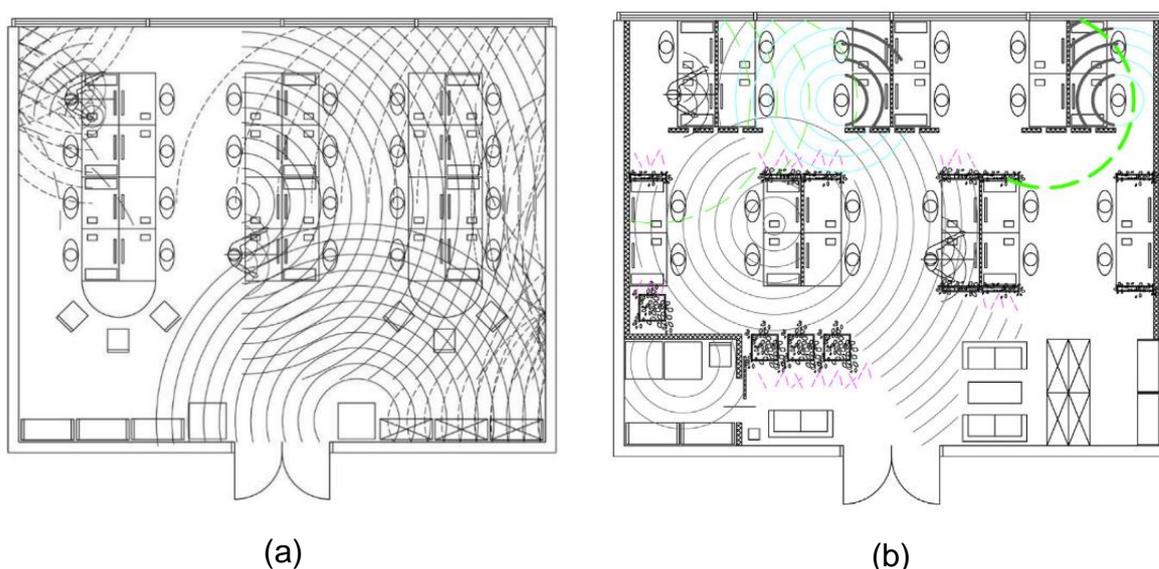
Como não é possível em todos os casos posicionar os funcionários com a orientação adequada a uma distância suficiente para que a privacidade acústica seja alcançada, a instalação de elementos que bloqueiam o caminho do som direto se torna imprescindível para essa finalidade. A introdução de divisórias de altura parcial tem como principal objetivo atenuar a transmissão do som direto, especialmente quando os usuários estão sentados de frente um para o outro, e reduzir a inteligibilidade da fala entre estações de trabalho (ROSSING, 2014; LONG, 2014).

Além das divisórias, elementos de mobiliário e ambientação podem contribuir acusticamente quando projetados e posicionados estrategicamente. Segundo Trocka-Leszczynska *et al.* (2021), elementos como estantes de livros, prateleiras com vegetação, cortinas feitas de tecidos grossos ou cortinas de feltro podem ser bastante

benéficos. Enquanto alguns desses elementos possuem características de absorção sonora, mesmo que limitadas, como cortinas e objetos feitos com materiais fibrosos ou porosos, outros elementos predominantemente reflexivos podem proporcionar a difusão das ondas sonoras pelo efeito da difração, reduzindo a intensidade do som direto.

A Figura 15 representa de forma esquemática a propagação do som em um escritório de planta livre hipotético antes (a) e depois (b) de receber intervenções de tratamento acústico.

Figura 15 – Escritório de planta livre antes (a) e depois (b) de receber tratamento acústico



Fonte: Trocka-Leszczynska *et al.* (2021) – Adaptado pelo autor

Na representação gráfica da situação hipotética proposta por Trocka-Leszczynska *et al.* (2021), as autoras apresentam exemplos de potenciais ações que podem ser realizadas para melhorar o condicionamento acústico do ambiente. As intervenções propostas incluíram a aplicação de materiais absorventes nas superfícies da sala, a redistribuição das estações de trabalho e o uso de divisórias parciais e mobiliário para atenuação da energia do som direto. É possível notar que antes de receber o tratamento acústico (Figura 15 (a)) a propagação do som na sala não é controlada, resultando em um ambiente ruidoso e altamente reverberante. Após o tratamento (Figura 15 (b)), o som se propaga com menos intensidade devido aos materiais de absorção e de forma mais difusa devido às barreiras criadas pelas divisórias e mobiliário, melhorando as condições acústicas para os usuários.

2.2.2 Divisórias acústicas parciais

Em escritórios compartimentados, o isolamento acústico entre estações de trabalho pode ser facilmente resolvido com paredes divisórias completas do piso ao teto, desde que sejam executadas com as configurações adequadas. Em escritórios de planta livre, a atenuação do som entre estações de trabalho fica limitada ao uso de dispositivos verticais que bloqueiam a propagação do som, como as divisórias de altura parcial (HONGISTO, 2005; LONG, 2014).

As divisórias são classificadas de acordo com o tipo de montagem e finalidade de uso. Conforme definições da norma ISO 20189:2018, as divisórias de mesa são “destinadas a serem montadas verticalmente nas laterais de uma mesa” e as divisórias de piso são “destinadas a ficarem verticalmente apoiadas no chão”. A Figura 16 ilustra um exemplo de aplicação de divisórias de mesa e de piso em um escritório de planta livre.

Figura 16 – Exemplo de divisórias de piso e de mesa instaladas em um escritório de planta livre



Fonte: Zilenzio (2022).

De acordo com a norma ISO 22955:2021, as divisórias de piso são “divisórias verticais com uma altura inferior à altura do teto, que dividem parcialmente o espaço e cruzam a linha virtual que une uma fonte de ruído (por exemplo, alguém falando) e um ponto de recepção”. As divisórias podem ter diferentes configurações no que diz

respeito à sua forma, materiais de acabamento e dimensões. Seu uso é destinado a: proporcionar área extra de absorção sonora ao ambiente; delimitar as rotas de movimentação entre um arranjo de estações de trabalho; delimitar acusticamente áreas para conversas curtas e informais em ambientes compartilhados de planta livre; proporcionar o confinamento, mesmo que parcial, de fontes geradoras de ruído como impressoras, máquinas de café, telefone, entre outras. Já as divisórias de mesa, definidas como “elementos verticais apoiados na estrutura da mesa”, têm como principais objetivos delimitar visualmente as estações de trabalho, reduzir o nível de ruído entre as mesmas e proporcionar absorção sonora próxima aos usuários.

As principais funções das divisórias estão diretamente ligadas à qualidade acústica do ambiente. Portanto, suas dimensões, seu posicionamento e os materiais de acabamento devem ser definidos de forma estratégica para que essas funções sejam cumpridas com a maior eficiência possível (EGAN, 1988). Porém, conforme afirmam Trocka-Leszczynska *et al.* (2021), os critérios usados para definição dessas características devem levar em consideração outros aspectos importantes como o layout arquitetônico da sala, o tipo de atividade a ser exercida no ambiente, a dinâmica de trabalho da empresa, os hábitos culturais dos usuários e outros fatores ambientais como a qualidade lumínica e a ventilação.

Para garantir uma perda de transmissão sonora significativa, as divisórias devem preferencialmente conter um núcleo rígido na sua composição, com massa e espessura adequadas para proporcionar o bloqueio das ondas sonoras. Divisórias muito robustas são desnecessárias, pois a eficiência geral do sistema é limitada pelos efeitos de difração e reflexão sonora sobre e ao redor das mesmas (ROSSING, 2014; WENMAEKERS *et al.*, 2019).

A norma ISO 22955:2021 contém uma tabela que apresenta valores referenciais de atenuação sonora entre duas estações de trabalho separadas por divisórias baseados em uma pesquisa realizada em câmara semi-anecóica no Instituto Nacional Francês de Pesquisa para a Prevenção de Acidentes e Doenças Ocupacionais (INRS). Os níveis de pressão sonora foram medidos em diferentes configurações, variando a altura das divisórias e a capacidade de absorção sonora do forro. Como indicam os dados da Tabela 1, a aplicação de materiais fonoabsorventes no forro pode proporcionar uma atenuação maior entre as estações de trabalho em comparação ao aumento da altura das divisórias.

Tabela 1 - Valores de atenuação sonora entre estações de trabalho

Altura da divisória de separação	Atenuação sonora entre estações de trabalho sem tratamento fonoabsorvente no teto (forro de gesso)	Atenuação sonora entre estações de trabalho com tratamento fonoabsorvente no teto (forro com $\alpha_w = 1$)
cm	dB	dB
110 (35 cm acima da mesa)	1,1	3,6
120 (45 cm acima da mesa)	1,7	4,5
130 (55 cm acima da mesa)	2,4	5,4
140 (65 cm acima da mesa)	2,9	6,3
150 (75 cm acima da mesa)	3,4	6,5

Fonte: ISO 22955:2021 – Adaptada pelo autor

As divisórias parciais devem ser revestidas preferencialmente com materiais fonoabsorventes, especialmente quando estão localizadas próximas a fontes ruidosas (EGAN, 1988; LONG, 2014).

A capacidade de absorção sonora de uma divisória é determinada através de ensaios em laboratório, seguindo os procedimentos das normas ISO 354:2003 e ISO 20189:2018. Segundo a norma ISO 20189:2018, a absorção sonora de um objeto único como uma divisória deve ser representada pela área de absorção sonora equivalente (A_{obj}) em bandas de terço de oitava entre 100 Hz e 5000 Hz e pelo coeficiente de absorção sonora (α_{obj}) em bandas de oitava entre 125 Hz e 4000 Hz. Ainda, a norma estabelece que a classificação de objetos únicos não deve ser realizada com base no coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w), conforme os procedimentos da norma ISO 11654 - *Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption*. O uso do valor único de α_w é limitado para produtos e materiais acústicos planos ou que a área possa ser determinada conforme a norma ISO 354:2003.

O posicionamento das divisórias deve ser determinado de forma a bloquear os caminhos por onde o som possa ser transmitido entre estações de trabalho (EGAN, 1988; LONG, 2014). Segundo Trocka-Leszczynska *et al.* (2021), as divisórias

instaladas nas mesas são importantes para o controle da transmissão direta e das reflexões sonoras provindas das mesas, principalmente em frente às pessoas, pois é nessa direção que a voz será projetada. Essas divisórias devem ser revestidas com material fonoabsorvente para proporcionar um ambiente menos ruidoso e mais confortável, facilitando a comunicação entre colegas de trabalho.

De acordo com Wenmaekers *et al.* (2019), as divisórias instaladas nas laterais das mesas também são importantes, pois ajudam a bloquear o som refletido das paredes ou outras superfícies que envolvem a estação de trabalho. Em alguns casos, também é possível prolongar as divisórias até a parede lateral para cumprir essa função. No estudo desenvolvido pelos autores, o efeito da aplicação de materiais fonoabsorventes nas divisórias laterais foi pouco significativo. Além de bloquear as reflexões sonoras, conforme afirmam Park *et al.* (2020), as divisórias laterais na mesa podem contribuir para a sensação de privacidade dos funcionários por delimitar de forma mais organizada o seu espaço de trabalho. Esse fator pode ser ainda mais relevante em escritórios onde a comunicação entre pessoas sentadas na mesma mesa não é a prioridade, como por exemplo em espaços de *coworking*, onde as mesas são compartilhadas por profissionais autônomos. Já em uma mesa compartilhada por usuários de uma mesma equipe elas podem ser descartadas caso a prioridade seja a ampliação do espaço livre de mesa.

Em escritórios de planta livre, as divisórias de piso são fundamentais para promover a setorização espacial e acústica de cada equipe ou departamento da empresa, principalmente quando as funções exercidas são divergentes, já que não há nenhuma separação fixa entre os ambientes como nos escritórios compartimentados. Elas podem ser utilizadas também para criar pequenos espaços para reuniões rápidas, conversas por telefone ou momentos de descontração e descanso (OSELAND *et al.*, 2015; RIBEIRO, 2018; HARVIE-CLARK *et al.*, 2019).

A altura das divisórias costuma variar entre 1,10 m até 2,10 m. Estudos comprovam que quanto mais altas e mais próximas estiverem do interlocutor e do ouvinte, maior será a atenuação sonora entre as estações de trabalho e menor será o nível de inteligibilidade da fala, principalmente para as pessoas mais afastadas da fonte emissora. Isso ocorre devido ao aumento da área de absorção sonora próxima ao interlocutor (nos casos em que as divisórias são revestidas com materiais absorventes) e à redução da energia sonora transmitida através da divisória e por

difração sobre a divisória (LARRIEU *et al.*, 2017; UTAMI *et al.*, 2017; RINDEL, 2018; WENMAEKERS *et al.*, 2019; KERÄNEN *et al.*, 2020).

No entanto, a altura das divisórias deve levar em consideração o tipo de atividade que será exercida no ambiente. Divisórias altas são indesejáveis em situações em que a comunicação verbal e visual entre colegas de trabalho é importante. Em mesas compartilhadas por uma equipe de trabalho colaborativo, as divisórias não devem ter alturas muito elevadas para facilitar a comunicação entre os funcionários. Já em escritórios não colaborativos, em que o som produzido na estação de trabalho adjacente pode interferir na concentração e no desempenho dos colegas de trabalho, as divisórias devem ser altas o suficiente para promover uma atenuação sonora mais elevada (LARRIEU *et al.*, 2017; HARVIE-CLARK *et al.*, 2019; TROCKA-LESZCZYNSKA *et al.*, 2021; ISO, 2021).

Ao especificar divisórias altas, é importante avaliar a questão lumínica. Divisórias altas podem comprometer a propagação adequada da luz natural dentro do escritório e proporcionar áreas demasiadamente escuras, aumentando a demanda por investimento em iluminação artificial (HONGISTO *et al.*, 2016; TROCKA-LESZCZYNSKA *et al.*, 2021).

Em casos em que a sensação de espacialidade visual é uma premissa importante de projeto, é possível projetar divisórias com uma configuração mista. Em estudo realizado por Hongisto *et al.* (2016), os autores substituíram as divisórias existentes, que eram totalmente reflexivas com 1,5 m de altura, por divisórias de 1,7 m de altura, revestidas com material absorvente até 1,3 m e com a parte superior de 40 cm feita de vidro.

Apesar de contribuir para solucionar a questão visual, conforme alertam Wenmaekers *et al.* (2019), é importante cuidar para que as divisórias sem revestimento fonoabsorvente não proporcionem reflexões sonoras indesejadas para outras estações de trabalho. Os autores realizaram medições primeiramente com a divisória de piso sem revestimento absorvente e constataram que ela piorou as condições acústicas do ambiente, pois o som emitido pela fonte refletia e amplificava o som captado nas estações de trabalho em frente à divisória. Para solucionar esse problema, os autores aplicaram material fonoabsorvente tanto na divisória de piso como na parede do fundo que ficava atrás das estações de trabalho, atenuando a energia sonora refletida nessas superfícies.

2.2.3 Sistemas de mascaramento do som

O som residual ou ruído de fundo em escritórios é comumente dominado pelos sistemas de climatização e ventilação. O nível de pressão sonora residual ($L_{p,B}$) produzido por esses sistemas geralmente fica em torno de 30-35 dB na ponderação A. Em escritórios de planta livre, esse nível de ruído não é suficiente para reduzir significativamente a relação sinal-ruído e oferecer condições adequadas de privacidade da fala, mesmo em situações em que a taxa de decaimento espacial do nível sonoro da fala proporcionada pelas intervenções arquitetônicas seja elevada. Além disso, o ruído produzido por sistemas de climatização e ventilação não é uma boa fonte de mascaramento, pois não oferece um conteúdo espectral adequado e ajustável e geralmente não é distribuído uniformemente ao longo do espaço (HONGISTO, 2005; ROSSING, 2014; LONG, 2014).

Portanto, sistemas eletrônicos de mascaramento do som podem ser introduzidos para melhorar as condições de privacidade acústica, mascarando o ruído da fala e tornando-o menos intrusivo. Esses sistemas devem produzir um ruído suave e estável, para que não sejam percebidos e não comprometam a concentração dos funcionários. A aplicação desses sistemas pode ser feita tanto em espaços compartilhados como em salas privadas (BISTAFA, 2018; EGAN, 1988).

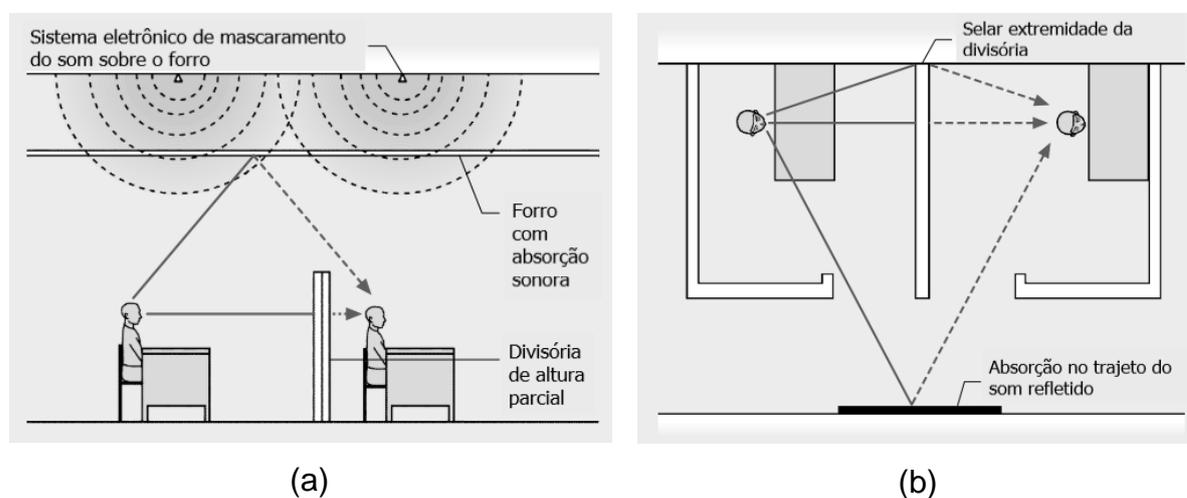
O efeito físico do mascaramento é a melhoria da privacidade da fala e a redução da distração causada pelas conversas paralelas e outros ruídos oscilantes. Subjetivamente, o mascaramento pode reduzir o estresse e a distração e conseqüentemente melhorar o desempenho dos profissionais tanto em tarefas simples quanto em trabalhos que requerem habilidades de elevada carga cognitiva (HONGISTO, 2005).

O mascaramento pode ser realizado por alto-falantes localizados acima do forro, para que não sejam perceptíveis visualmente, ou embutidos no próprio forro, reduzindo o custo de instalação. O ruído deve ter conteúdo espectral suave, tendo como base o ruído rosa, que pode ser mixado a sons agradáveis como músicas relaxantes e sons da natureza. Ao utilizar diferentes tipos de som, deve-se levar em consideração o tipo de atividade que será realizada. Sons musicais, por exemplo, devem ser evitados em escritórios em que as atividades realizadas demandam elevado nível de concentração e atividade cognitiva, pois podem comprometer o desempenho dos funcionários (LONG, 2014; LIU *et al.*, 2021).

Segundo Long (2014), os sistemas de mascaramento geralmente são ajustados para produzir um nível sonoro de 47 dB na ponderação A para escritórios de planta livre e de 44 dB na ponderação A para escritórios compartimentados. Porém, de acordo com Lenne *et al.* (2020), um nível de mascaramento de 45 dB na ponderação A já pode ser considerado muito elevado e pode provocar desconforto e outros problemas de saúde aos usuários, principalmente com longos períodos de exposição. Os autores também salientam que um sistema eletrônico de mascaramento, mesmo que seja usado de acordo com especificações testadas e recomendadas, não é uma solução única para o problema da privacidade acústica em escritórios de planta livre. Recomenda-se que a instalação desses sistemas seja precedida de uma análise arquitetônica do escritório, dando atenção preferencial à qualidade acústica da sala, ao layout das estações de trabalho e das atividades que ali decorrem.

A Figura 17 representa em corte (a) e planta baixa (b) um resumo do conjunto de elementos citados nessa seção de projetos devidamente implementados.

Figura 17 – Implementação de conjunto de elementos em escritórios de planta livre



Fonte: Rossing (2014, p. 439) – Adaptada pelo autor

A Figura 17 (a) representa a perda de transmissão sonora proporcionada pela divisória de altura parcial e pela absorção sonora do forro, além da contribuição do sistema eletrônico de mascaramento do som instalado sobre o forro. A Figura 17 (b) representa o posicionamento adequado da absorção sonora nas paredes e a importância do prolongamento e vedação das divisórias no encontro com paredes para impedir a transmissão sonora pelos flancos.

2.3 Parâmetros de avaliação da qualidade acústica de escritórios

2.3.1 Parâmetros e descritores acústicos em escritórios de planta livre

Os parâmetros e descritores acústicos utilizados para avaliação da qualidade acústica de escritórios de planta livre são determinados pela norma ISO 3382-3:2022. Os descritores numéricos de valor único são determinados a partir de dados obtidos em medições, sendo três deles associados somente ao decaimento espacial do nível de pressão sonora (SPL) da fala e um associado à inteligibilidade da fala (HAAPAKANGAS *et al.*, 2017; HONGISTO *et al.*, 2021).

A inteligibilidade da fala é expressa através do descritor STI (Índice de Transmissão da Fala). O STI é uma quantidade física positivamente associada à inteligibilidade subjetiva da fala que leva em consideração a influência do ruído de fundo e do tempo de reverberação. Os valores de STI variam de 0,0 (fala não inteligível) a 1,0 (inteligibilidade da fala perfeita) (BRANDÃO, 2016; HONGISTO *et al.*, 2018). Portanto, conforme descreve a norma ISO 3382-3:2022, é necessário que seja realizada a medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo ($L_{p,B}$) da sala para determinação dos valores de STI nos pontos de medição.

Os quatro descritores estabelecidos pela norma ISO 3382-3:2022 são:

- a taxa de decaimento espacial da fala, $D_{2,S}$, que descreve o quanto o SPL da fala ponderado em A, $L_{p,A,S}$, reduz quando a distância em relação à fonte sonora é dobrada;
- o nível sonoro da fala a 4 m de distância, $L_{p,A,S,4m}$, que descreve o SPL da fala ponderado em A a uma distância de 4 m da fonte sonora;
- o raio de conforto, r_C , que descreve a distância em relação à fonte sonora em que o SPL da fala ponderado em A passa a ser inferior a 45 dB;
- o raio de distração, r_D , que descreve a distância em relação à fonte sonora em que o STI passa a ser inferior a 0,50.

Além dos descritores citados, o nível de pressão sonora médio ponderado em A do ruído de fundo, $L_{p,A,B}$, e o tempo de reverberação médio da sala entre 250 Hz e 4000 Hz, $TR_{250-4000Hz}$, podem ser apresentados para complementar as análises.

O raio de conforto foi introduzido somente na versão mais recente da norma ISO 3382-3, publicada em 2022. Segundo Hongisto *et al.* (2021), a introdução desse descritor visa facilitar a comunicação entre profissionais da acústica e pessoas leigas.

O autor explica que a dificuldade para compreender os outros dois descritores relacionados ao decaimento espacial do som da fala, $D_{2,S}$ e $L_{p,A,S,4m}$, é justificada por ambos terem a mesma unidade de medida (dB), mas definições diferentes.

A versão anterior da norma ISO 3382-3 publicada em 2012 também incluía entre os descritores o raio de privacidade, r_P , que descreve a distância em relação à fonte sonora em que o STI passa a ser inferior a 0,20 (KOSTALLARI *et al.*, 2017; RINDEL, 2018; HONGISTO *et al.*, 2021). Porém, valores de STI inferiores a 0,20 são praticamente inalcançáveis em situações reais de ambientes abertos e compartilhados de escritórios de planta livre, o que limita a aplicação do r_P para ambientes isolados como salas de reuniões privadas. Por conta disso, pesquisas realizadas anteriormente à nova versão da ISO 3382-3 focaram suas análises no raio de distração, r_D , para avaliar as condições de privacidade da fala nos escritórios analisados (HONGISTO *et al.*, 2016; HAAPAKANGAS *et al.*, 2017; RINDEL, 2018; HONGISTO *et al.*, 2018; WENMAERKERS *et al.*, 2019).

O anexo C da norma ISO 3382-3:2022 fornece valores referenciais para avaliar os resultados obtidos para os descritores acústicos de valor único. Os valores são baseados em um estudo que analisou resultados medidos em 185 escritórios de planta livre com ampla variedade de formas geométricas, dimensões, mobiliário, materiais de revestimento e níveis de pressão sonora do ruído de fundo. Os valores referenciais para más e boas condições acústicas em escritórios de planta livre são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores referenciais dos descritores de valor único para más e boas condições acústicas em escritórios de planta livre

Descritores de valor único	$D_{2,S}$ (dB)	$L_{p,A,S,4m}$ (dB)	r_C (m)	r_D (m)	$L_{p,A,B}$ (dB)
Más condições acústicas na sala	< 5	> 52	> 11	> 11	< 35 ou > 48
Boas condições acústicas na sala	> 8	< 48	< 5	< 5	entre 40 e 45

Fonte: ISO 3382-3 (2022) - Elaborada pelo autor

Ao avaliar a qualidade acústica de uma sala, é importante realizar a análise de um conjunto de parâmetros já que cada um visa quantificar uma ou mais experiências ou dimensões subjetivas (BRANDÃO, 2016). O raio de distração (r_D) está diretamente

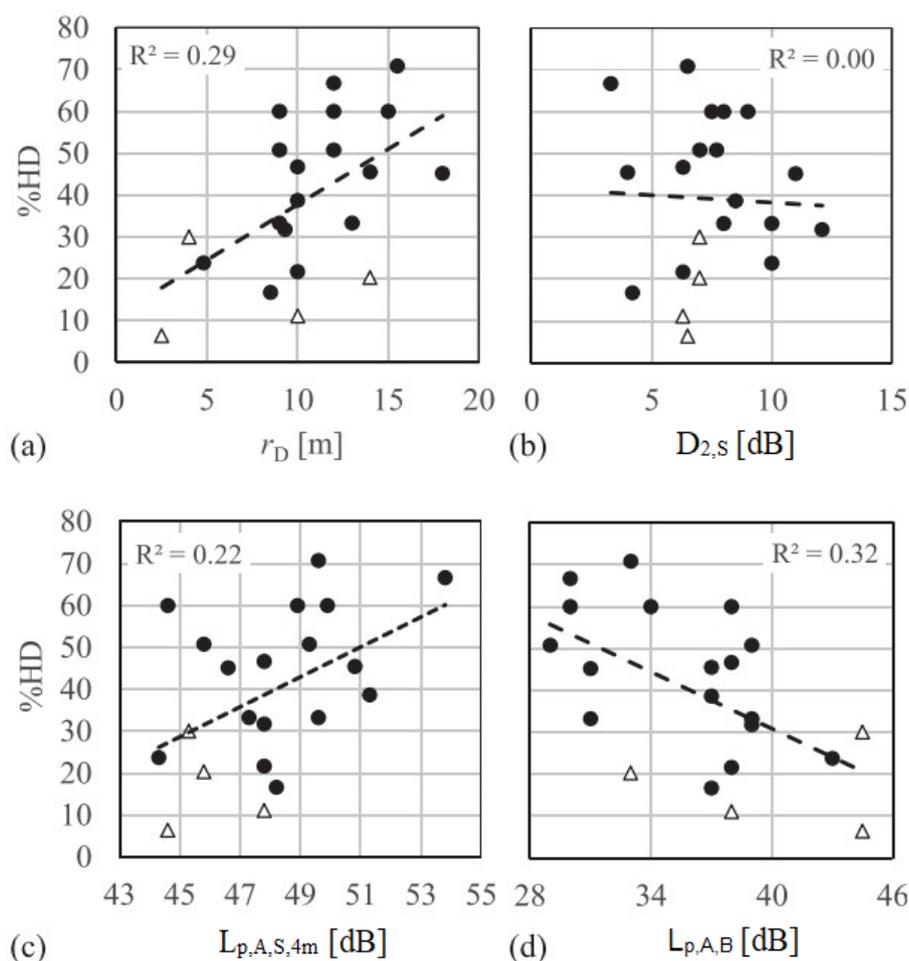
relacionado com o nível de privacidade acústica, pois leva em consideração todos os fatores acústicos que afetam a inteligibilidade da fala entre o interlocutor e o ouvinte. Valores baixos de r_D indicam maior nível de privacidade da fala (menor inteligibilidade da fala) (HAAPAKANGAS *et al.*, 2017; HONGISTO *et al.*, 2018).

Já a taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,S}$), o nível de pressão sonora da fala a 4 m ($L_{p,A,S,4m}$) e o raio de conforto (r_C) não estão relacionados com a inteligibilidade e sim com o decaimento espacial do som da fala. Esses três descritores dependem principalmente da quantidade de absorção sonora, do volume e geometria da sala e da presença de obstáculos para o som direto como divisórias e mobiliário. Valores altos de $D_{2,S}$ e baixos de $L_{p,A,S,4m}$ e r_C indicam que o som da fala foi atenuado de forma eficiente. Entretanto, os descritores estão diretamente relacionados entre si. Pequenos valores de r_D devem ser obtidos em condições onde o $L_{p,A,S,4m}$ e o r_C são baixos e o $D_{2,S}$ é alto (RINDEL, 2018; WENMAEKERS *et al.*, 2019; KERÄNEN *et al.*, 2020; HONGISTO *et al.*, 2021).

Os valores determinados no anexo C da norma ISO 3382-3:2022, apresentados na Tabela 2, oferecem uma referência genérica para qualificação acústica de escritórios de planta livre. Ao analisar a relação entre os descritores e a avaliação subjetiva de usuários com relação a perturbações associadas ao ruído e à falta de privacidade, pesquisadores questionam a relevância dos valores sugeridos como referência pela norma (HAAPAKANGAS *et al.*, 2017; RINDEL, 2018; WENMAEKERS *et al.*, 2019; HARVIE-CLARK *et al.*, 2019).

O estudo realizado por Haapakangas *et al.* (2017) oferece dados muito importantes sobre a relação entre a qualidade acústica da sala e a perturbação sonora percebida por usuários. Os autores realizaram medições acústicas pela norma ISO 3382-3 e elaboraram questionários de avaliação subjetiva em 21 escritórios de planta livre com ampla gama de condições acústicas. Os questionários foram realizados com a finalidade de quantificar a porcentagem de pessoas entrevistadas que declararam se sentir altamente perturbadas pelo ruído em seus escritórios. Na Figura 18 estão presentes os gráficos que relacionam a porcentagem de entrevistados altamente perturbados pelo ruído (%HD – *Highly Disturbed*) com os valores obtidos através das medições para o raio de distração (a), para a taxa de decaimento espacial da fala (b), para o SPL da fala ponderado em A a 4 m de distância e para o SPL médio do ruído de fundo ponderado em A (d) nos 21 escritórios analisados.

Figura 18 – Relação entre a porcentagem de entrevistados altamente perturbados pelo ruído (%HD) e os descritores da norma ISO 3382-3



Fonte: Haapakangas *et al.* (2017) – Adaptada pelo autor

Segundo Haapakangas *et al.* (2017), os coeficientes de determinação (R^2) e os dados plotados para cada escritório nos gráficos da Figura 18 sugerem que os descritores r_D , $L_{p,A,S,4m}$ e $L_{p,A,B}$ estão associados a perturbação pelo ruído, enquanto o descritor $D_{2,S}$ não. De acordo com Hongisto *et al.* (2021), o motivo mais provável para a baixa relação entre a perturbação dos usuários com o $D_{2,S}$ é que esse descritor não leva em consideração o efeito do ruído de fundo (mascaramento). Ainda, conforme apontam os resultados apresentados na pesquisa de Wenmaekers *et al.* (2019), valores satisfatórios para o r_D podem ser alcançados com $D_{2,S}$ inferior ao limite sugerido pela norma de 8 dB mesmo em escritórios com baixo nível do ruído de fundo.

Em pesquisa realizada por Rindel (2018), o autor complementa a análise relacionando os resultados apresentados por Haapakangas *et al.* (2017) com os valores referenciais sugeridos pela ISO 3382-3. A investigação realizada por Rindel

(2018) revela que alguns escritórios cujos descritores medidos não se enquadraram nos valores sugeridos pela norma tiveram baixa porcentagem de entrevistados perturbados pelo ruído, o que pode ser resultado de níveis de ruído de fundo muito diferentes entre os escritórios analisados. Alguns dos escritórios que receberam as melhores avaliações apresentaram valores baixos de r_D , mas com níveis de ruído de fundo elevados.

Foi comprovado através de diversos estudos que a redução da inteligibilidade da fala indesejada está positivamente correlacionada à satisfação acústica dos usuários em escritórios. No entanto, de acordo com Harvie-Clark *et al.* (2019), essa correlação não é suficientemente alta e, portanto, outros fatores devem ser analisados concomitantemente para a qualificação desses ambientes. O autor comenta que, ao focar apenas na busca de baixos valores para o raio de distração, os projetistas acústicos podem propor soluções que entram em conflito com outras aspirações estéticas e de conforto ambiental, interferindo no objetivo geral do projeto que é proporcionar a satisfação e a produtividade dos usuários no ambiente de trabalho.

Oferecer aos usuários a possibilidade de controlar as condições ambientais (acústicas, térmicas, lumínicas, espaciais e etc.) no espaço de trabalho pode ser a melhor estratégia para qualificação dos escritórios. A implementação de layouts mais fluídos que não sejam caracterizados apenas por estações de trabalho atribuídas para cada funcionário e sim por espaços especificamente projetados e designados para prática de determinadas atividades permite que as pessoas escolham o ambiente mais adequado para executar suas funções (HONGISTO *et al.*, 2016; HARVIE-CLARK *et al.*, 2019; PARK *et al.*, 2020).

A implementação da norma ISO 22955:2021 busca justamente estender o conceito de impacto da fala indesejada e sons intrusivos, propondo que os requisitos acústicos e os valores dos descritores de avaliação da qualidade acústica devem ser determinados com base nas necessidades específicas de cada escritório, levando em consideração as características da empresa e o tipo de trabalho que será desenvolvido em cada ambiente. Assim, os requisitos para o decaimento espacial do som e para privacidade da fala podem variar para diferentes áreas do mesmo escritório, sendo mais ou menos exigentes de acordo com a demanda de cada funcionário ou equipe de funcionários.

Para avaliação pontual de determinadas áreas do escritório, a ISO 22955:2021 sugere o uso de outros descritores acústicos. Entre eles estão: a atenuação acústica

in situ da fala, $D_{A,S}$, que representa a diferença, em dB, entre o SPL da fala ponderado em A a 1 m de distância da fonte em campo livre e o SPL da fala ponderado em A medido em um ponto de recepção; o nível de ruído na estação de trabalho, $L_{Aeq,T}$, que representa o nível de pressão sonora contínuo equivalente na ponderação A, em dB, medido em uma estação de trabalho durante um período T em condições de atividade normal na sala.

A norma ISO 22955:2021 sugere, por exemplo, os seguintes valores referenciais para escritórios cujas atividades envolvem pouco trabalho colaborativo: $TR_{250-4000Hz} \leq 0,5$ s; $D_{A,S} \geq 6$ dB; $L_{Aeq,T} \leq 48$ dB. Em escritórios onde o trabalho colaborativo é importante entre pessoas posicionadas nas estações de trabalho mais próximas os valores sugeridos são: $TR_{250-4000Hz} \leq 0,5$ s; $D_{A,S} \leq 4$ dB; $L_{Aeq,T} \leq 52$ dB. É possível perceber que a atenuação in situ da fala deve ser baixa no segundo caso, justamente para facilitar a comunicação entre os colegas de trabalho. Onde há pouco trabalho colaborativo, o nível de ruído na estação de trabalho, $L_{eqA,T}$, deve ser inferior para facilitar a concentração dos funcionários. O tempo de reverberação médio entre 250 Hz e 4000 Hz, $TR_{250-4000Hz}$, deve ser baixo em ambos casos.

Já em escritórios cujas atividades envolvem a recepção de público externo e atendimento pessoal, como bancos, agências de seguro, lojas e etc., os valores sugeridos pela ISO 22955:2021 para o tempo de reverberação e para o nível de ruído na estação de trabalho são menos exigentes porque o nível de ruído nesses ambientes é geralmente elevado. Entretanto, a atenuação acústica in situ da fala também deve ser elevada para garantir privacidade e conforto nas áreas de atendimento particular: $TR_{250-4000Hz} \leq 0,8$ s; $D_{A,S} \geq 6$ dB; $L_{Aeq,T} \leq 55$ dB.

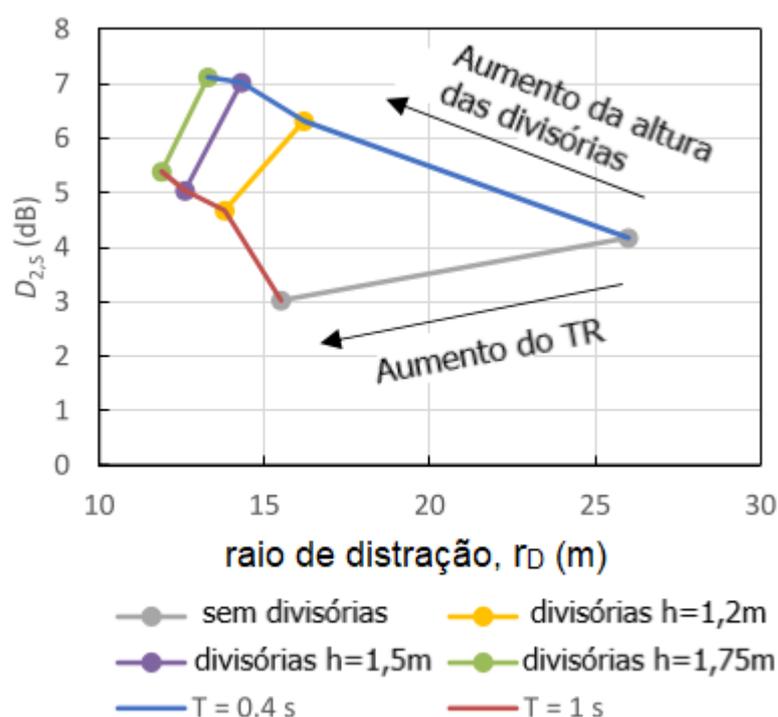
2.3.2 Relação entre os descritores acústicos e soluções arquitetônicas

As soluções arquitetônicas mais eficazes para promover o decaimento espacial do som da fala e a privacidade acústica em escritórios de planta livre são a aplicação de materiais fonoabsorventes nas superfícies da sala, a instalação de divisórias acústicas parciais entre as estações de trabalho e a implementação de sistemas eletroacústicos de mascaramento do som para controle do ruído de fundo (HONGISTO *et al.*, 2018; RINDEL, 2018; WENMAEKERS *et al.*, 2019; KERÄNEN *et al.*, 2020).

Em estudo realizado por Rindel (2018), foram realizadas simulações computacionais de um escritório de planta livre com intuito de analisar a influência da variação da altura de divisórias e do tempo de reverberação nos descritores de avaliação da qualidade acústica do ambiente. A Figura 19 apresenta um diagrama que relaciona o raio de distração e a taxa de decaimento espacial em simulações com diferentes tempos de reverberação, com e sem divisórias. Para os resultados apresentados nesse diagrama, as simulações foram realizadas com um nível de ruído de fundo de 35 dB na ponderação A com conteúdo espectral semelhante à voz humana.

Figura 19 – Relação entre o raio de distração (r_D) e a taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,s}$) em simulações com diferentes tempos de reverberação (TR), com e

sem divisórias



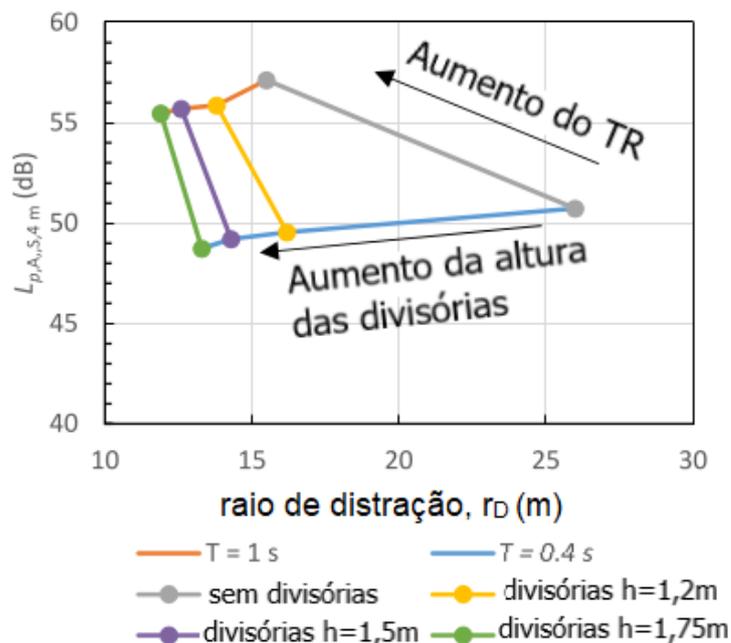
Fonte: Rindel (2018) – Adaptada pelo autor

No gráfico da Figura 19, conforme explica Rindel (2018), é possível verificar que o aumento do tempo de reverberação (TR) causou a redução do raio de distração e do decaimento espacial da fala. O efeito da introdução das divisórias se mostrou bastante benéfico. Sem as divisórias e com baixo tempo de reverberação, a inteligibilidade da fala fica muito elevada, resultando em um raio de distração altíssimo e comprometendo as condições de privacidade acústica. O aumento da altura das

divisórias levou à diminuição do raio de distração e ao aumento do decaimento espacial da fala, o que é desejável. É possível observar também que com divisórias altas, o tempo de reverberação teve forte influência no decaimento espacial da fala, mas essa variação não impactou tanto o raio de distração. Essa análise está em concordância com os resultados obtidos por Keranen *et al.* (2020), em que os maiores valores de $D_{2,S}$ foram obtidos em medições realizadas em um escritório com alta absorção sonora no forro e nas paredes (baixo tempo de reverberação) e divisórias altas com 1,7 m de altura revestidas com material fonoabsorvente.

A Figura 20 apresenta um diagrama que relaciona o raio de distração e o nível de pressão sonora da fala a 4 m em simulações com diferentes tempos de reverberação, com e sem divisórias. Para os resultados apresentados nesse diagrama, as simulações foram realizadas com um nível de ruído de fundo de 35 dB na ponderação A com conteúdo espectral semelhante à voz humana.

Figura 20 - Relação entre o raio de distração (r_D) e nível de pressão sonora da fala a 4 m ($L_{p,A,S,4m}$) em simulações com diferentes tempos de reverberação (TR), com e sem divisórias



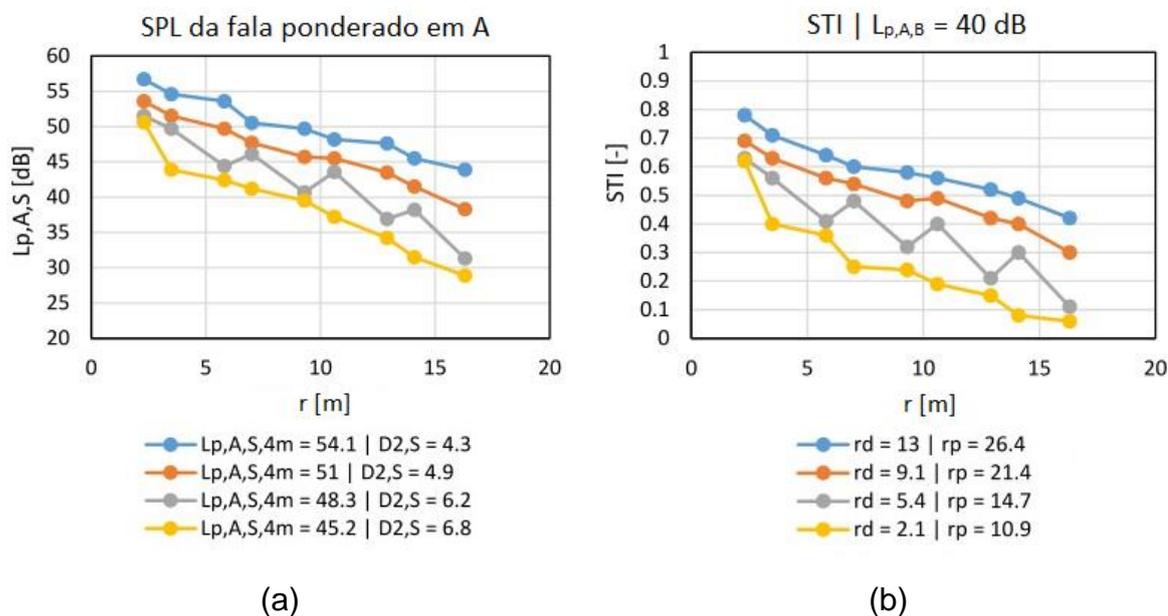
Fonte: Rindel (2018) – Adaptada pelo autor

Segundo Rindel (2018), o aumento da altura das divisórias foi eficiente para reduzir o raio de distração, mas teve pouca influência na redução do nível de pressão sonora da fala captado a 4 m da fonte emissora. No entanto, é possível observar que

o aumento do tempo de reverberação teve forte influência sobre esse descritor, sendo que o nível excedeu 55 dB nas simulações com tempo de reverberação de 1 s. Portanto, em concordância com as diretrizes propostas por Hongisto *et al.* (2018), é possível destacar a importância de otimizar o tempo de reverberação para que não seja muito longo, evitando gerar um ambiente muito ruidoso.

Em estudo de caso realizado por Wenmaekers *et al.* (2019), os autores realizaram medições acústicas em um escritório de planta livre com 4 configurações diferentes de sala. O escritório analisado possuía forro com alta capacidade de absorção sonora, carpete no piso e paredes reflexivas. A primeira configuração (v1 – azul) medida foi com a sala vazia, somente com as mesas posicionadas. Na segunda configuração (v2 – laranja) foram adicionadas divisórias de mesa forradas com material fonoabsorvente com 1,2 m de altura sem núcleo rígido. A terceira configuração (v3 – cinza) contou com divisórias de mesa com núcleo rígido, forradas com material fonoabsorvente e com 1,5 m de altura. Nessa configuração também foram adicionadas divisórias de mesa nas laterais das estações de trabalho. A quarta configuração (v4 – amarelo) manteve as soluções da configuração v3, mas foram adicionadas divisórias de piso entre as mesas com núcleo rígido e material fonoabsorvente, medindo 2,0 m de altura. Também foram adicionados painéis de absorção nas paredes do fundo da sala. Os gráficos da Figura 21 apresentam os dados do decaimento espacial do SPL da fala ponderado em A (a) e do STI (b), considerando um nível de ruído de fundo de 40 dB na ponderação A. Na legenda dos gráficos estão inclusos também os valores calculados para os descritores $L_{p,A,S,4m}$, $D_{2,S}$, r_D e r_P .

Figura 21 – Resultados do decaimento espacial do SPL da fala ponderado em A (a) e do STI (b) obtidos através de medições realizadas em estudo de caso para 4 configurações diferentes de sala



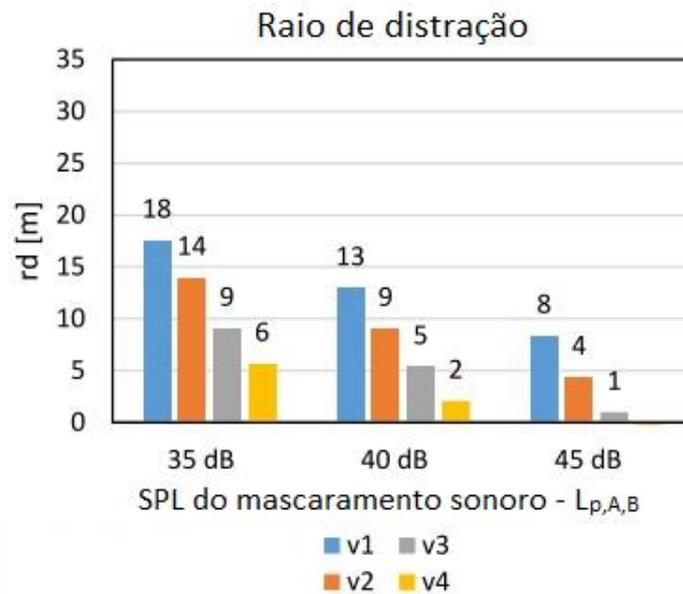
Fonte: Wenmaekers *et al.* (2019) – Adaptada pelo autor

Os resultados obtidos por Wenmaekers *et al.* (2019) evidenciam a influência da altura das divisórias no decaimento espacial do SPL da fala ($L_{p,A,S}$) e na variação espacial do STI. O aumento das divisórias proporcionou valores inferiores do $L_{p,A,S}$ e do STI em todas posições medidas, além de aumentar o decaimento espacial ao longo das estações de trabalho. É possível perceber também a influência da composição e posicionamento das divisórias. Na configuração v3, as divisórias de mesa com núcleo rígido destacaram o efeito da difração, formando áreas de sombra acústica nas estações de trabalho próximas às mesmas e fazendo com que o decaimento do $L_{p,A,S}$ fosse menos homogêneo ao longo da linha de medição. Os resultados apontam valores mais elevados do $L_{p,A,S}$ e do STI em posições mais distantes da fonte, seguidos de um decaimento acentuado para a próxima posição. Na configuração v4, as divisórias de piso posicionadas entre as mesas serviram para compensar esse efeito.

Na pesquisa de Wenmaekers *et al.* (2019), os autores destacam também a importância de controlar o nível do ruído de fundo para alcançar as condições de privacidade acústica desejadas. Ao elevar o nível do ruído de fundo através de um sistema eletroacústico de mascaramento sonoro, os autores obtiveram valores menores para o raio de distração em todas configurações de sala ensaiadas. O gráfico

da Figura 22 representa a relação entre o SPL do ruído de fundo na ponderação A e o raio de distração com base nos resultados medidos para as 4 configurações de sala.

Figura 22 – Relação entre o SPL do ruído de fundo e o raio de distração com base em resultados de medições realizadas em estudo de caso para 4 configurações diferentes de sala



Fonte: Wenmaekers *et al.* (2019)

No estudo experimental realizado por Keranen *et al.* (2020), foi investigado o efeito da introdução de absorção sonora nas superfícies da sala e da variação da altura de divisórias parciais no decaimento espacial do som da fala. Foram medidos e determinados valores de $D_{2,S}$ e $L_{p,S,A,4m}$ para 22 configurações diferentes em um mesmo escritório de planta livre. Os autores concluíram que as divisórias proporcionaram uma melhora incontestável nas condições acústicas da sala principalmente quando a avaliação incluiu também as estações de trabalho mais distantes da fonte sonora, mas também destacaram que a implementação de um forro com alta capacidade de absorção sonora é um fator determinante para o aumento do decaimento espacial da fala. Nas configurações onde as divisórias foram instaladas na sala sem absorção no forro, a taxa de decaimento espacial da fala medida foi inferior devido às reflexões sonoras proporcionadas pelas superfícies reflexivas da sala e pelo conseqüente aumento do tempo de reverberação.

Conforme demonstram as pesquisas, existem soluções arquitetônicas distintas e complementares que devem ser implementadas simultaneamente para alcançar

resultados satisfatórios. No entanto, como destacam Wenmaekers *et al.* (2019), devido ao grande impacto que elas podem ter no projeto e no custo de implementação dos escritórios, é preciso fazer uma seleção criteriosa dessas soluções para atender às necessidades e expectativas dos usuários.

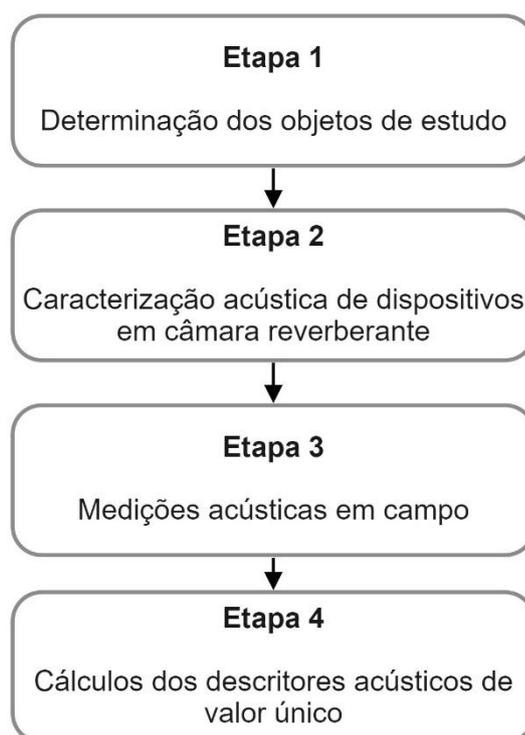
3 MÉTODO

O método adotado para o desenvolvimento da presente pesquisa foi baseado em um programa experimental que está detalhadamente descrito nas seções deste capítulo, contendo as informações relevantes a respeito dos objetos de estudo, dos equipamentos utilizados e das técnicas de medição, além das orientações normativas adotadas.

3.1 Etapas do programa experimental

O programa experimental foi desenvolvido em 4 etapas, ordenadas de forma complementar a fim de obter os dados necessários para o cumprimento do objetivo geral da pesquisa, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Fluxograma das etapas do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor

Os objetos de estudo foram determinados na primeira etapa. Um escritório de planta livre foi selecionado para a realização do estudo experimental. Com base nas características do escritório escolhido, divisórias acústicas parciais foram projetadas

e produzidas com configurações adequadas ao espaço determinado para sua instalação.

Na segunda etapa foi realizada a caracterização acústica das divisórias e da potência sonora da fonte omnidirecional. Para caracterização desses dispositivos foram executados ensaios na câmara reverberante do laboratório de acústica do IIT Performance com a finalidade de determinar a capacidade de absorção sonora das divisórias e a potência da fonte sonora omnidirecional utilizada para validar sua utilização nas medições em campo.

Na terceira etapa foram realizadas medições acústicas no escritório de planta livre escolhido a fim de obter dados de parâmetros acústicos objetivos para 3 configurações diferentes da mesma sala, sem e com as divisórias instaladas.

Por fim, em posse dos dados extraídos nas medições, a etapa 4 foi constituída pela aplicação de fórmulas para a determinação dos descritores acústicos de valor único utilizados para avaliação da qualidade acústica de escritórios de planta livre. Os resultados foram então organizados em tabelas e gráficos para apresentação, análise e discussão com base no referencial bibliográfico.

3.2 Determinação dos objetos de estudo

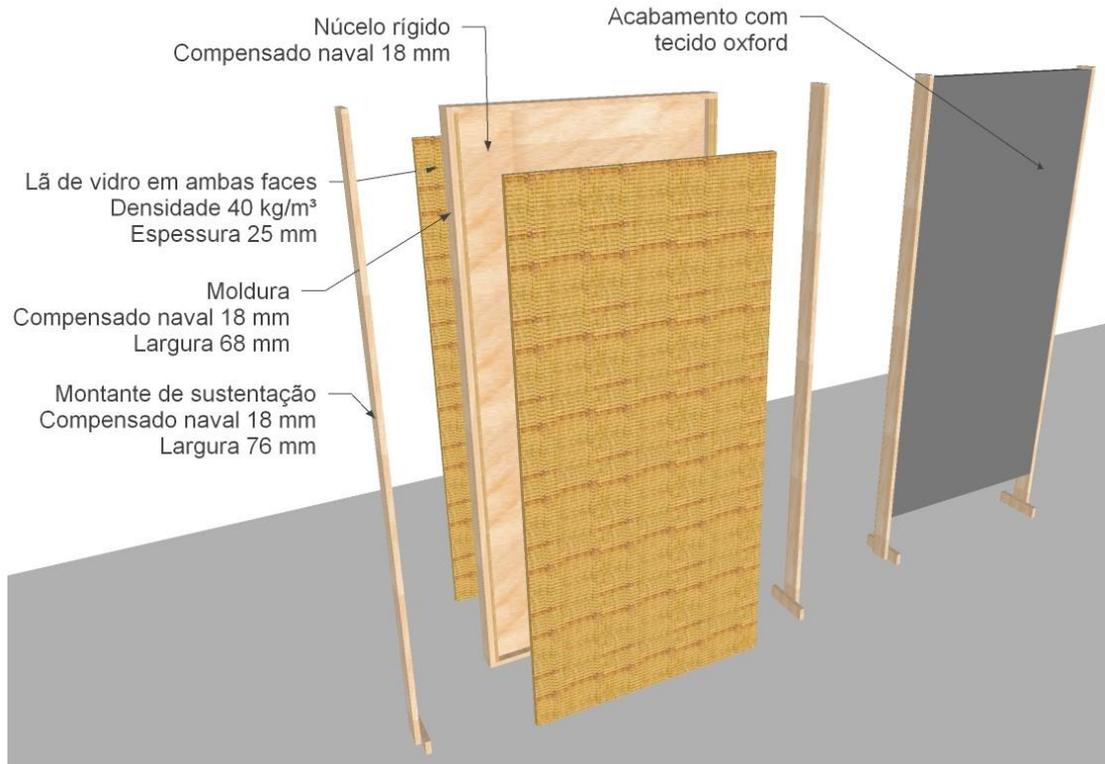
3.2.1 Projeto e produção das divisórias acústicas parciais

O projeto das divisórias foi desenvolvido especialmente para se adequar ao ambiente escolhido para a pesquisa. Foram projetadas divisórias de piso e de mesa, conforme definições das normas ISO 20189:2018 e ISO 22955:2021. As divisórias foram projetadas com dimensões suficientes para bloquear a transmissão direta do som ao longo de todo comprimento das mesas. Para facilitar o manuseio, as divisórias foram montadas em módulos independentes e foram instaladas lado a lado.

As principais funções das divisórias são bloquear o som direto e proporcionar áreas extras de absorção sonora. Portanto, elas foram montadas com um núcleo rígido de compensado naval com 18 mm de espessura, coberto em ambas as faces com painéis de lã de vidro de 25 mm de espessura e densidade de 40 kg/m³. O núcleo rígido e os painéis de lã de vidro foram fixados em uma moldura de compensado naval com 68 mm de largura e o acabamento foi feito com revestimento de tecido tipo Oxford. Os montantes de sustentação foram executados com 76 mm de largura e

foram fixados diretamente nas laterais da moldura após a aplicação do revestimento de tecido, ficando aparentes. O desenho esquemático da Figura 24 ilustra os elementos que compõem a estrutura, o preenchimento e o acabamento das divisórias.

Figura 24 – Desenho esquemático da composição das divisórias de piso



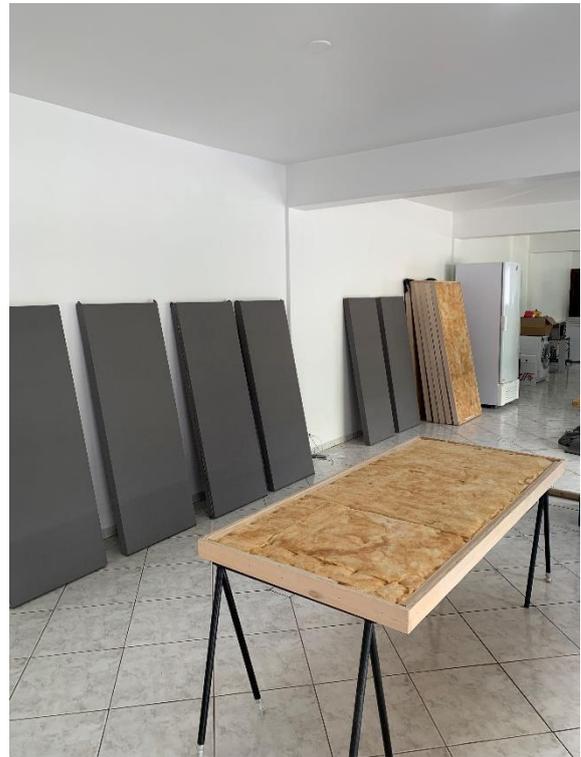
Fonte: Elaborada pelo autor

A montagem das divisórias foi realizada de forma artesanal e o projeto foi desenvolvido com base em referências de produtos existentes no mercado. A Figura 25 (a) ilustra o processo na etapa inicial de montagem da estrutura das divisórias com o núcleo rígido de compensado naval e os montantes das divisórias de piso já cortados no comprimento final. A Figura 25 (b) ilustra divisórias já preenchidas com lã de vidro na etapa de acabamento, onde foram revestidas com tecido tipo Oxford.

Figura 25 - Montagem das divisórias na etapa estrutural (a) e na etapa de acabamento (b)



(a)



(b)

Fonte: Registradas pelo autor

As 3 mesas existentes no escritório têm 100 cm de largura, 320 cm de comprimento e 75 cm de altura, de acordo com a planta baixa e o corte apresentados na Figura 27. As divisórias de piso foram construídas em quatro módulos de 80 cm de largura e altura total de 200 cm. As mesmas foram estruturadas em montantes de madeira nas laterais apoiados diretamente sobre o piso e foram posicionadas entre as mesas. Já as divisórias de mesa foram construídas em dois módulos de 160 cm de comprimento e 60 cm de altura, totalizando 135 cm de altura do topo da divisória até o piso. Elas foram apoiadas diretamente no eixo central das mesas, no sentido longitudinal. A Figura 26 ilustra as divisórias de piso e de mesa instaladas no escritório durante o processo de medição.

Figura 26 - Divisórias de piso e de mesa instaladas



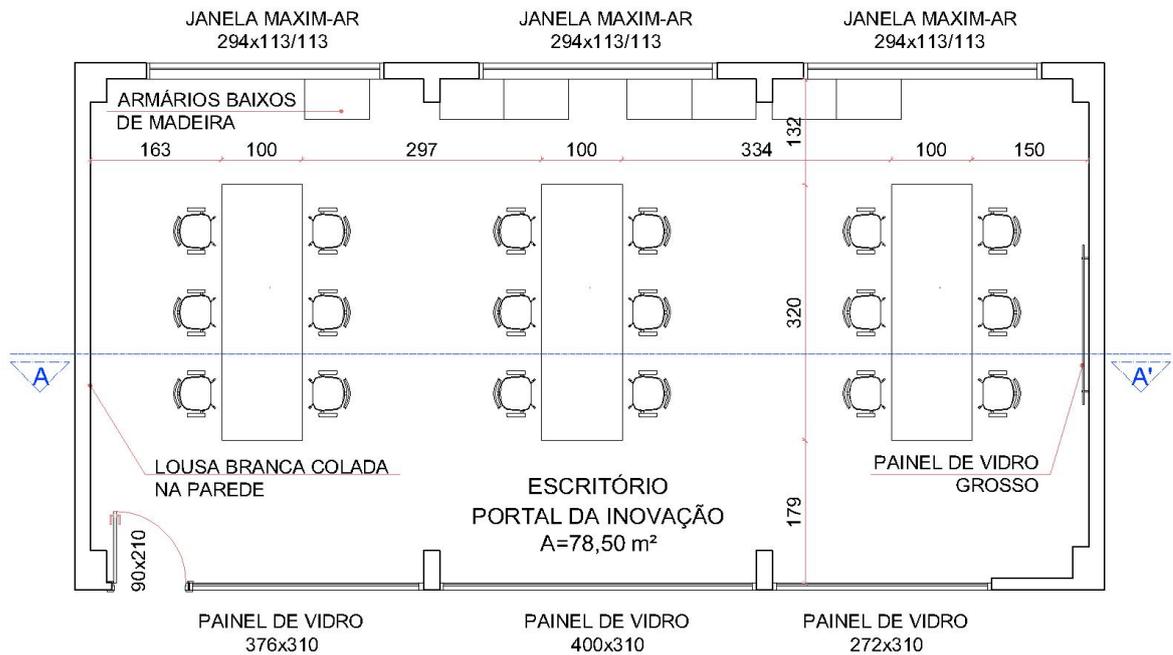
Fonte: Registrada pelo autor

3.2.2 Escritório de planta livre

O escritório de planta livre escolhido para o desenvolvimento da presente pesquisa está localizado no campus da Unisinos em São Leopoldo/RS, no prédio do Portal da Inovação. O ambiente de formato retangular possui uma área de aproximadamente 78,50 m², pé direito de 3,47 m e volume aproximado de 270,00 m³.

O teto da sala não possui forro rebaixado, sendo acabamento em reboco e pintura, da mesma forma que as paredes. A parede ao fundo da sala possui um painel de vidro grosso com dimensões de 200 x 65 cm afastado 5 cm da superfície e a parede oposta conta com uma lâmina de lousa branca colada diretamente sobre a superfície, ocupando pouco mais da metade da área da parede. A planta baixa (a) e o corte (b) da sala estão presentes na Figura 27.

Figura 27 – Planta baixa (a) e corte AA' (b) do escritório



(a)



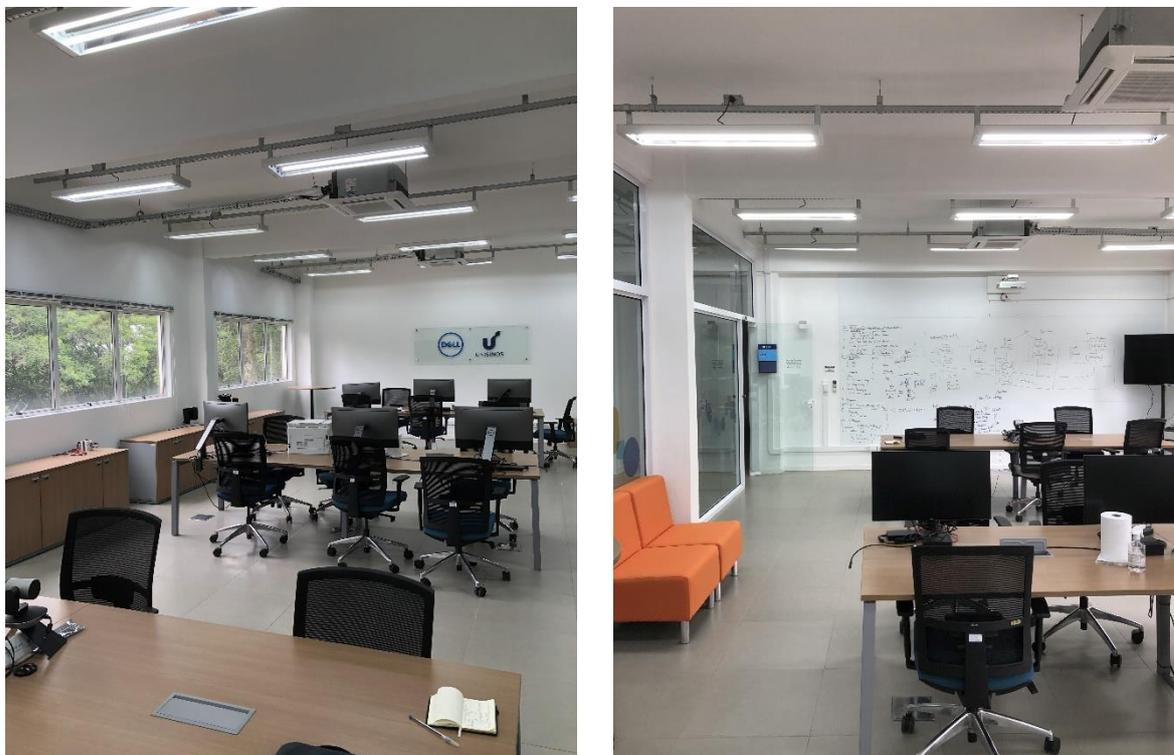
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

A parede longitudinal que faz divisa com o corredor do prédio é composta predominantemente por painéis de vidro grosso, com a interface com a alvenaria fixada em caixilhos de alumínio. As juntas entre os painéis de vidro são preenchidas com silicone. Nessa parede fica a porta de entrada do tipo pivotante em vidro, sem nenhuma vedação nas frestas. Na parede oposta estão localizadas 3 grandes janelas voltadas para a rua de circulação interna do campus. As esquadrias do tipo maxim-ar são compostas por caixilhos de alumínio e vidro comum. O piso possui acabamento

em peças cerâmicas com uma leve rugosidade superficial. A Figura 28 demonstra o escritório em sua configuração original.

Figura 28 - Escritório do Portal da Inovação em sua configuração original



(a)

(b)

Fonte: Registradas pelo autor

Em sua configuração original o mobiliário é formado por 3 mesas uniformemente distribuídas, contendo 6 cadeiras parcialmente estofadas em cada, totalizando 18 estações de trabalho. As mesas de estrutura metálica e tampo de madeira não possuem nenhuma divisão vertical para delimitação do espaço de cada estação de trabalho. Abaixo das janelas estão posicionados armários baixos de madeira ao longo do comprimento da sala. O sistema de climatização é formado por 3 equipamentos split cassete instalados de forma aparente, pendurados na laje por meio de suportes metálicos. As luminárias são fixadas em eletrocalhas aparentes também penduradas na laje do teto com suportes metálicos.

3.3 Caracterização acústica de dispositivos em câmara reverberante

3.3.1 Absorção sonora das divisórias acústicas parciais

A capacidade de absorção sonora dos materiais é um dos principais fatores que se deve ter conhecimento para analisar a influência de objetos nas condições acústicas de um ambiente. Para caracterizar as divisórias quanto a sua absorção sonora, foram realizadas medições na câmara reverberante do laboratório de acústica do itt Performance, localizada no campus da Unisinos em São Leopoldo/RS, de acordo com os procedimentos da norma ISO 354:2003 - *Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room*.

Os equipamentos utilizados nas medições, pertencentes ao laboratório de acústica do itt Performance, estão listados abaixo:

- Analisador sonoro Type 2270 – Bruel&Kjaer;
- Fonte sonora omnidirecional Omnipower 4292-L;
- Pré-amplificador modelo ZC-0032 – Bruel&Kjaer;
- Microfone ½” Type 4189 – Bruel&Kjaer;
- Calibrador sonoro Type 4231 – Bruel&Kjaer;
- Amplificador de potência Type 2734 - Bruel&Kjaer;
- Cabo AQ-0673;

Para validação dos ensaios, a câmara reverberante deve respeitar uma série de diretrizes descritas na norma ISO 354:2003. É recomendado que a sala tenha um volume de pelo menos 200,00 m³. As dimensões da sala não devem estar na proporção de pequenos números inteiros para proporcionar a distribuição uniforme das frequências naturais e superfícies paralelas devem ser evitadas. Para garantir que a sala promova uma distribuição suficientemente difusa do som, independentemente da sua forma, é requisitado que sejam instalados painéis difusores suspensos. A Tabela 3 apresenta as características dimensionais da câmara reverberante do itt Performance que se enquadram nas especificações normativas.

Tabela 3 – Características da câmara reverberante do itt Performance

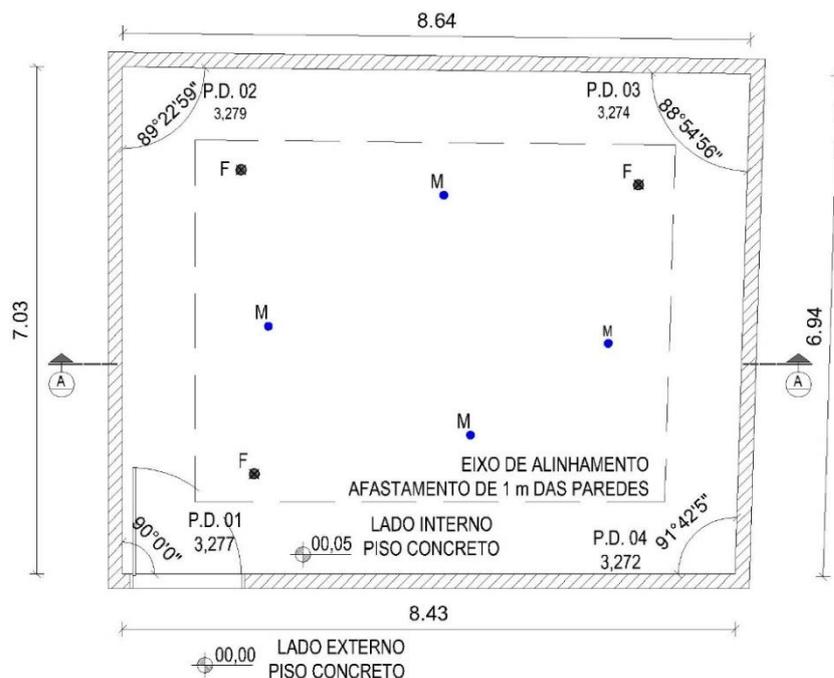
Características	Quantidades
Área do piso (m ²)	59,8
Volume total (m ³)	200,3
Área superficial (m ²)	217,9
Área total de difusores (m ²)	22,6
Quantidade de difusores (unid.)	20

Fonte: LENHART *et al.* (2019) – adaptada pelo autor

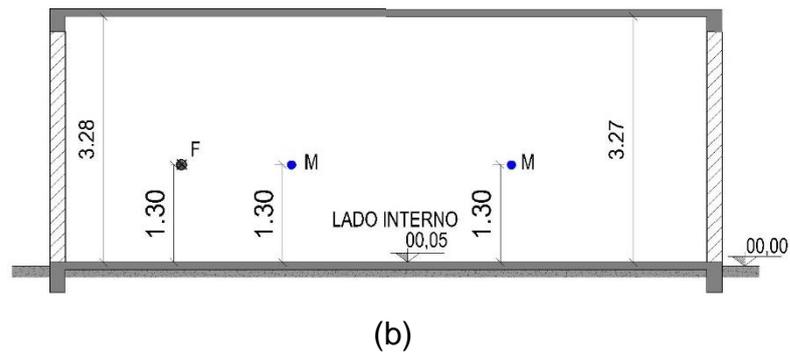
As medições foram realizadas pelo método do ruído interrompido. Foram realizadas 12 medições da curva de decaimento para cada conjunto de amostras, considerando 4 posições de microfone e 3 posições de fonte. As posições dos microfones foram distribuídas de forma que ficassem ao menos 1,5 m afastadas entre si, a no mínimo 2 m de distância da fonte sonora e afastadas ao menos 1 m de qualquer superfície da sala. As posições da fonte sonora respeitaram a distância mínima de 3 m entre si. Tanto o microfone quanto a fonte foram instalados a uma altura de 1,30 m do eixo até o piso.

A Figura 29 ilustra a planta baixa (a) e o corte (b) da câmara reverberante do itt Performance. Na planta estão indicadas possíveis posições de fonte (F) e microfone (M) e o afastamento de 1 m das paredes (linha tracejada).

Figura 29 – Planta baixa (a) e corte (b) da câmara reverberante do itt Performance



(a)

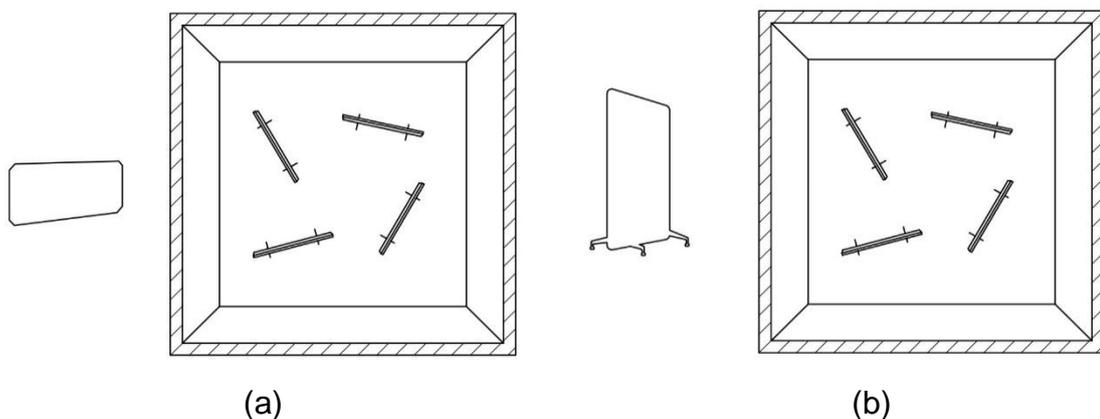


(b)
Fonte: UNISINOS (2021) – adaptado pelo autor

Seguindo as orientações da norma ISO 354:2003, as divisórias de piso e de mesa, classificadas como objetos discretos, foram montadas no laboratório da mesma maneira em que serão tipicamente instaladas, respeitando a distância mínima de 1 m de qualquer superfície da câmara reverberante e dos microfones. A montagem das divisórias dentro da câmara foi feita de acordo com as especificações da norma ISO 20189:2018 - *Acoustics — Screens, furniture and single objects intended for interior use — Rating of sound absorption and sound reduction of elements based on laboratory measurements*. As amostras foram arranjadas de forma aleatória com espaçamento mínimo de 2 m entre si. O número de amostras foi escolhido para proporcionar a maior área de absorção equivalente possível, sem exceder o espaçamento mínimo entre as amostras.

A Figura 30 (a) demonstra como as divisórias de mesa devem ser montadas dentro da câmara reverberante e a Figura 30 (b) como as divisórias de piso devem ser montadas conforme a ISO 20189:2018.

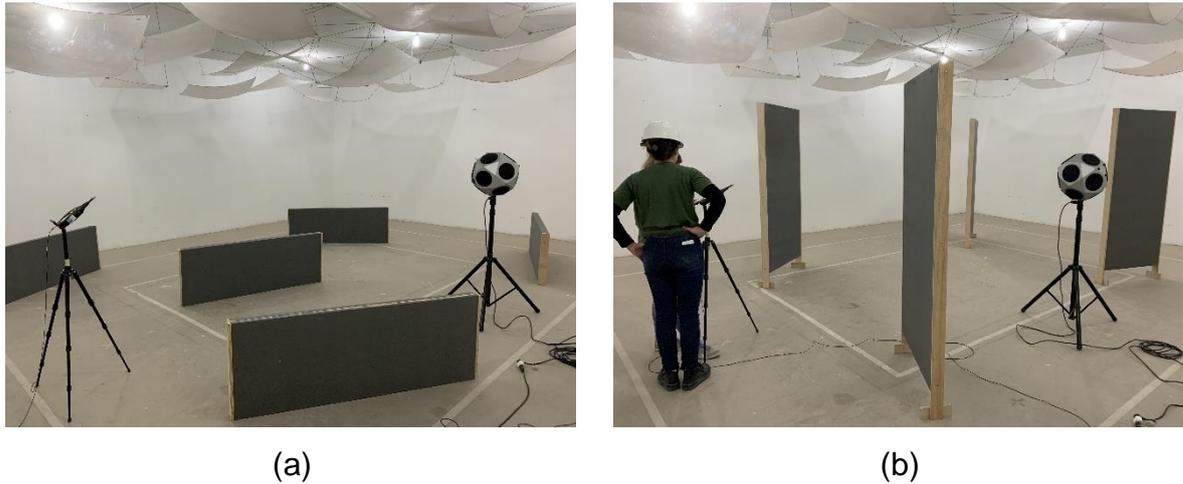
Figura 30 - Tipo de montagem das divisórias de mesa (a) e das divisórias de piso (b) em câmara reverberante



(a) (b)
Fonte: ISO 20189 (2018)

Com base nas premissas da norma ISO 20189:2018 e nas características dimensionais da câmara, foram instaladas 5 divisórias de mesa (ver Figura 31 (a)) e 4 divisórias de piso (ver Figura 31 (b)) no interior da câmara para realização das medições dos coeficientes de absorção sonora.

Figura 31 - Divisórias de mesa (a) e de piso (b) instaladas na câmara reverberante para medições dos coeficientes de absorção sonora



Fonte: Registradas pelo autor

As medições do tempo de reverberação foram realizadas primeiramente com a câmara vazia e depois com as divisórias instaladas. Após realizados os ensaios, a área de absorção sonora equivalente do conjunto de divisórias (A_T) foi calculada conforme procedimentos da norma ISO 354:2003, em bandas de terço de oitava, entre 100 Hz e 5000 Hz, conforme a Equação 1.

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo,

A_1 : Área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante vazia, em m^2 ;

A_2 : Área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante com as amostras, em m^2 ;

V : Volume da câmara reverberante, em m^3 ;

c_1 : Velocidade de propagação do som no ar na condição da câmara vazia, em m/s ;

c_2 : Velocidade de propagação do som no ar na condição da câmara com as amostras, em m/s;

T_1 : Média aritmética dos tempos de reverberação medidos em todas as posições de microfone e fonte na condição da câmara vazia, por banda de um terço de oitava, em s;

T_2 : Média aritmética dos tempos de reverberação medidos em todas as posições de microfone e fonte na condição da câmara com as amostras, por banda de um terço de oitava, em s;

m_1 : Coeficiente de atenuação de potência sonora na condição da câmara vazia, por banda de terço de oitava, em dB/m;

m_2 : Coeficiente de atenuação de potência sonora na condição da câmara com as amostras, por banda de terço de oitava, em dB/m;

De posse das áreas de absorção equivalente por bandas de terço de oitava do conjunto de amostras (A_T), a área de absorção equivalente de uma única divisória (A_{obj}) foi calculada através da divisão de A_T pelo número de amostras que compuseram cada conjunto, sendo 4 amostras das divisórias de piso e 5 amostras das divisórias de mesa.

A área de absorção equivalente em bandas de oitava de 125 Hz a 4000 Hz de uma única divisória ($A_{obj,k}$) foi calculada através da Equação 2, conforme estabelece a norma ISO 20189:2018.

$$A_{obj,k} = \frac{(A_{obj,k1} + A_{obj,k2} + A_{obj,k3})}{3} \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo,

$A_{obj,ki}$: Área de absorção sonora equivalente da frequência central da banda de um terço de oitava dentro de cada banda de k-ésima oitava.

O coeficiente de absorção sonora de uma única divisória na banda de oitava k, $\alpha_{obj,k}$, foi então determinado pela Equação 3.

$$\alpha_{obj,k} = A_{obj,k} / S \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo,

$A_{obj,k}$: Área de absorção sonora equivalente de uma única divisória em banda de oitava, calculada através da Equação 2;

S: Área total da superfície exposta do objeto único na medição em câmara reverberante, considerando a condição real de montagem.

A área total da superfície (S) foi calculada de acordo com uma representação acústica simplificada, considerando o menor cubóide formado pelo objeto, ou seja, desconsiderando a área dos montantes de sustentação que ficam abaixo do painel principal no caso das divisórias de piso. No caso das divisórias de mesa que foram apoiadas diretamente sobre a superfície, a face inferior foi desconsiderada.

3.3.2 Calibração da potência sonora da OSS

Para realização das medições de parâmetros acústicos em escritórios de planta livre, a norma ISO 3382-3:2022 requer que a potência sonora da OSS (Fonte Sonora Omnidirecional) seja determinada através de ensaio realizado em câmara reverberante, seguindo os procedimentos da norma ISO 3741:2010 - *Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for reverberation test rooms*.

O ensaio foi realizado na câmara reverberante do itt Performance. Primeiramente, foram medidas a temperatura e a pressão atmosférica no interior da câmara. A área total da superfície da câmara reverberante foi determinada conforme dados apresentados na Tabela 3. Posteriormente, foram realizadas 12 medições do nível de pressão sonora, combinando 2 posições de fonte e 6 posições de microfone, respeitando o espaçamento mínimo de 1,8 m entre ambos. Cada medição teve duração de 30 segundos, conforme estabelece a norma ISO 3741:2010. A potência sonora da OSS foi calculada através da Equação 4:

$$L_W = \overline{L_{p(ST)}} + \left\{ 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB} + 4,34 \frac{A}{S} \text{ dB} + 10 \lg \left(1 + \frac{Sc}{8Vf} \right) \text{ dB} + C_1 + C_2 - 6 \text{ dB} \right\} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo,

$L_{p(ST)}$: média corrigida do nível de pressão sonora médio em bandas de um terço de oitava na câmara reverberante com a fonte sonora sob teste em operação, em dB;

A: área de absorção equivalente da sala, em m²;

A_0 : 1 m²;

S: área total da superfície da câmara reverberante, em m²;

c : a velocidade de propagação do som, em m/s, à temperatura ambiente, em graus Celsius, do ar na câmara reverberante no momento da medição;

V : volume da câmara reverberante, em m^3 ;

f : banda de frequência medida, em Hz;

C_1 e C_2 : coeficientes de correção em função das características de impedância do ar sob as condições meteorológicas (temperatura e pressão atmosférica) no local e no momento das medições, em dB.

O cálculo da potência sonora foi realizado com base na área de absorção equivalente da câmara reverberante. O nível de potência sonora da OSS foi determinado em bandas de oitava para posteriormente ser utilizado no cálculo do nível de pressão sonora da OSS a 1,0 m de distância em campo livre corrigido com o ruído de fundo, dado necessário para determinação dos descritores acústicos de valor único conforme procedimento de cálculo da norma ISO 3382-3:2022 descrito na seção 3.5.

3.4 Medições acústicas em campo

A qualidade acústica de um escritório de planta livre é diretamente influenciada pelos objetos presentes no ambiente. Para verificar a influência das divisórias nos descritores acústicos do escritório do Portal da Inovação, foram realizados ensaios in loco sem e com a presença das mesmas, conforme os procedimentos da norma ISO 3382-3:2022.

A norma ISO 3382-3:2022 estabelece que em cada posição de microfone devem ser realizadas quatro medições:

- r - distância entre OSS e microfone desconsiderando os obstáculos;
- $L_{p,OSS}$ – nível de pressão sonora equivalente não ponderado de ruído de banda larga produzido pela OSS;
- $L_{p,B}$ – nível de pressão sonora equivalente não ponderado do ruído de fundo;
- STI – índice de transmissão da fala.

As medições foram realizadas em bandas de oitava de 125 Hz a 8.000 Hz. Os dados extraídos nas medições foram utilizados para o cálculo e determinação dos descritores de valor único, conforme procedimento descrito na seção 3.5. Além desses dados, o tempo de reverberação da sala também foi medido, conforme procedimentos da norma NBR ISO 3382-2:2017.

Os equipamentos utilizados nas medições em campo foram os mesmos utilizados nas medições em laboratório, citados anteriormente na seção 3.3.1. Além dos equipamentos do laboratório de acústica do itt Performance, também foram utilizados uma interface de áudio modelo Focusrite Scarlett 2i4 e um notebook com o software ARTA versão 1.9.4.1 instalado para geração dos sinais acústicos, realização das medições e processamento dos dados.

Antes de iniciar a realização dos ensaios, a temperatura e umidade relativa do ar interno foram medidas utilizando um termo-higrômetro devidamente calibrado. A temperatura medida foi de 21,9 °C e a umidade relativa do ar estava em 67,7%, dados que se mantiveram relativamente constantes durante os ensaios devido ao sistema de climatização.

Os ensaios foram realizados em 3 configurações diferentes de sala. Primeiramente, foram realizadas medições com a sala vazia (SV). Posteriormente, todas as medições foram repetidas somente com as divisórias de mesa instaladas (SDM) e por último com as divisórias de piso e de mesa instaladas (SDPM). As mesmas posições de fonte sonora e microfone foram utilizadas nas três configurações para possibilitar a comparação dos resultados.

Para cada combinação de fonte e microfone, foi adotado um procedimento de medição que se repetiu ao longo de todos ensaios. Primeiramente, foi feita a medição do tempo de reverberação, seguida da medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo e da medição do nível de pressão sonora do ruído de banda larga produzido pela OSS, dados então utilizados para cálculo e determinação dos valores de STI.

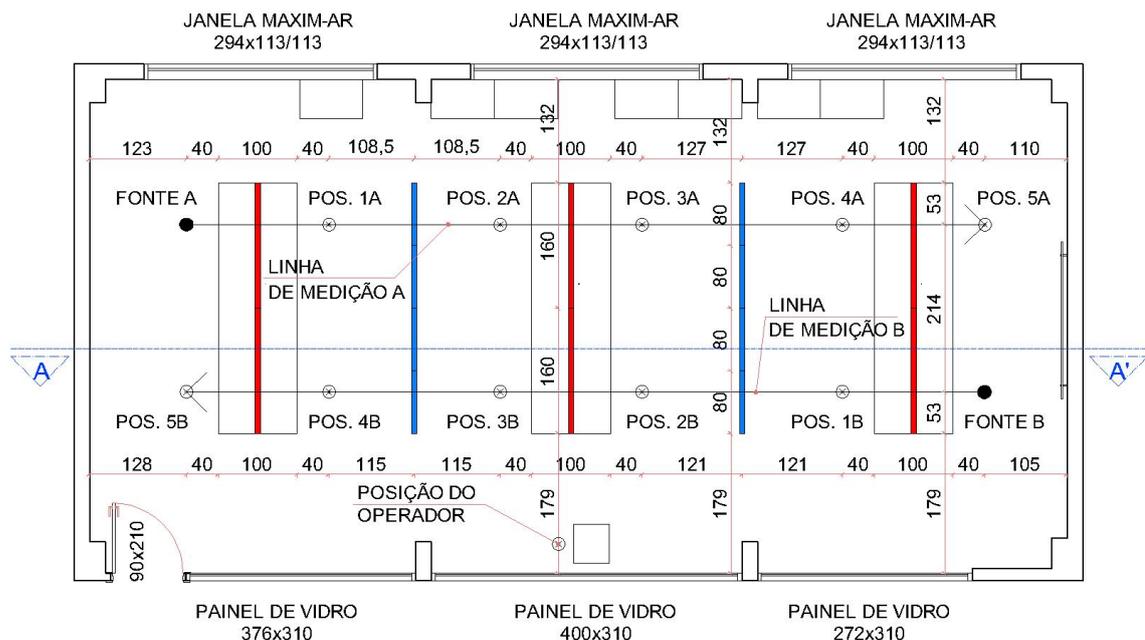
O tempo de reverberação foi medido através do método da resposta impulsiva. A medição da resposta impulsiva foi realizada através do método da varredura exponencial de senos, conforme procedimentos da norma NBR ISO 3382-2:2017. O ruído impulsivo e o processamento dos dados foram executados através do software ARTA. Os dados do tempo de reverberação foram extraídos em bandas de oitava de 125 Hz a 8.000 Hz.

O nível de pressão sonora equivalente não ponderado do ruído de fundo e do ruído de banda larga emitido pela OSS também foram medidos através do software ARTA. Como esses dados são utilizados para cálculo do STI e visto que a principal fonte sonora presente em escritórios é a fala, o sinal emitido pela fonte deve representar um conteúdo espectral que abrange a faixa de frequências da voz humana, conforme especificações da norma IEC 60628-16:2020. O software ARTA

possui a opção de gerar os sinais que simulam a voz masculina e feminina separadamente, como eram determinados pela versão anterior da norma IEC 60268-16:2011. Porém, o sinal utilizado no presente trabalho abrange um conteúdo espectral único, sem separação de gêneros, conforme determina a última atualização da norma IEC 60268-16:2020. Os valores de STI foram calculados através do software ARTA.

As medições foram realizadas ao longo de linhas retas imaginárias que cruzam as estações de trabalho, conforme procedimentos da norma ISO 3382-3:2022. Como a forma da sala não possibilita linhas de medição em diferentes direções, foram traçadas duas linhas na mesma direção, mas em sentidos contrários. A linha de medição A foi traçada nas estações de trabalho próximas às janelas e a linha de medição B foi traçada próxima aos painéis de vidro que dividem a sala com o corredor. A fonte sonora foi posicionada nas estações de trabalho mais próximas das paredes do fundo e o microfone foi posicionado nas 5 estações de trabalho que seguem a linha de medição, sendo que a primeira posição de microfone foi determinada na estação de trabalho logo em frente à fonte sonora. A planta baixa (a) e o corte (b) apresentados na Figura 32 mostram as linhas de medição e as posições adotadas para fonte, microfone e divisórias de piso (azul) e de mesa (vermelho).

Figura 32 – Planta baixa (a) e corte AA' (b) do escritório com posições de fonte, microfone e divisórias de piso (azul) e de mesa (vermelho) adotadas



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor

O microfone e a fonte foram posicionados a uma distância de 40 cm das mesas, sendo o espaçamento mínimo recomendado pela norma ISO 3382-3:2022. Ambos foram instalados a 1,20 m de altura em relação ao piso. A distância mínima de 1 m entre a fonte sonora e as paredes da sala foi respeitada. Ao verificar as medidas da sala, foi constatado que as mesas não estavam alinhadas. Como as mesmas estavam fixadas no chão e não podiam ser ajustadas, foram adotadas pequenas diferenças nas distâncias entre fonte e microfone de uma linha de medição em relação à outra, conforme indica a Tabela 4.

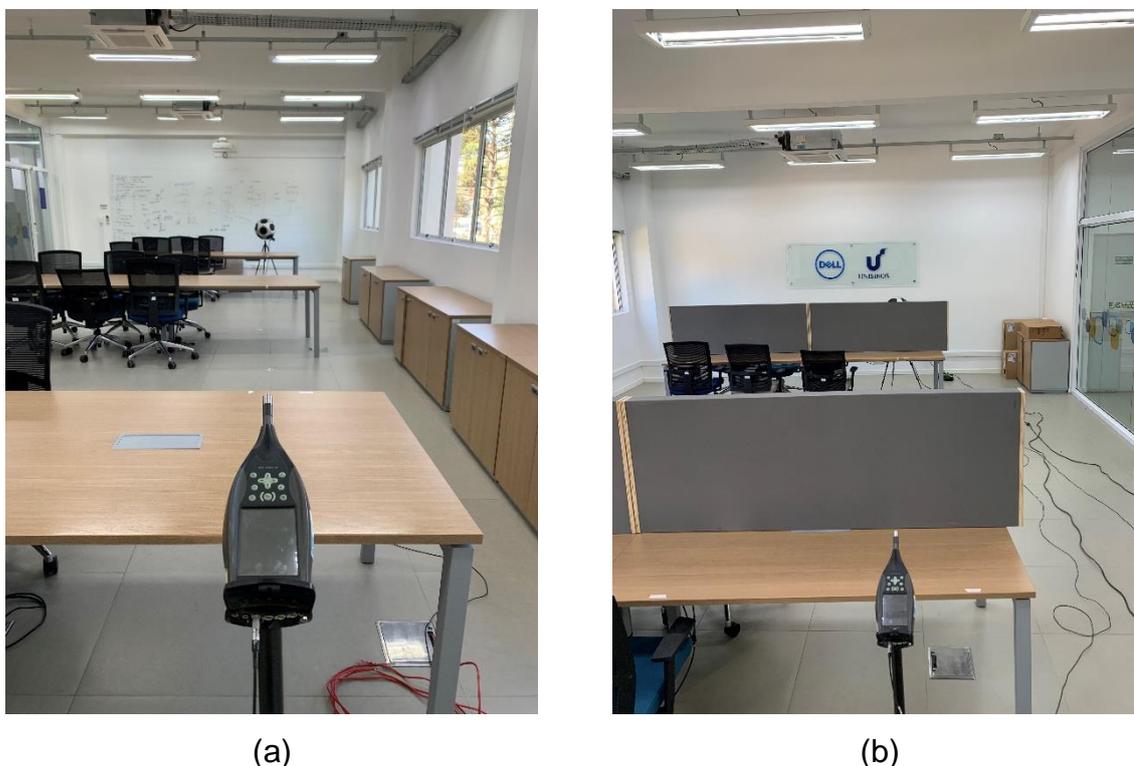
Tabela 4 – Distâncias entre fonte e posições dos microfones para ambas linhas de medição

Linha de medição	Distância entre fonte e microfone (m)				
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5
A	1,80	3,97	5,77	8,31	10,11
B	1,80	4,22	6,02	8,32	10,12

Fonte: Elaborada pelo autor

Os equipamentos de climatização foram mantidos ligados, em modo de operação normal ao uso cotidiano e com o ventilador na velocidade alta ao longo de todos os ensaios. As mesas, cadeiras e armários também foram mantidos na posição original, com exceção do móvel onde ficaram apoiados os equipamentos de medição. As cadeiras foram afastadas da linha de medição durante as medições, conforme ilustra Figura 33.

Figura 33 - Medições sendo realizadas com a sala vazia (a) e com as divisórias de mesa instaladas (b)



(a)

(b)

Fonte: Registrada pelo autor

Durante o desenvolvimento do presente trabalho, o escritório estava em desuso havia alguns meses e, portanto, alguns elementos de mobiliário e equipamentos como computadores, impressoras e uma televisão estavam provisoriamente posicionados na sala. Por conta disso, para a realização das medições optou-se pela retirada dos mesmos, mantendo na sala apenas as mesas, cadeiras e armários conforme visto na Figura 33.

Devido à limitação da extensão dos cabos, um operador permaneceu no interior da sala durante todas medições. A posição do operador está indicada na planta baixa da Figura 32 e ilustrada na Figura 34. Com exceção da presença do operador, a sala permaneceu desocupada ao longo dos ensaios.

Figura 34 - Operador realizando os ensaios no interior do escritório



Fonte: Registrada pelo colega do autor

3.5 Equações para caracterização dos descritores acústicos

Os descritores de valor único determinados pela norma ISO 3382-3:2022 para avaliação da qualidade acústica de escritórios de planta livre são a taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,s}$), o nível de pressão sonora da fala ponderado em A, a uma distância de 4 m ($L_{p,A,S,4\text{ m}}$), o raio de conforto (r_C) e o raio de distração (r_D). Para obter esses resultados, uma série de fórmulas deve ser aplicada com base nos dados extraídos das medições.

O método convencional da norma ISO 3382-3:2022 foi adotado para determinação da taxa de decaimento espacial da fala. Primeiramente, o nível de pressão sonora a distância de 1 m da OSS em campo livre, $L_{p,oss,1\text{m},ff}$, foi calculado a partir da Equação 5:

$$L_{p,oss,1\text{m},ff,i} = L_{W,oss,i} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi \times 1,0^2} \right) \text{dB} \approx L_{W,oss,i} - 11 \text{ dB} \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo,

$L_{W,oss,i}$: nível de potência sonora da OSS em bandas de oitava, obtido através da Equação 4;

i : denota a banda de oitava.

Os dados de $L_{W,oss,i}$ foram medidos anteriormente em câmara reverberante, conforme descrito na seção 3.3.2 do presente trabalho. O nível de pressão sonora a

distância de 1 m da OSS em campo livre ($L_{p,oss,1\ m,ff,i}$) representa a radiação sonora média em todas as direções da OSS. A OSS calibrada foi então colocada em uma posição de fonte selecionada e o nível de pressão sonora emitido pela mesma foi medido e determinado nas N posições de medição localizadas na linha de medição. A atenuação $D_{n,i}$ (dB) do ruído de banda larga produzido pela OSS na posição de medição n na distância r_n foi determinada pela Equação 6.

$$D_{n,i} = L_{p,oss,1\ m,ff,i} - L_{p,oss,n,i} \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo,

$L_{p,oss,1\ m,ff,i}$: nível de pressão sonora da OSS a 1,0 m de distância em campo livre, corrigido com ruído de fundo, de acordo com a Equação 5;

$L_{p,oss,n,i}$: nível de pressão sonora produzido pela OSS e medido na posição n .

Ao medir o nível de pressão sonora nas N posições, a norma estabelece que deve ser feita a correção com o ruído de fundo, pois o resultado das medições é uma sobreposição do ruído de fundo com o sinal emitido pela fonte. Caso seja necessário, o nível de pressão sonora emitido pela OSS deve ser corrigido para o ruído de fundo, conforme apresentado pela Equação 7:

$$L_{p,oss} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{L_{p,tot}/10} - 10^{L_{p,B}/10} \right) \text{ dB} \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo,

$L_{p,oss}$: nível de pressão sonora da OSS corrigido com ruído de fundo;

$L_{p,B}$: nível de pressão sonora do ruído de fundo (OSS desligada);

$L_{p,tot}$: sobreposição do nível de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído de banda larga produzido pela OSS, em dB.

É importante destacar que o nível de potência sonora da fonte deve ser suficientemente alto para que a diferença entre $L_{p,tot}$ e $L_{p,B}$ seja maior do que 6 dB em todas bandas de frequência analisadas. Caso contrário, a norma exige que a potência da fonte sonora seja elevada, tornando necessária a repetição do processo de calibração e das medições do nível de pressão sonora.

O nível de pressão sonora normal da fala em campo livre a 1 m de distância ($L_{p,S,1m,ff,i}$) é estabelecido pela norma ISO 3382-3:2022, conforme Tabela 5:

Tabela 5 - SPL não ponderado da fala omnidirecional a 1,0 m de distância da fonte sonora em campo livre

n.º da banda	Frequência	SPL da fala para OSS	Ponderação em A
i	f Hz	$L_{p,S,1m,ff}$ dB re 20 μ Pa	A dB
1	125	49,9	-16,1
2	250	54,3	-8,6
3	500	58	-3,2
4	1000	52	0
5	2000	44,8	1,2
6	4000	38,8	1
7	8000	33,5	-1,1
Ponderado em A		57,4	

Fonte: ISO 3382-3:2022 – adaptada pelo autor

Para calcular o nível de pressão sonora normal da fala a uma distância n ($L_{p,S,n,i}$) para cada banda de oitava, a Equação 8 foi utilizada:

$$L_{p,S,n,i} = L_{p,S,1m,ff,i} - D_{n,i} \quad \text{Eq. 8}$$

O nível de pressão sonora geral da fala ponderado em A na posição n ($L_{p,A,S,n}$) foi calculado através da soma logarítmica dos níveis de pressão sonora de cada banda de frequência com seus respectivos valores da ponderação A indicados na Tabela 5, conforme Equação 9:

$$L_{p,A,S,n} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^7 10^{\frac{L_{p,S,n,i} + A_i}{10}} \right) \text{dB} \quad \text{Eq. 9}$$

Com os valores de $L_{p,A,S,n}$ calculados para cada posição n , o método dos mínimos quadrados foi então aplicado para o cálculo da taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,S}$), conforme Equação 10:

$$D_{2,S} = -\log_{10} (2) \cdot \left(\frac{N \cdot \sum_{n=1}^N \left[L_{p,A,S,n} \cdot \log_{10} \left(\frac{r_n}{r_0} \right) \right] - \left[\sum_{n=1}^N L_{p,A,S,n} \right] \cdot \left[\sum_{n=1}^N \log_{10} \left(\frac{r_n}{r_0} \right) \right]}{N \cdot \sum_{n=1}^N \left[\log_{10} \left(\frac{r_n}{r_0} \right) \right]^2 - \left[\sum_{n=1}^N \log_{10} \left(\frac{r_n}{r_0} \right) \right]^2} \right) \text{dB} \quad \text{Eq. 10}$$

Sendo,

N : número total de posições de medição;

r_n : distância entre o eixo da OSS e a posição de medição n ;

r_0 : distância de referência constante, $r_0 = 1,0$ m;

O nível de pressão sonora da fala ponderado em A, a 4 m de distância da fonte ($L_{p,A,S,4m}$) é determinado a partir da linha de regressão linear do decaimento espacial do SPL da fala ponderado em A. Seu valor pode ser calculado através da equação gerada pela linha de regressão ou através da Equação 11:

$$L_{p,A,S,4m} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N L_{p,A,S,n} + D_{2,S} \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log_2 \left(\frac{r_n}{4} \right) \quad \text{Eq. 11}$$

O raio de conforto (r_C) representa a distância mais curta do eixo da OSS onde o nível de pressão sonora ponderado em A é inferior a 45 dB e foi calculado a partir dos valores de $D_{2,S}$ e $L_{p,A,S,4m}$, conforme Equação 12:

$$r_C = 2^{(L_{p,A,S,4m} - 45 + 2 \cdot D_{2,S}) / D_{2,S}} \quad \text{Eq. 12}$$

O índice de transmissão de fala (STI) para cada posição de medição foi determinado de acordo com a norma IEC 60268-16:2020. O STI é definido a partir da função de transferência de modulação (MTF). O valor é calculado a partir das bandas de oitava de 125 Hz a 4000 Hz e para 14 frequências de modulação de 0,63 Hz a 12,5 Hz (bandas de terceira oitava). Os cálculos foram realizados através do software ARTA utilizando o método indireto que consiste em utilizar a resposta impulsiva e a integral de energia direta (integral de Schroeder) para derivar a função de transferência de modulação (MTF).

O raio de distração (r_D) que indica a menor distância do eixo da OSS onde o STI é inferior a 0,50 foi obtido através da equação gerada pela linha de regressão linear do gráfico que relaciona o STI medido e a distância de cada posição de medição em relação a OSS.

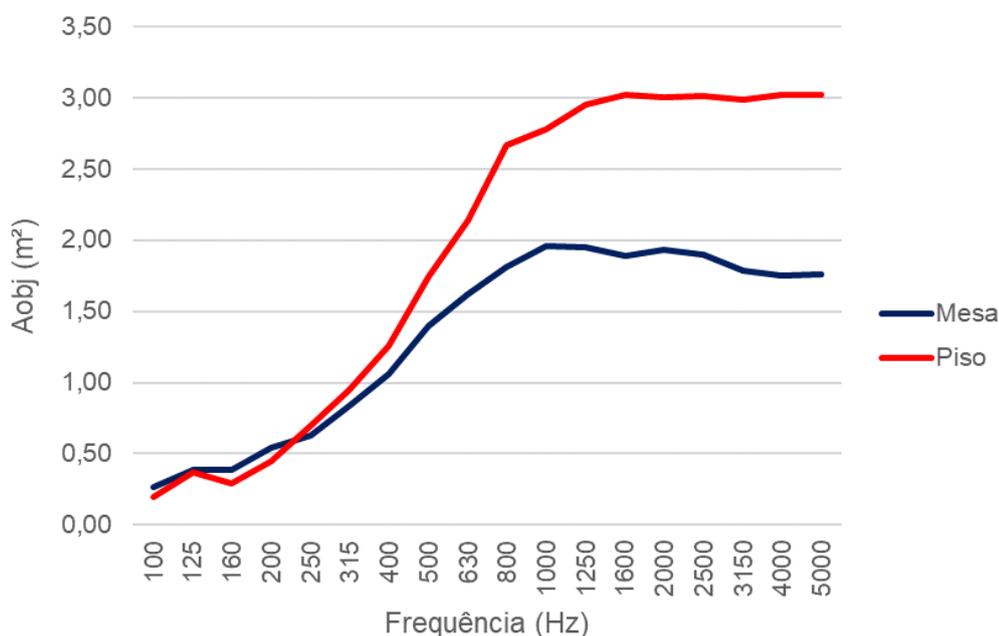
4 RESULTADOS

O presente capítulo contempla a apresentação dos resultados obtidos através do programa experimental adotado e a análise dos mesmos com base nos conceitos apresentados no referencial bibliográfico, assim como a comparação com resultados de pesquisas semelhantes visando corroborar a avaliação da eficiência das divisórias parciais no condicionamento acústico de escritórios de planta livre.

4.1 Características acústicas das divisórias e da OSS

As áreas de absorção sonora equivalente e os coeficientes de absorção sonora das divisórias foram determinados para caracterização acústica desses elementos. Os resultados obtidos para a área de absorção sonora equivalente das divisórias de piso e de mesa em bandas de terço de oitava estão presentes no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Área de absorção equivalente por divisória em bandas de terço de oitava



Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas do Gráfico 1 indicam que as divisórias de piso oferecem uma área de absorção por unidade superior às de mesa, principalmente acima da banda de 500 Hz, o que era esperado devido às diferenças dimensionais das amostras. Porém, como as divisórias de piso e de mesa foram produzidas com a mesma composição de

materiais, elas apresentaram resultados similares para os coeficientes de absorção sonora por bandas de oitava, conforme indicam os dados da Tabela 6 e do Gráfico 2.

Tabela 6 – Coeficientes de absorção sonora por divisória em bandas de oitava

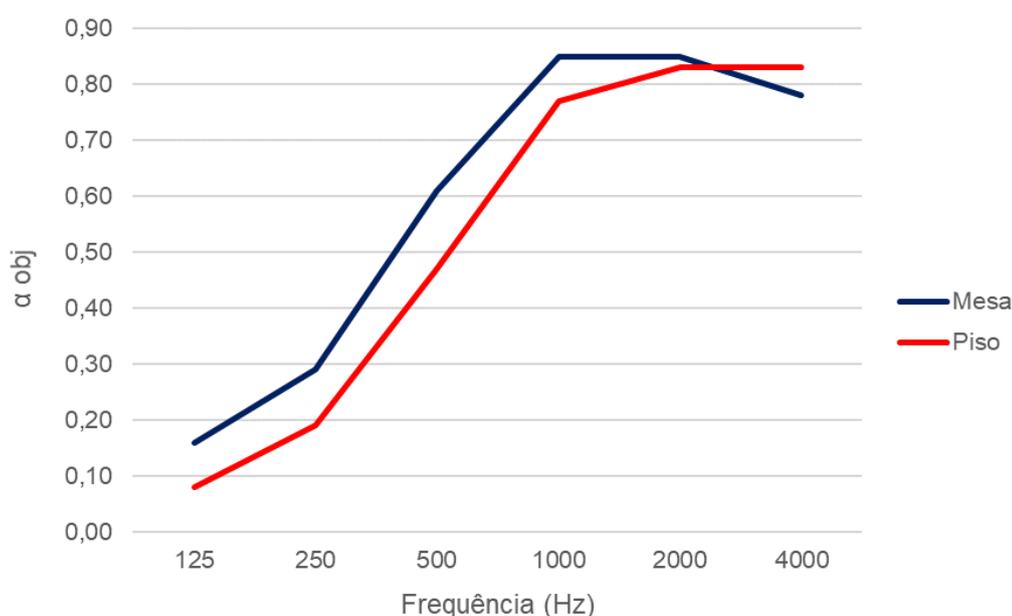
Frequência (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
α_{obj}	Divisória de Mesa	0,16	0,29	0,61	0,85	0,85	0,78
	Divisória de Piso	0,08	0,19	0,47	0,77	0,83	0,83

Fonte: Elaborada pelo autor

As divisórias de mesa apresentaram coeficientes de absorção sonora mais altos nas bandas de 125 Hz a 1000 Hz. Essa variação pode estar relacionada tanto à forma como as divisórias foram montadas no interior da câmara reverberante quanto à diferença das áreas de exposição das peças de madeira de estruturação, considerando que as divisórias de mesa foram apoiadas diretamente sobre uma superfície rígida (piso), enquanto as divisórias de piso ficaram afastadas da superfície devido aos montantes de sustentação.

Observando graficamente as curvas ascendentes dos coeficientes de absorção por bandas de oitava no sentido das baixas para altas frequências, conforme Gráfico 2, é possível identificar um comportamento típico de material poroso de média densidade.

Gráfico 2 – Coeficientes de absorção sonora por divisória em bandas de oitava



Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores do coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) foram calculados de acordo com os procedimentos da norma ISO 11654:1997. Ambas divisórias se enquadraram na Classe D, com $\alpha_w = 0,55$ para as divisórias de mesa e $\alpha_w = 0,45$ para as divisórias de piso. Porém, segundo a norma ISO 20189:2018, os valores de α_w não devem ser utilizados para avaliação de objetos únicos e, portanto, esses dados são apresentados no presente trabalho apenas para conhecimento técnico.

A potência sonora da OSS em bandas de oitava ($L_{W,oss,i}$), necessária para os cálculos dos descritores de valor único da norma ISO 3382-3:2022, foi obtida através dos ensaios realizados em câmara reverberante e da aplicação da Equação 4. Com base nos resultados obtidos pela Equação 4, o SPL a uma distância de 1 m da OSS em campo livre ($L_{p,oss,1m,ff}$) por banda de oitava foi calculado conforme a Equação 5. Os resultados obtidos para esses dois parâmetros estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 – Nível de potência sonora da OSS em bandas de oitava e SPL a uma distância de 1 m da OSS em campo livre em bandas de oitava

f (Hz)	$L_{W,oss}$ (dB)	$L_{p,oss,1m,ff}$ (dB)
125	104,0	93,0
250	100,8	89,8
500	98,8	87,8
1000	97,4	86,4
2000	98,1	87,1
4000	95,0	84,0
8000	86,7	75,7

Fonte: Elaborado pelo autor

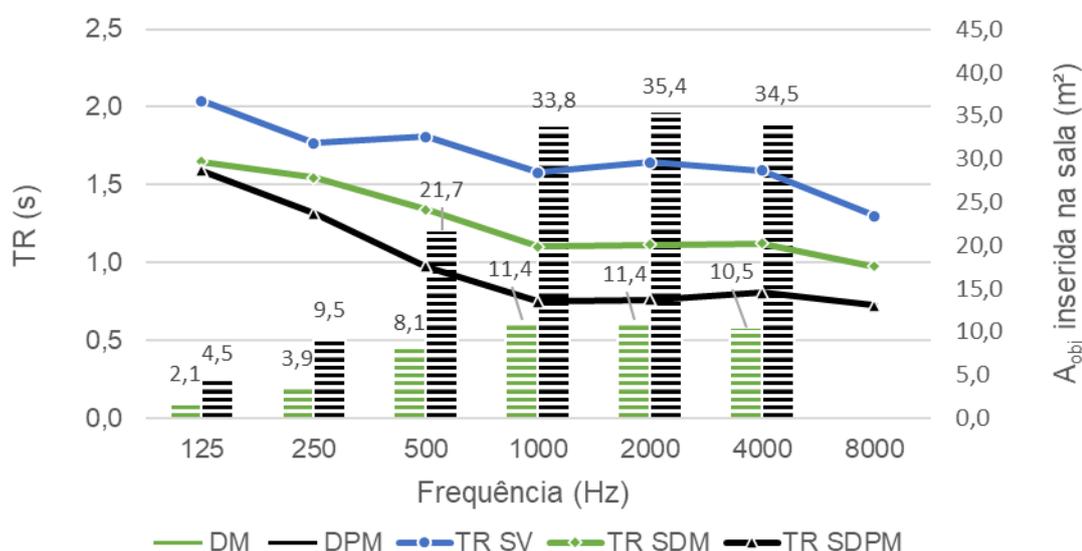
A partir dos resultados apresentados na Tabela 7, é possível verificar que os valores adotados para o SPL a uma distância de 1 m da OSS em campo livre são bastante elevados. A calibração da OSS foi realizada com uma potência elevada para garantir que o SPL do ruído de banda larga gerado pela OSS fosse suficientemente alto em cada banda de oitava para que excedesse o SPL do ruído de fundo em pelo menos 6 dB na posição de medição mais distante da OSS, conforme exige a norma ISO 3382-3:2022.

4.2 Estudo experimental em escritório de planta livre

O tempo de reverberação (TR) foi medido no escritório escolhido para o estudo experimental considerando 3 configurações diferentes de sala: sala vazia (SV), sem a presença das divisórias; sala somente com as divisórias de mesa instaladas (SDM); sala com divisórias de piso e de mesa instaladas (SDPM).

Devido às propriedades acústicas dos materiais de revestimento das superfícies da sala, que são predominantemente reflexivas, o tempo de reverberação medido na configuração SV apresentou valores mais elevados. A instalação das divisórias resultou em uma redução no tempo de reverberação da sala, especialmente nas médias e altas frequências. O Gráfico 3 apresenta as curvas do tempo de reverberação médio medido nas 3 configurações de sala em bandas de oitava, combinadas com a área de absorção sonora equivalente inserida nas configurações com as divisórias de mesa (DM) e com as divisórias de piso e de mesa (DPM).

Gráfico 3 – Tempo de reverberação médio nas 3 configurações de sala e áreas de absorção inseridas pelas divisórias de mesa (DM) e pelas divisórias de piso e de mesa (DPM) em bandas de oitava



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao observar as curvas do Gráfico 3, percebe-se que na configuração SDM houve redução do TR em todas as bandas de frequência em relação aos resultados medidos na configuração SV. A adição das divisórias de piso na configuração SDPM

gerou mudanças mais significativas a partir da banda de 500 Hz em relação aos resultados obtidos na configuração SDM, devido às propriedades de absorção sonora do material poroso de média densidade da sua composição.

Percebe-se que nas baixas frequências, principalmente na banda de 125 Hz, a diferença no TR na configuração SDM e SDPM variou pouco, mesmo tendo sido acrescido o dobro de área de absorção sonora. Isso pode ser devido a uma incerteza maior nessas bandas, mas também mostra a dificuldade em se controlar baixas frequências em ambientes fechados.

Os valores do tempo de reverberação médio da sala em bandas de oitava e o TR médio entre as bandas de 250 Hz e 4000 Hz ($TR_{250\text{Hz}-4\text{kHz}}$) para as 3 configurações de sala são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Tempo de reverberação médio medido nas 3 configurações de sala em bandas de oitava

Frequência [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$TR_{250\text{Hz}-4\text{kHz}}$
TR médio da sala vazia	2,0	1,8	1,8	1,6	1,6	1,6	1,3	1,7
TR médio da sala com divisórias de mesa	1,6	1,5	1,3	1,1	1,1	1,1	1,0	1,2
TR médio da sala com divisórias de piso e de mesa	1,6	1,3	1,0	0,7	0,8	0,8	0,7	0,9

Fonte: Elaborada pelo autor

Assim como o tempo de reverberação, o nível de pressão sonora médio do ruído de fundo na ponderação A ($L_{p,A,B}$), produzido predominantemente pelos equipamentos de climatização, também sofreu redução conforme aumento da quantidade de divisórias na sala, de acordo com os dados da Tabela 9.

Tabela 9 – SPL médio do ruído de fundo ponderado em A ($L_{p,A,B}$) para as 3 configurações de sala

Configuração da sala	$L_{p,A,B}$ (dB)
Sala vazia (SV)	53,55
Sala com divisórias de mesa (SDM)	52,16
Sala com divisórias de piso e de mesa (SDPM)	50,60

Fonte: Elaborada pelo autor

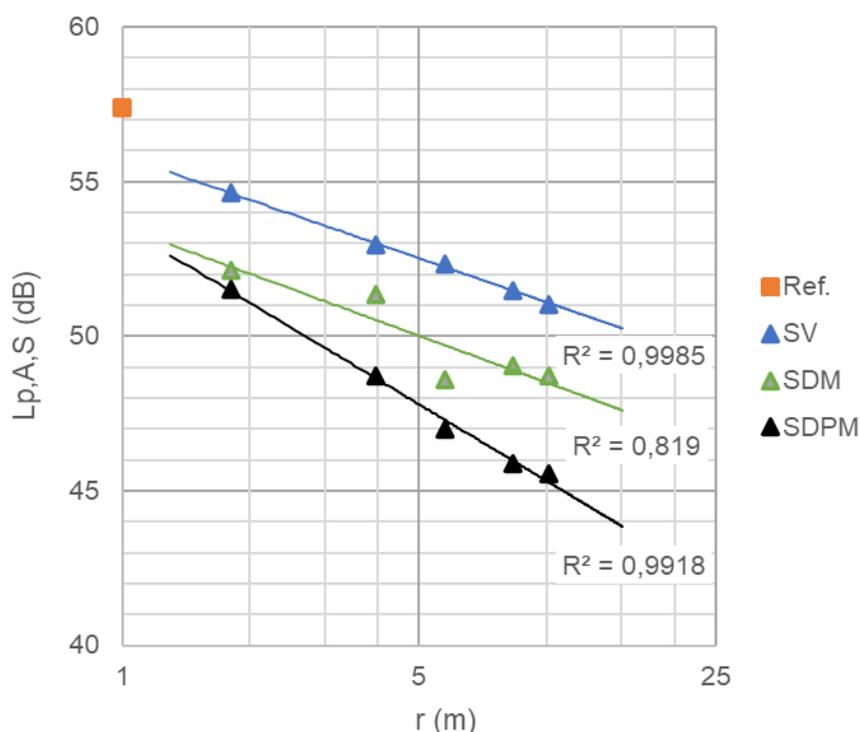
A instalação das divisórias de mesa na configuração SDM resultou em uma redução de aproximadamente 1 dB no $L_{p,A,B}$ em relação à configuração SV, enquanto na configuração SDPM o $L_{p,A,B}$ reduziu aproximadamente 3 dB em relação à configuração SV.

A redução do $L_{p,A,B}$ é justificada tanto pela redução do tempo de reverberação, causada pela atenuação da energia sonora refletida devido à capacidade de absorção das divisórias, quanto pelo bloqueio da transmissão direta do som entre os equipamentos de climatização e as estações de trabalho posicionadas atrás das divisórias.

As curvas de decaimento espacial dos valores do SPL da fala ponderado em A ($L_{p,A,S}$) e do STI para ambas linhas de medição foram obtidas através da plotagem dos valores medidos em cada posição e do traçado de linhas de regressão ajustadas, conforme determina a norma ISO 3382-3:2022. Esses dados foram expressos por meio do Gráfico 4 ao Gráfico 7. Foi plotado também no Gráfico 4 e no Gráfico 5 o valor de referência de 57,4 dB que representa o SPL normal da fala em campo livre a 1 m de distância na ponderação A, de acordo com a Tabela 5.

O nível de pressão sonora medido em uma sala é resultado da soma do som transmitido de forma direta entre fonte e receptor e da parcela de energia sonora refletida nas superfícies da sala. Na configuração da sala vazia, o decaimento do $L_{p,A,S}$ foi determinado predominantemente pela distância entre fonte e microfone. Nas configurações da sala com as divisórias instaladas, o decaimento do $L_{p,A,S}$ foi determinado também pelo bloqueio da transmissão direta do som entre fonte e receptor e pela área extra de absorção sonora proporcionados pelas divisórias. O decaimento do $L_{p,A,S}$ medido na linha de medição A para as 3 configurações de sala é apresentado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - SPL da fala ponderado em A medido na linha de medição A para as 3 configurações de sala



Fonte: Elaborado pelo autor

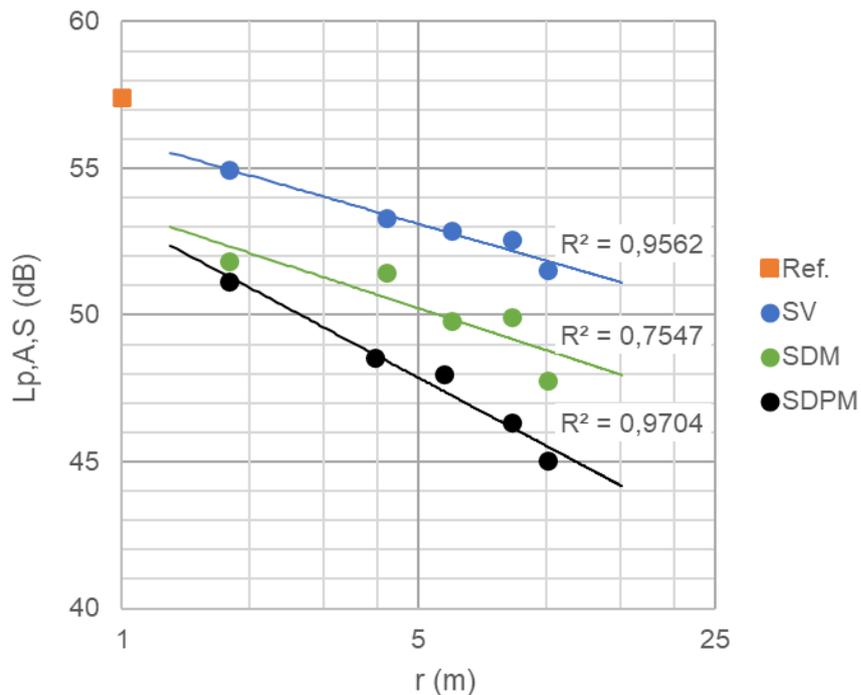
A partir dos dados apresentados no Gráfico 4 é possível verificar que, para as configurações SV e SDPM, os coeficientes de determinação (R^2) entre os resultados medidos e a linha de regressão ajustada são bastante elevados, indicando um decaimento espacial do som mais homogêneo. Já na configuração SDM, os resultados das medições por posição foram mais dispersos, resultando em um coeficiente de determinação menor.

Para a configuração SDM, o decaimento do $L_{p,A,S}$ medido entre as posições 1A e 2A foi menos expressivo do que o decaimento entre as posições 2A e 3A. Ainda, é possível notar que o $L_{p,A,S}$ medido na posição 4A foi mais elevado que na posição 3A, apesar de estar mais distante. Na posição 5A o $L_{p,A,S}$ medido também foi mais elevado que na posição 3A, o que pode estar associado à proximidade entre essa estação de trabalho e a parede reflexiva do fundo da sala.

O coeficiente de determinação inferior constatado na configuração SDM está ligado ao efeito de difração proporcionado pelas divisórias. Somente com as divisórias de mesa instaladas, as posições 1, 3 e 5 foram beneficiadas pelas zonas de sombra acústica geradas pela proximidade das divisórias, enquanto nas posições 2 e 4 a

atenuação das divisórias de mesa não foi tão efetiva. Essa diferença no coeficiente de determinação também pode ser verificada nos resultados do $L_{p,A,S}$ medidos na linha de medição B, apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - SPL da fala ponderado em A medido na linha de medição B para as 3 configurações de sala



Fonte: Elaborado pelo autor

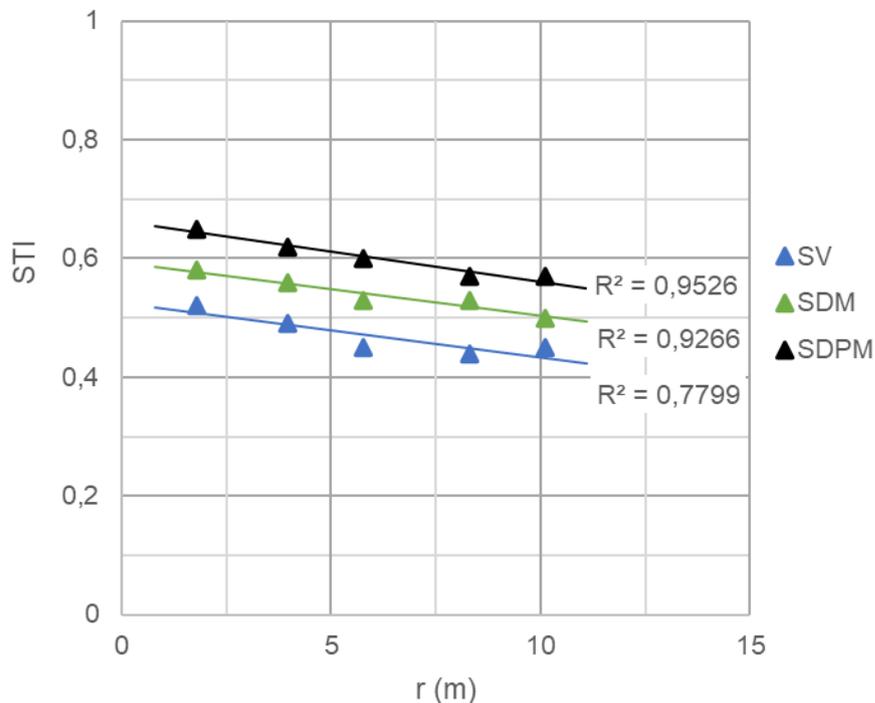
Na linha de medição B, o resultado do $L_{p,A,S}$ medido na posição 4B também foi superior ao medido na posição 3B. Porém, o resultado do $L_{p,A,S}$ medido na posição 5B não foi mais elevado que nas posições mais próximas da fonte, possivelmente devido à distância entre a posição 5B e a parede do fundo ser maior em comparação com a posição 5A e também pela presença da porta de entrada que, por não ter vedações no contorno, pode ter absorvido uma parcela da energia sonora (ver Figura 32).

A partir dos dados apresentados no Gráfico 4 e no Gráfico 5 é possível afirmar que a instalação das divisórias contribuiu para o decaimento espacial do $L_{p,A,S}$. Os resultados indicam que na configuração SDM houve redução do $L_{p,A,S}$ em todas posições em relação à configuração SV. Porém, a inclinação das linhas de regressão aponta que a instalação somente das divisórias de mesa proporcionou pequeno impacto no decaimento espacial do $L_{p,A,S}$. Ao adicionar as divisórias de piso, além da redução dos níveis de pressão sonora captados em cada posição, é possível perceber

uma inclinação mais acentuada da linha de regressão, indicando que na configuração SDPM o decaimento espacial do $L_{p,A,S}$ foi o mais elevado entre as 3 configurações testadas.

O parâmetro STI medido em uma sala é influenciado pela relação sinal-ruído entre o SPL da fala (sinal) e o SPL do ruído de fundo (ruído) e pelo tempo de reverberação. A tendência é de que valores altos de STI, indicando elevada inteligibilidade da fala, são captados quanto menor for o SPL do ruído de fundo e mais curto for o tempo de reverberação da sala. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 8 e na Tabela 9, o tempo de reverberação e o SPL do ruído de fundo foram reduzidos conforme aumento da quantidade de divisórias instaladas. Por conta disso, os maiores valores de STI foram captados na configuração SDPM e os menores valores na configuração SV, conforme apontam os resultados apresentados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - STI medido na linha de medição A para as 3 configurações de sala

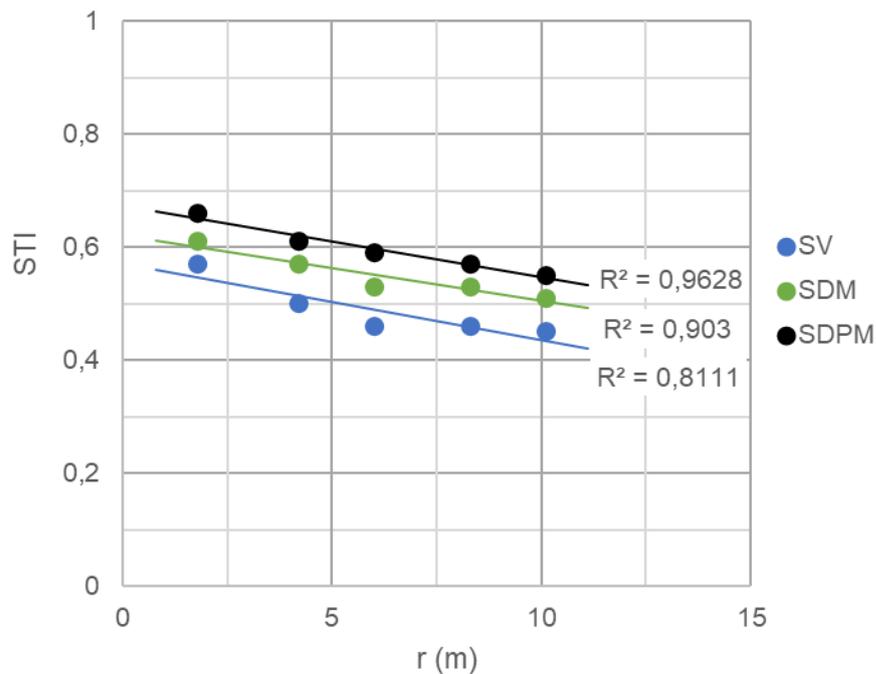


Fonte: Elaborado pelo autor

Observando o Gráfico 6, é possível verificar que as linhas de regressão traçadas entre os valores medidos apresentam inclinações semelhantes para todas as configurações de sala, indicando que a presença das divisórias não proporcionou

uma diferença significativa no decaimento espacial do STI. O coeficiente de determinação entre as linhas de regressão e os valores medidos em cada posição elevou conforme aumento da quantidade de divisórias instaladas. Quanto mais longo for o tempo de reverberação e mais elevado for o SPL do ruído de fundo, maior é a influência da energia sonora refletida pela sala nos valores medidos e, portanto, mais dispersos tendem a ser os resultados espacialmente. Tanto a semelhança na inclinação das linhas de regressão entre as 3 configurações de sala quanto a variação nos coeficientes de determinação foram constatadas também nos resultados obtidos através das medições na linha de medição B, como demonstra o Gráfico 7.

Gráfico 7 - STI medido na linha de medição B para as 3 configurações de sala



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos através dos cálculos dos descritores de valor único apresentados na Tabela 10 amparam as análises realizadas a partir dos gráficos apresentados.

Tabela 10 – Descritores de valor único calculados para as 3 configurações de sala

Configuração de sala	SV		SDM		SDPM	
	A	B	A	B	A	B
$D_{2,S}$ (dB)	1,43	1,25	1,52	1,43	2,48	2,32
$L_{p,A,S,4m}$ (dB)	52,99	53,51	50,50	50,69	48,60	48,68
r_D (m)	2,79	5,29	10,53	10,41	16,17	13,80
r_C (m)	192,5	444,8	49,6	63,4	10,9	12,0
$L_{p,A,B}$ (dB)	53,33		52,16		50,60	
$TR_{250Hz-4kHz}$ (s)	1,7		1,2		0,9	

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com os dados da Tabela 10, é possível verificar que os maiores valores para a taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,S}$) foram obtidos na configuração SDPM, enquanto a configuração SDM apresentou resultados mais próximos da configuração SV. O SPL da fala ponderado em A a 4 m da fonte ($L_{p,A,S,4m}$) e o raio de conforto (r_C) diminuiram enquanto o raio de distração (r_D) aumentou conforme aumento da quantidade de divisórias instaladas.

Ao comparar os resultados com os valores referenciais estipulados pela norma ISO 3382-3:2022, apresentados na Tabela 2, é possível afirmar que em todas as configurações ensaiadas os valores do descritor $D_{2,S}$ se enquadram na referência de más condições acústicas na sala, sendo inferiores a 5 dB. O valor de $L_{p,A,S,4m}$ para a configuração SDPM ficou bem próximo do valor referencial para boas condições acústicas, que deve ser inferior a 48 dB conforme a ISO 22955:2021, enquanto nas outras configurações o valor foi superior.

Os resultados obtidos para o raio de conforto (r_C) também se enquadram na referência de más condições acústicas para todas configurações ensaiadas, sendo superior a 11 m, com exceção do valor obtido para a linha de medição A na configuração SDPM que atingiu esse limite. Já os resultados do raio de distração (r_D) obtidos na configuração SV se enquadram na referência de boas condições acústicas sendo inferiores a 5 m, enquanto nas outras configurações os resultados ficaram próximos ou ultrapassaram o limite de 11 m indicando más condições acústicas conforme os limites referenciais da norma. O SPL médio do ruído de fundo ponderado

em A ($L_{p,A,B}$) ficou acima do recomendado para todas configurações de sala, sendo que a referência para boas condições acústicas sugere valores entre 40 e 45 dB.

A norma ISO 3382-3:2022 não menciona valores referenciais para o tempo de reverberação (TR). Porém, comparando os resultados obtidos com os valores referenciais sugeridos pela ISO 22955:2021, o tempo de reverberação médio entre as bandas de 250 Hz e 4000 Hz ($TR_{250\text{Hz}-4\text{kHz}}$) medido foi mais longo que o recomendado em todas configurações de sala ensaiadas, mesmo considerando o tipo de atividade menos restritiva para esse parâmetro em que a norma indica o limite de 0,8 s.

Ao confrontar os resultados obtidos nas duas linhas de medição, é possível verificar diferenças significativas para alguns descritores. Essas diferenças podem estar associadas às diferentes distâncias entre as mesas e as paredes laterais da sala, às diferentes propriedades acústicas dos materiais de revestimento dessas superfícies, à presença do operador na sala durante as medições e a incertezas de medição.

4.3 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos no estudo experimental corroboram resultados apresentados em outras pesquisas, de acordo com os dados apresentados na seção 2.3.2 do presente trabalho. A implementação das divisórias acústicas parciais aumentou o decaimento espacial do SPL da fala ($L_{p,A,S}$), principalmente na configuração SDPM onde foram introduzidas divisórias com altura mais elevada. No entanto, reforçando a constatação de Keranen *et al.* (2020), a falta de materiais fonoabsorventes nas superfícies da sala, especialmente no teto, gerou um tempo de reverberação excessivamente longo e, portanto, não foram alcançados valores adequados para a taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,S}$) em nenhuma das configurações ensaiadas.

Entre os principais objetivos da implementação de divisórias em escritórios de planta livre está a redução da inteligibilidade da fala entre as estações de trabalho para proporcionar maior privacidade acústica. Porém, no presente trabalho os resultados mais elevados do raio de distração (r_D), indicando elevada inteligibilidade da fala, foram obtidos nas configurações de sala com as divisórias instaladas, fato que também pode estar associado à falta de tratamento das superfícies da sala com materiais fonoabsorventes. Como as divisórias proporcionaram absorção sonora e,

consequentemente, reduziram o tempo de reverberação e o nível do ruído de fundo, a inteligibilidade do som na sala aumentou. No entanto, a parcela de energia sonora refletida nas superfícies da sala permaneceu elevada e, portanto, o decaimento espacial do som proporcionado pelas divisórias não foi suficiente para reduzir a relação sinal-ruído e, consequentemente, a inteligibilidade do som, comprometendo as condições de privacidade acústica. Em escritórios onde o forro contém alta capacidade de absorção sonora, a tendência é que o STI reduza espacialmente com a implementação das divisórias, diminuindo também o raio de distração, conforme indicam os resultados apresentados por Rindel (2018) e por Wenmaekers *et al.* (2019) (Figura 19, Figura 20 e Figura 21 (b)).

Na configuração SDPM, o valor sugerido pela ISO 3382-3:2022 para o SPL da fala ponderado em A a 4 m de distância da fonte ($L_{p,A,S,4m}$) foi praticamente alcançado. Isso indica que nessa configuração as divisórias proporcionaram uma atenuação satisfatória para as estações de trabalho mais próximas da fonte. Porém, ao analisar os resultados obtidos para o raio de conforto (r_C), percebe-se que o efeito do decaimento espacial do som proporcionado pelas divisórias não foi satisfatório levando em consideração também as estações de trabalho mais distantes da fonte sonora.

Na configuração SDM, foi possível perceber o efeito de difração das divisórias semelhante ao que foi constatado nos resultados da pesquisa de Wenmaekers *et al.* (2019) (Figura 21), onde o decaimento do $L_{p,A,S}$ foi mais pronunciado nas estações de trabalho posicionadas logo atrás das divisórias de mesa do que nas posições mais distantes que não tinham divisórias próximas gerando uma área de sombra acústica. Isso reforça a importância de uma análise detalhada do layout do escritório e do posicionamento das estações de trabalho e das divisórias para que seja alcançada a atenuação sonora desejada nas posições de interesse.

Outro fator que merece destaque é o controle do ruído de fundo. Como foi demonstrado por Wenmaekers *et al.* (2019) (Figura 22), o uso de um sistema eletroacústico de mascaramento do som pode servir para aumentar o nível do ruído de fundo e, consequentemente, reduzir a relação sinal-ruído e a inteligibilidade do sinal da fala. É possível perceber através dos resultados do presente trabalho que os menores valores de r_D foram obtidos justamente na configuração de sala que apresentou o maior nível do ruído de fundo. Entretanto, é importante observar que a baixa inteligibilidade da fala não deve estar associada à um ambiente excessivamente

ruidoso, pois um nível de ruído elevado pode causar perturbações graves aos usuários como estresse e baixa produtividade.

A prioridade é que seja projetado um ambiente controlado acusticamente através de soluções arquitetônicas passivas que proporcionem um baixo tempo de reverberação e um decaimento espacial do som adequado para então avaliar o uso de sistemas eletroacústicos de mascaramento, com níveis adequados para não elevar demais o nível de ruído geral do ambiente. Percebe-se nos resultados de Wenmaekers *et al.* (2019) que o nível mais elevado de ruído de fundo proporcionado pelo sistema eletroacústico de mascaramento sonoro foi de 45 dB na ponderação A, o que é inferior aos medidos no presente trabalho que ficaram acima de 50 dB, muito devido a um ambiente com alto tempo de reverberação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo experimental foi desenvolvido com intuito de caracterizar divisórias acústicas parciais e avaliar a eficiência da sua implementação no condicionamento acústico de escritórios de planta livre, visto que esses elementos fazem parte de um conjunto de soluções arquitetônicas essenciais para proporcionar condições adequadas de trabalho e tornar o cotidiano dos trabalhadores mais saudável e produtivo.

A caracterização das divisórias foi realizada através do projeto e da produção artesanal das mesmas com base em informações coletadas no referencial bibliográfico e nas especificações de produtos existentes no mercado, visando identificar materiais e dimensões que são comumente empregados na sua composição para o cumprimento das suas principais funções.

A avaliação da eficiência das divisórias no condicionamento acústico foi baseada em parâmetros e descritores acústicos obtidos por meio de medições em 3 configurações diferentes de um escritório de planta livre, com e sem a presença das divisórias.

Nesta avaliação, a implementação das divisórias se mostrou eficiente em relação ao decaimento espacial do som e ao controle da reverberação na sala ao proporcionar o aumento da taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,S}$) e a redução do SPL da fala a 4 m da fonte ($L_{p,A,S,4m}$), do raio de conforto (r_C), do tempo de reverberação médio da sala ($TR_{250Hz-4kHz}$) e do SPL médio do ruído de fundo ($L_{p,A,B}$). No entanto, a presença das divisórias se mostrou prejudicial para as condições de privacidade acústica, visto que os valores obtidos para o raio de distração (r_D) foram elevados conforme aumento da quantidade de divisórias instaladas na sala.

Apesar da contribuição positiva das divisórias para o decaimento espacial do som e para o controle da reverberação na sala, os resultados obtidos ficaram aquém do esperado considerando os valores referenciais sugeridos pelas normas ISO 3382-3:2022 e ISO 22955:2021. Devido ao aumento do nível de inteligibilidade do som, advindo da redução do tempo de reverberação e do SPL do ruído de fundo, e à baixa absorção das superfícies da sala, o efeito das divisórias foi contrário ao propósito de reduzir espacialmente o STI e, conseqüentemente, o raio de distração (r_D).

Ao analisar resultados apresentados em estudos de caso semelhantes que compõem o referencial bibliográfico, foi possível verificar que em escritórios onde há

materiais fonoabsorventes aplicados nas superfícies da sala, a contribuição das divisórias tende a ser mais efetiva tanto para o decaimento espacial do som da fala quanto para a redução espacial do STI, reduzindo o raio de distração (r_D) ao invés de aumentá-lo.

Essa análise reforça a constatação de que sem o tratamento adequado de outros aspectos de projeto como a introdução de materiais fonoabsorventes nas superfícies da sala e de sistemas de mascaramento para o controle do nível sonoro do ruído de fundo, não é possível alcançar os valores referenciais sugeridos para qualificação acústica de escritórios de planta livre. Os resultados também evidenciam a importância de analisar um conjunto de parâmetros para que os objetivos de projeto sejam cumpridos, visto que cada parâmetro visa quantificar uma ou mais experiências subjetivas.

Ainda, embora seja de grande importância conforme sugerem alguns estudos, a análise de descritores acústicos representa apenas uma parte da avaliação global da qualidade ambiental de escritórios e outros fatores ambientais devem ser levados em consideração concomitantemente, pois a satisfação dos usuários com o ambiente de trabalho pode variar conforme o tipo de trabalho e a cultura das pessoas onde esse escritório está inserido. Portanto, as soluções arquitetônicas adotadas para o condicionamento acústico desses ambientes devem também satisfazer outras premissas de projeto como conforto térmico, qualidade lumínica e flexibilidade de uso do espaço.

Contudo, a presente pesquisa serve de grande valia para arquitetos, designers de interiores e consultores acústicos compreenderem os efeitos que as divisórias proporcionam no campo sonoro, suas principais funções e as formas com que elas podem ser aplicadas em projetos de escritórios.

A partir das considerações supracitadas, é possível identificar diversas possibilidades de continuidade dessa pesquisa. Com relação à caracterização das divisórias, outras composições de materiais podem ser testadas com intuito de aprimorar o design e a eficiência das mesmas. Quanto ao estudo experimental desenvolvido, simulações computacionais do mesmo escritório podem ser realizadas afim de explorar a influência da implementação de outras soluções arquitetônicas nos descritores acústicos medidos, como a aplicação de materiais fonoabsorventes nas superfícies da sala.

Considerando as edições recentemente publicadas das normas técnicas associadas à avaliação da qualidade acústica em escritórios de planta livre e da constante evolução dos layouts arquitetônicos adotados para esses ambientes, estudos de caso em diferentes tipos de escritórios, vazios e ocupados, podem ser desenvolvidos com a aplicação das normas ISO 3382-3:2022 e ISO 22955:2021, respectivamente.

Nesses casos, a inclusão de uma análise subjetiva sobre a satisfação dos usuários com o ambiente de trabalho através de entrevistas direcionadas para essa finalidade se mostra importante, pois possibilita a investigação da correlação entre os valores referenciais estabelecidos por norma e a percepção subjetiva dos usuários.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 3382-2**: Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas: Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns. Rio de Janeiro, 2017.

BABAPOUR CHAFI, Maral; HULTBERG, Annemarie; BOZIC YAMS, Nina. Post-pandemic office work: Perceived challenges and opportunities for a sustainable work environment. **Sustainability**, v. 14, n. 1, p. 294, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su14010294>>.

BARATH, Matus; SCHMIDT, Dusana Alshatti. Offices after the COVID-19 Pandemic and Changes in Perception of Flexible Office Space. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11158, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.20944/preprints202206.0294.v1>>.

BARRON, Michael. **Auditorium Acoustics and Architectural Design**. New York: Spon Press, 2010.

BARROS, Marcela Nakazato; RAEDER, André; BORIN, Marcel. A comparison study between prediction models and in situ measurements of acoustic clouds in open plan offices. *In*: EUROPEAN CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 11., 2018, Crete. **Proceedings** [...]. Crete: EuroNoise, 2018.

BERBEGAL-MIRABENT, Jasmina. What do we know about co-working spaces? Trends and challenges ahead. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1416, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13031416>>.

BERANEK, Leo. **Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 2004.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de Salas: Projeto e Modelagem**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

CHAN, Xi Wen *et al.*. Work, life and COVID-19: a rapid review and practical recommendations for the post-pandemic workplace. **Asia Pacific Journal of Human Resources**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/1744-7941.12355>>.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustics Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

DI BLASIO, Sonja *et al.* A cross-sectional survey on the impact of irrelevant speech noise on annoyance, mental health and well-being, performance and occupants' behavior in shared and open-plan offices. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 16, n. 2, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijerph16020280>>.

ECKERMAN, Johann Peter. **Conversations with Goethe in the Last Years of His Life**. Boston: Hilliard, Gray & Co., 1839.

ECOPHON. Hyllinge, Sweden. Disponível em: <<https://www.ecophon.com/br/inspiration-and-knowledge/>>. Acesso em: 02 de out. 2022.

EGAN, M. David. **Architectural Acoustics**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Inc., 1988.

FUCHS, Helmut V. **Applied acoustics: Concepts, absorbers, and silencers for acoustical comfort and noise control: Alternative solutions - Innovative tools - Practical examples**. 1. ed. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.

GERGES, Samir N.Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 1992.

GRUENWALD, Hermann. Coworking Spaces in Germany during the Covid-19 Crisis Utilized for Homeoffice and Homeschooling. **South Asian Journal of Social Studies and Economics**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 57–67, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.9734/sajsse/2020/v8i430219>>.

HAAPAKANGAS, Annu *et al.* Distraction distance and perceived disturbance by noise—An analysis of 21 open-plan offices. **The Journal of the Acoustical Society of America**, [s. l.], v. 141, n. 1, p. 127–136, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.4973690>>.

HARVIE-CLARK, Jack; LARRIEU, Felix; OPSANGER, Cecilie. ISO 3382-3: Necessary but not sufficient a new approach to acoustic design for activity-based-working offices. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS*, 23., 2019, Aachen. **Proceedings** [...]. Aachen: ICA, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239488>>.

HEISSLER, R. F. *et al.* Análise crítica do desempenho acústico de sistemas de revestimentos de pisos. *In: ENCONTRO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA*, 27., 2017, Brasília. **Anais** [...]. Brasília: Sobrac, 2017.

HENRIQUE, Luís L. **Acústica Musical**. 5. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.

HONGISTO, V. A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. **Indoor Air**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 458–468, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00391.x>>.

HONGISTO, Valtteri *et al.* Refurbishment of an open-plan office - Environmental and job satisfaction. **Journal of Environmental Psychology**, [s. l.], v. 45, p. 176–191, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.12.004>>.

HONGISTO, Valtteri; KERÄNEN, Jukka. Open-plan offices-New Finnish room acoustic regulations. *In: EUROPEAN CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING*, 11., 2018, Crete. **Proceedings** [...]. Crete: EuroNoise, 2018.

HONGISTO, Valtteri; KERÄNEN, Jukka. Comfort Distance—A Single-Number Quantity Describing Spatial Attenuation in Open-Plan Offices. **Applied Sciences**, v. 11, n. 10, 4596, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app11104596>>.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60268-16**: Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. 5. ed. Switzerland, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 11654**: Acoustics — Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption. Geneva, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 20189**: Acoustics — Screens, furniture and single objects intended for interior use — Rating of sound absorption and sound reduction of elements based on laboratory measurements. 1. ed. Geneva, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 22955**: Acoustics — Acoustic quality of open office spaces. 1. ed. Geneva, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 3382-3**: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices. 2. ed. Geneva, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 354**: Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room. 2. ed. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 3741**: Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation test rooms. 4. ed. Geneva, 2010.

KARANIKΑ-MURRAY, Maria; IPSEN, Christine. Guest editorial: Reshaping work and workplaces: learnings from the pandemic for workplace health management. **International Journal of Workplace Health Management**, v. 15, n. 3, p. 257-261, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/IJWHM-06-2022-209>>.

KEMPPAINEN, Joni *et al.* The cost effects of acoustics in open-plan office. *In*: JOINT BALTIC-NORDIC ACOUSTICS MEETING, 2018, Reykjavik. **Proceedings [...]**. Reykjavik: BNAM, 2018.

KERÄNEN, Jukka; HAKALA, Jarkko; HONGISTO, Valtteri. Effect of sound absorption and screen height on spatial decay of speech – Experimental study in an open-plan office. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 166, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107340>>.

KIM, Jungsoo; DE DEAR, Richard. Workspace satisfaction: The privacy communication trade-off in open-plan offices. **Journal of Environmental Psychology**, [s. l.], v. 36, p. 18–26, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2013.06.007>>.

KLIPPEL FILHO, Sérgio. **Análise da absorção Sonora de painéis e baffles a base de resíduos de politereftalato de etileno (PET)**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade

do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2021. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9740>>.

KOSTALLARI, Krist *et al.* Irrelevant speech effect in open plan offices: Comparison of two models explaining the decrease in performance by speech intelligibility and attempt to reduce interindividual differences of the mental workload by task customisation. **Applied Acoustics**, v. 161, 107180, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107180>>.

KUTTRUFF, Heinrich. **Room Acoustics**. 6. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

LARRIEU, Felix; HARVIE-CLARK, Jack. Contrasting open plan office design implications from emerging French, German and finnish standards. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION, 24., 2017, London. **Proceedings** [...]. London: ICSV, 2017.

LENHART, T.; WALTER, B.; HEISLER, R.; DE OLIVEIRA, M. F. Qualificação de Câmara Reverberante de Absorção e Validação de Modelo Computacional. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2019, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: ENCAC, 2019.

LENNE, Lucas; CHEVRET, Patrick; MARCHAND, Julien. Long-term effects of the use of a sound masking system in open-plan offices: A field study. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 158, 107049, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107049>>.

LIU, Huimin; HE, Hui; QIN, Junjie. Does background sounds distort concentration and verbal reasoning performance in open-plan office? **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 172, 107577, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107577>>.

LONG, Marshall. **Architectural acoustics**. 2. ed. Waltham: Academic Press, 2014.

MATELJAN, Ivo. ARTA. **User Manual – Program for impulse response measurement and real time analysis of spectrum and frequency response**. Version 1.9.4.1. Kastel Luksic, 2021. Disponível em: <<https://www.artalabs.hr/index.htm>>.

OSELAND, Nigel; HODSMAN, Paige. **Planning for psychoacoustics: A psychological approach to resolving office noise distraction**. Reasearch Report, April 2015. Sweden: Saint-Gobain Ecophon, 2015. Disponível em: <<http://www.acousticbulletin.com/wp-content/uploads/2015/05/Ecophon-Psychoacoustics-v4.5.pdf>>. Acesso em: 24 de abr. 2022.

PARK, Sang Hee *et al.* Associations between job satisfaction, job characteristics, and acoustic environment in open-plan offices. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 168, 107425, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107425>>.

PETERS, Susan E. *et al.* Work and worker health in the post-pandemic world: a public health perspective. **The Lancet Public Health**, v. 7, n. 2, p. e188-e194, 2022. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(21\)00259-0](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(21)00259-0)>.

PETERS, Terri; HALLERAN, Anna. How our homes impact our health: using a COVID-19 informed approach to examine urban apartment housing. **Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/ARCH-08-2020-0159>>.

PIERRETTE, M. *et al.* Noise effect on comfort in open-space offices: development of an assessment questionnaire. **Ergonomics**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 96–106, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00140139.2014.961972>>.

RIBEIRO, Vivian Magalhães Ferraz. **Parâmetros do projeto arquitetônico que influenciam na qualidade acústica de escritórios panorâmicos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.ipt.br/pos_graduacao_ipt/solucoes/dissertacoes/1071-parametros_do_projeto_arquitetonico_que_influenciam_na_qualidade_acustica_de_escritorios_panoramico.htm>.

RINDEL, Jens Holger. Open plan office acoustics – a multidimensional optimization problem. *In: ANNUAL GERMAN CONFERENCE ON ACOUSTICS*, 44., 2018, Munich. **Proceedings** [...]. Munich: DAGA, 2018.

ROSSING, Thomas D. **Springer Handbook of Acoustics**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2014.

SEDDIGH, Aram *et al.* Effect of variation in noise absorption in open-plan office: A field study with a cross-over design. **Journal of Environmental Psychology**, [s. l.], v. 44, p. 34-44, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.08.004>>.

SOUZA, Eduardo. Incorporando acústica adequada em projetos com estruturas aparentes. **ArchDaily Brasil**. 18 Ago 2020. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/936436/incorporando-acustica-adequada-em-projetos-com-estruturas-aparentes>>. ISSN 0719-8906. Acesso em: 18 de set. 2021.

TROCKA-LESZCZYNSKA, Elzbieta; JABLONSKA, Joanna. Contemporary architectural design of offices in respect of acoustics. **Applied Acoustics**, [s. l.], v. 171, 107541, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107541>>.

UTAMI, Sentagi Sesotya; ARIFianto, Dhany; NADIROH, Ainun. Study on the Effect of Partition Heights in Open Plan Office to the Privacy and Distraction Level Utilizing Computational Fluid Dynamics. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 170, p. 195–201, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.046>>.

WENMAEKERS, Remy; VAN HOUT, Nicole. How ISO 3382-3 acoustic parameter values are affected by furniture, barriers and sound absorption in a typical open plan office. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS*, 23., 2019, Aachen. **Proceedings** [...]. Aachen: ICA, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239336>>.

XIAO, Yijing *et al.* Impacts of Working from Home during COVID-19 Pandemic on Physical and Mental Well-Being of Office Workstation Users. **Journal of Occupational & Environmental Medicine**, [s. l.], v. 63, n. 3, p. 181–190, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1097/jom.0000000000002097>>.

ZILENZIO. Örebro, Sweden. Disponível em: <<https://zilenzio.com/product/classic/>>. Acesso em: 14 de set. 2022.