



Efeito da implementação de divisórias acústicas parciais no condicionamento acústico de um escritório de planta livre

Colnaghi, J. P.¹; Oliveira, M. F.²; Heissler, R. F.³

¹ Mestrado Profissional em Arquitetura e Urbanismo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brasil, jpcolnaghi@gmail.com

² Departamento de Arquitetura e Construção, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil, maria.fernanda@unicamp.br

³ it Performance, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brasil, rheissler@unisinors.br

Resumo

Em escritórios de planta livre são executadas tarefas que demandam níveis distintos de privacidade e de concentração simultaneamente, o que caracteriza o nível de complexidade do projeto de condicionamento acústico. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é 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 analisar a influência de divisórias acústicas a partir de parâmetros e descritores utilizados para avaliação da qualidade acústica de escritórios de planta livre. Para essa avaliação foi utilizada uma sala de escritório mobiliada e foram realizadas medições com o uso de divisórias parciais de mesa e de piso. As medições incluíam situações com e sem as divisórias parciais, e seguiram os procedimentos da norma ISO 3382-3:2022. Apesar da falta de tratamento acústico adequado na sala ter limitado o efeito das divisórias sem que resultados desejados para a qualificação acústica do escritório fossem alcançados, a instalação das divisórias afetou de forma positiva o condicionamento acústico da sala quando comparado à sala sem divisórias. Os resultados obtidos apontam que as divisórias proporcionaram o aumento na taxa de decaimento espacial do nível sonoro da fala e a diminuição do tempo de reverberação no escritório. Além disso, foi verificado que o uso de divisórias cria zonas de sombra acústica como consequência do efeito da difração do som.

Palavras-chave: acústica arquitetônica, escritório de planta livre, divisórias acústicas.

Effect of implementing acoustic screens on the acoustic environment of an open plan office

Abstract

In open-plan offices, tasks that demand different levels of privacy and concentration are performed simultaneously, which characterizes the level of complexity of this type of acoustic design. In this context, the aim of this study is to evaluate the efficiency of acoustic screens in the acoustic treatment of open-plan offices. For this purpose, an experimental program was created consisting on analyzing the influence of acoustic screens based on parameters and descriptors used to evaluate the acoustic quality of open-plan offices. For this evaluation, a furnished office was used, and measurements were performed using partial-height desk and floor screens. Measurements included situations with and without screens following the procedures of ISO 3382-3:2022. Despite the lack of adequate acoustic treatment in the room having limited the effect of screens without achieving the desired results for the acoustic qualification of the office, the installation of screens positively affected the acoustic conditions of the room when compared to the room without screens. The results indicate that the screens provided an increase in the spatial decay rate of the speech sound level and a reduction in the reverberation time of the room. Furthermore, it was verified that the use of screens creates acoustic shadow zones as a consequence of the sound diffraction effect.

Keywords: architectural acoustics, open plan office, acoustics screens.

1. Introdução

Os espaços compartilhados de trabalho são tipicamente caracterizados por ambientes amplos, integrados, sem o uso de divisórias ou elementos que possam compartimentar os ambientes. No entanto, esses espaços têm características determinantes da baixa qualidade acústica, como a falta de privacidade e o excesso de ruídos. [1-3]. Esses problemas são derivados da falta de condicionamento acústico adequado, sendo que, o controle das reflexões do som é o principal parâmetro na caracterização acústica de salas, contribuindo no controle dos ruídos e, assim, melhorando as condições para a compreensão da comunicação oral [4]. No entanto, apesar de parecer uma solução simples, a combinação de baixo nível de ruído de fundo, baixo tempo de reverberação e, conseqüentemente, alto nível de inteligibilidade da fala como efeito do controle das reflexões sonoras também pode levar à falta de privacidade acústica e provocar distrações por conversas paralelas [5].

Este trabalho é derivado de uma dissertação de mestrado e tem como objetivo caracterizar a eficiência do uso de divisórias acústicas parciais no condicionamento acústico de um escritório de planta livre. Sendo assim, pretendeu-se investigar a influência da instalação de divisórias acústicas a partir de resultados obtidos por meio de medições em campo em uma sala com móveis e layout característicos de um escritório de planta livre.

2. Fundamentação teórica

2.1 Acústica em escritórios

Em um projeto de condicionamento acústico é fundamental identificar quais tipos de sinais acústicos serão executados, visando valorizar os sons desejáveis e atenuar os indesejáveis [6].

Especificamente 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 [7-8].

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 [4,9]. 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 [7,10].

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) [9]. 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 [5].

Devido a esses fatores, 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 compartimentado por algum sistema de vedação que proporcione elevada atenuação sonora como nos escritórios com divisões entre ambientes [11].

Uma solução possível de ser adotada em escritório de planta livre, é o uso de divisórias parciais. As divisórias podem ter diferentes configurações no que diz respeito à sua forma, materiais de acabamento e dimensões. De acordo com a norma ISO 22955:2021 [12], 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 parcialmente, de fontes sonoras ruidosas como equipamentos de impressão, cafeteiras, telefones, entre outras. Já o uso das divisórias de mesa terá maior influência na qualidade acústica de áreas onde estarão locadas as estações de trabalho, com a separação dos espaços individuais de trabalho e a redução do ruído por meio do aumento da absorção sonora nas superfícies próximas aos usuários.

As divisórias podem ser classificadas de acordo com o tipo de montagem e finalidade de uso. Conforme definições da norma ISO 20189:2018 [13], 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”. Complementarmente, a norma ISO 22955:2021 [12] define que 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”.

Segundo Trocka-Leszczynska e Jablonska [5], as divisórias instaladas nas mesas são importantes para o controle da transmissão direta e das reflexões sonoras provindas das mesas, sobretudo quando são posicionadas à frente dos usuários, atuando como um obstáculo na direção de projeção da voz.

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, formando a zona de sombra acústica no lado oposto [14-16].

2.3 Parâmetros e descritores acústicos para escritórios de planta livre

A norma ISO 3382-3:2022 [17] indica os parâmetros e descritores acústicos utilizados para avaliação da acústica de salas de planta livre utilizadas para atividades de escritórios. 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 (NPS) da fala e um associado à inteligibilidade da fala [2,18].

Os quatro descritores estabelecidos pela norma ISO 3382-3:2022 [17] são: a taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,s}$) que descreve o quanto o NPS 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 NPS 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 NPS 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.

O descritor STI (Índice de Transmissão da Fala) expressa a qualidade da mensagem sonora inteligível, e é uma quantidade física associada positivamente à inteligibilidade subjetiva da fala que leva em consideração a influência do ruído de fundo e do TR. 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 terço de

oitava). Os valores de STI variam de 0,0 (fala não inteligível) a 1,0 (inteligibilidade perfeita da fala) [6]. Portanto, conforme descreve a norma ISO 3382-3:2022 [17], 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.

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) [2].

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) estão relacionados 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. Complementarmente, 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 [14-16,18].

Segundo Haapakangas *et al.* [2], 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 e Keränen [18], 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).

Além dos descritores citados, as médias dos valores de NPS ponderado em A do ruído de fundo, $L_{p,A,B}$, e do TR da sala entre 250 Hz e 4000 Hz, $TR_{250-4000Hz}$, podem ser apresentados para complementar as análises.

O Anexo C da norma ISO 3382-3:2022 [17] fornece valores referenciais para avaliar os resultados obtidos para os descritores acústicos de valor único. Os valores referenciais para más e boas condições acústicas em escritórios de planta livre são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores referenciais para descritores de valor único em escritórios de planta livre conforme a ISO 3382-3:2022 (retirado de ISO 3382-3 [17]).

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)
Condições acústicas insuficientes	< 5	> 52	> 11	> 11	< 35 ou > 48
Boas condições acústicas	> 8	< 48	< 5	< 5	Entre 40 e 45

A norma ISO 3382-3:2022 [17] não indica valores referenciais para o TR. A norma ISO 22955:2021 [12] que propõe 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, sugere para escritórios com pouco trabalho colaborativo ou com trabalho colaborativo só nas estações de trabalho mais próximas $TR_{250-4000Hz} \leq 0,5$ s. Já em escritórios cujas atividades envolvem a recepção de público externo e atendimento pessoal, como bancos, agências de seguro, lojas etc., o valor sugerido pela ISO 22955:2021 é $TR_{250-4000Hz} \leq 0,8$ s, sendo menos exigente porque o nível de ruído nesses ambientes é naturalmente elevado.

3. Método

3.1 Ambiente para as medições

O escritório de planta livre escolhido para o desenvolvimento da presente pesquisa está localizado no prédio do Portal da Inovação, no campus da Unisinos em São Leopoldo/RS. A planta baixa da sala tem formato retangular com dimensões 12,44 m por 6,31 m, pé-direito de 3,47 m, área do piso com 78,50 m² e volume aproximado de 270,00 m³.

O teto e as paredes da sala têm acabamento em reboco e pintura, sendo que no teto não está instalado forro. A parede longitudinal adjacente à circulação do prédio é formada por caixilhos de alumínio com vidro fixados na alvenaria. As juntas entre os painéis de vidro são preenchidas com silicone. A parede oposta é composta por alvenaria com 3 janelas tipo maxim-ar com caixilho de alumínio e vidro, voltadas para a área externa da edificação, e o piso é revestido com cerâmica. As características da sala podem ser vistas na Figura 1.

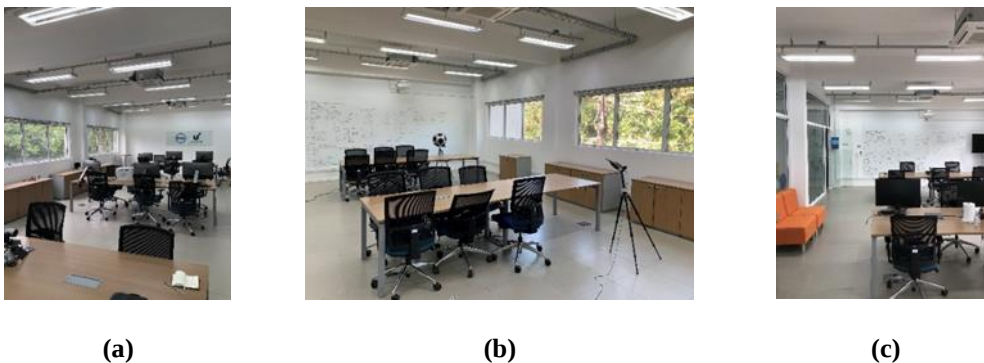


Figura 1: Sala das medições em sua configuração original.

O mobiliário é formado por 3 mesas uniformemente distribuídas, sendo cada mesa com 6 cadeiras parcialmente estofadas, totalizando 18 estações de trabalho. As mesas de estrutura metálica e tampo de madeira não possuem divisões verticais para delimitação das estações de trabalho. Cada mesa tem 1,0 m de largura, 3,20 m de comprimento e 0,75 m de altura. Abaixo das janelas estão posicionados armários baixos de madeira ao longo do comprimento da sala. Estão instalados 3 equipamentos do tipo split cassete, fixados diretamente na laje. As luminárias são fixadas em eletrocalhas aparentes também fixadas na laje do teto com suportes metálicos.

As divisórias parciais utilizadas neste estudo foram desenvolvidas especificamente para o escritório escolhido, conforme pode ser consultado em Colnaghi [19]. A Figura 2 ilustra as divisórias instaladas no escritório durante a realização das medições.

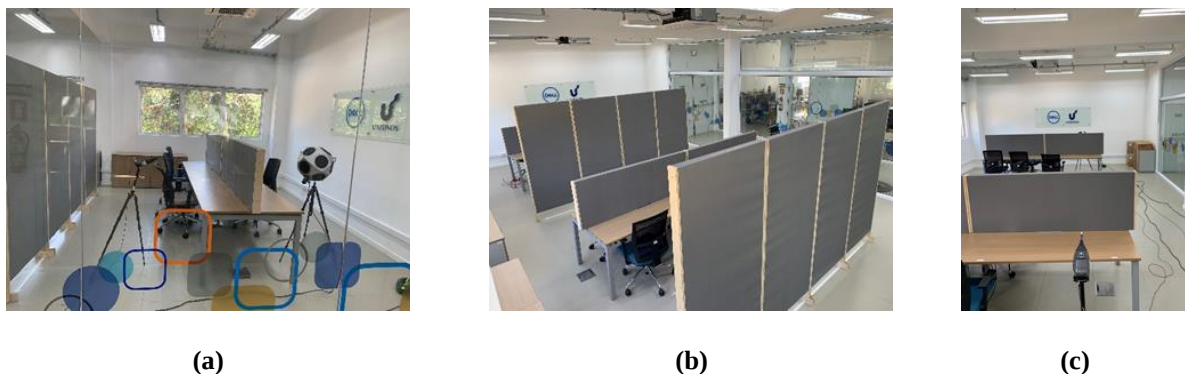


Figura 2: Divisórias instaladas no escritório durante a realização das medições.

Para cumprir tanto a função de barreira quanto a de proporcionar área extra de absorção sonora, todas as divisórias são compostas por um núcleo rígido de compensado naval com 18 mm de espessura, coberto em ambas as faces com lã de vidro de 25 mm e densidade de 40 kg/m³, totalizando 68 mm de espessura. O acabamento foi feito com revestimento de tecido.

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.

3.2 Medições acústicas em campo

As medições forneceram subsídios para a determinação dos descritores $D_{2,S}$, $L_{p,A,S,4m}$, r_C , r_D e STI.

A norma ISO 3382-3:2022 [17] estabelece que em cada posição de microfone devem ser realizadas quatro medições: r (distância entre a fonte sonora omnidirecional, 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 no intervalo entre 125 Hz e 8.000 Hz, sendo esses dados utilizados para o cálculo e determinação dos descritores de valor único, conforme procedimento da norma ISO 3382-3:2022 [17]. Além desses dados, foram utilizados os procedimentos especificados na norma NBR ISO 3382-2:2017 [20] para as medições de TR.

As medições foram realizadas em campo, com os seguintes equipamentos da Bruel&Kjaer: analisador sonoro 2270, fonte sonora omnidirecional omnipower 4292-L, pré-amplificador modelo ZC-0032, microfone ½” 4189, calibrador sonoro 4231 e amplificador de potência 2734. 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, para realização das medições e processamento dos dados.

Foram utilizadas três diferentes configurações de sala: sala vazia (SV), com as divisórias de mesa instaladas (SDM) e com as ambas as divisórias, mesa e piso, 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 feita a medição do TR, 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. O TR foi medido através do método da resposta impulsiva, realizado por meio do método da varredura exponencial de senos, sendo esse procedimento especificado na norma NBR ISO 3382-2:2017 [20], e os resultados foram expressos para as bandas de frequências em oitavas do intervalo entre 125 Hz e 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. O sinal utilizado no presente trabalho abrange um conteúdo espectral único, sem distinção de gênero, conforme determina a última atualização da norma IEC 60268-16:2020 [21].

As medições foram realizadas ao longo de linhas retas imaginárias que cruzam as estações de trabalho, conforme procedimentos da norma ISO 3382-3:2022 [17]. Como a forma da sala não possibilita linhas de medição em diferentes direções, foram traçadas duas linhas paralelas em sentidos opostos. A linha de medição A foi traçada passando 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 (Figura 3a). 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. A planta baixa e o corte são apresentados na Figura 3, com as linhas de medição (linhas verdes) e as posições adotadas para fonte (pontos verdes), microfone (pontos brancos com “x”) e divisórias de piso (linhas azuis) e de mesa (linhas vermelhas).

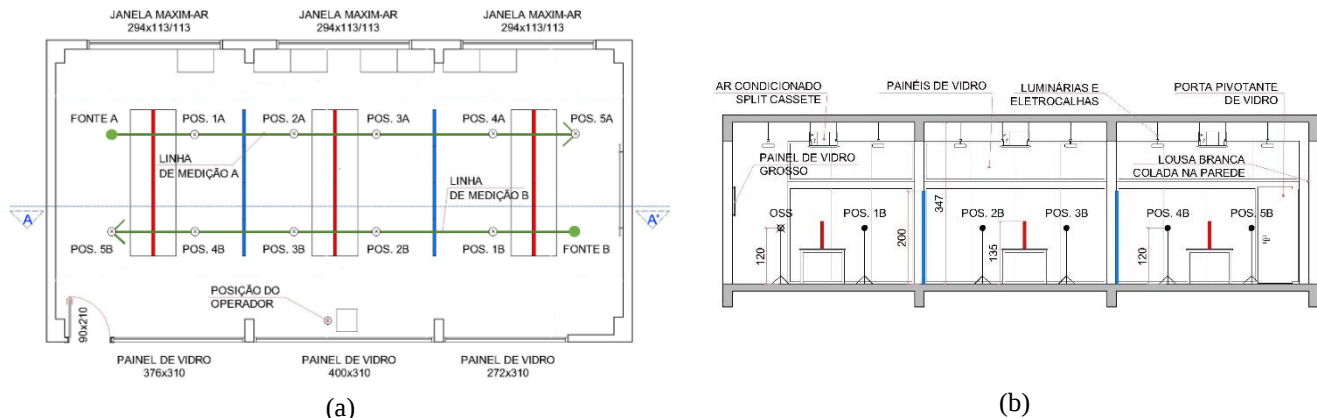


Figura 3: Planta baixa (a) e corte AA' (b) do escritório com posições de fonte, microfone (linhas verdes) e divisórias de piso (azul) e de mesa (vermelho) adotadas.

Durante as medições, os aparelhos split foram mantidos ligados, com o ventilador na velocidade alta em todos os ensaios. As cadeiras foram afastadas da linha de medição durante as medições.

4. Resultados

Devido às propriedades acústicas dos materiais de revestimento das superfícies da sala, que são predominantemente reflexivas, o TR medido na configuração SV, sala vazia, apresentou valores elevados. Os resultados das médias dos TRs medidos em bandas de oitava para a sala sem o uso de divisórias (SV), com o uso de divisórias de mesa (SDM) e de divisórias instaladas no piso e nas mesas (SDPM) podem ser analisados na Figura 4. No eixo secundário estão indicadas as áreas de absorção sonora equivalentes (A_{obj}) por bandas de oitava inseridas nas configurações com as divisórias de mesa (DM) e com as divisórias de piso e de mesa (DPM).

Ao observar as curvas do gráfico da Figura 4, percebe-se a redução do TR em todo espectro das medições quando utilizada a configuração SDM, quando comparados aos resultados com a configuração SV. Com a instalação de ambos os tipos de divisórias na configuração SDPM, observam-se maiores alterações no TR, principalmente nas bandas de frequências que caracterizam o espectro sonoro da voz humana a partir de 500 Hz, em comparação ao TR da configuração SDM. Esse efeito pode ser atribuído ao material poroso fonoabsorvente utilizado nas superfícies das divisórias.

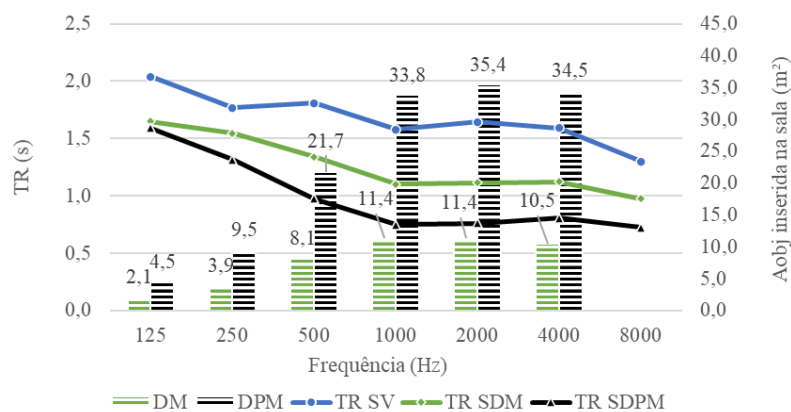


Figura 4: TR médio nas 3 configurações de sala e áreas de absorção de DM e DPM em bandas de oitava.

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

As médias dos valores do TR da sala medido entre as bandas de 250 Hz e 4000 Hz, para as três configurações de sala, foram 1,7 s para a configuração SV, 1,2 s para a configuração SDM e 0,9 s para a configuração SDPM.

Assim como o TR, 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. Os valores de $L_{p,A,B}$ obtidos foram de 53,55 dB para a configuração SV, 52,16 dB para a configuração SDM e 50,60 dB para a configuração SDPM.

A redução do $L_{p,A,B}$ é justificada tanto pela redução do TR, quanto pelo impedimento da transmissão do som em campo direto. Sendo assim, essa solução reduz a reflexão sonora e obstrui a transmissão sonora direta entre os aparelhos do sistema de climatização da sala e as estações de trabalho.

As curvas de decaimento espacial dos valores do NPS da fala ponderado em A ($L_{p,A,S}$) e do STI para ambas as 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 nos gráficos da Figura 5 e Figura 6, assim como o valor de referência de 57,4 dB que representa o NPS usual da fala em campo livre a 1 m de distância na ponderação A.

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 efeito de barreira sonora das divisórias, e pela área extra de absorção sonora proporcionados pelas divisórias. É importante salientar que, embora o obstáculo proporcionado pela estrutura da barreira e a absorção derivada de suas superfícies ocorram simultaneamente, estão envolvidos dois fenômenos físicos distintos, sendo necessária a adoção das duas soluções simultaneamente para a solução do som em campo direto e refletido. O decaimento do $L_{p,A,S}$ medido nas linhas de medição A e B para as 3 configurações de sala é apresentado na Figura 5.

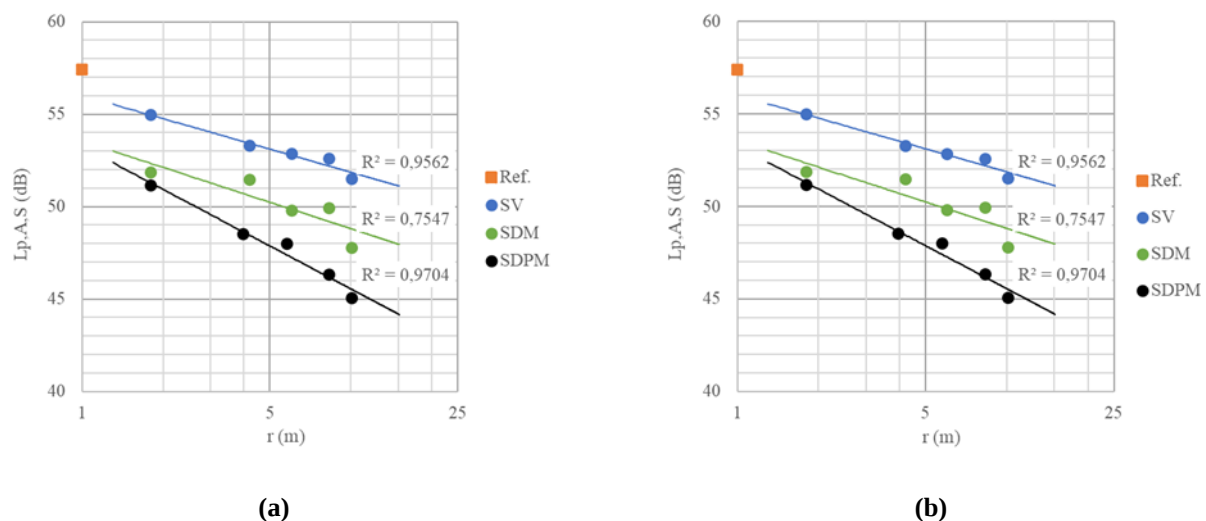


Figura 5: NPS da fala ponderado em A medido nas linhas de medição A (a) e B (b) para as 3 configurações de sala.

A partir dos dados apresentados na Figura 5 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 R^2 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 com as 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 na Figura 5.

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 pela presença da porta de entrada que, por não ter vedações no contorno, pode ter absorvido uma parcela da energia sonora.

A partir dos dados apresentados na Figura 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 as 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 do NPS captado 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 NPS da fala (sinal) e o NPS do ruído de fundo (ruído) e pelo TR. O decaimento do STI medido nas linhas de medição A e B para as 3 configurações de sala é apresentado na Figura 6.

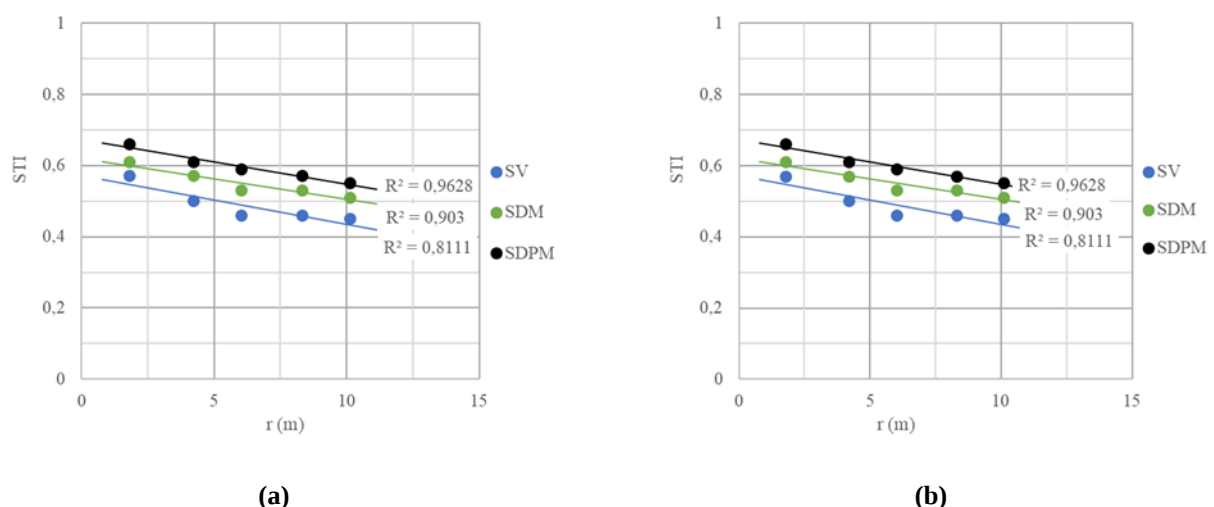


Figura 6: STI medido na linha de medição A (a) e B (b) para as 3 configurações de sala.

A tendência é de que valores altos de STI, indicando elevada inteligibilidade da fala, são captados quanto menor for o NPS do ruído de fundo e mais curto for o TR da sala. O TR e o NPS do ruído de fundo foram reduzidos conforme o 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 na Figura 6.

Observando o gráfico da Figura 6a, 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 TR e mais elevado for o NPS 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 da Figura 6b.

Os resultados obtidos através dos cálculos dos descritores de valor único apresentados na Tabela 2 amparam as análises realizadas a partir dos gráficos apresentados.

Tabela 2: Valores referenciais para descritores de valor único em escritórios de planta livre conforme a ISO 3382-3:2022 (retirado de ISO 3382-3 [17]).

Configuração de sala	SV		SDM		SDPM	
Linha de medição	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	

De acordo com os dados da Tabela 2, é possível verificar que os maiores valores para $D_{2,s}$ foram obtidos na configuração SDPM, com ambas as divisórias instaladas; enquanto a configuração SDM apresentou resultados mais próximos da configuração SV. O $L_{p,A,S,4m}$ e r_C diminuíram enquanto o r_D aumentou conforme aumento da quantidade de divisórias instaladas.

Ao comparar os resultados com os valores de referência estipulados pela norma ISO 3382-3:2022, apresentados na Tabela 1, 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 r_C também se enquadram na referência de más condições acústicas para todas as 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 de 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 $L_{p,A,B}$ ficou acima do recomendado para todas as 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 TR. Porém, comparando-se os resultados obtidos com os valores de referência sugeridos pela ISO 22955:2021, a média do TR, considerando-se o intervalo entre as bandas de 250 Hz e 4.000 Hz ($TR_{250\text{Hz}-4\text{kHz}}$), foi mais longo que o recomendado em todas as configurações de sala ensaiadas, mesmo considerando o tipo de atividade menos restritiva para esse parâmetro em que a norma indica o valor 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.

5. Considerações finais

Neste estudo, a implementação das divisórias acústicas parciais aumentou o decaimento espacial do NPS da fala ($L_{p,A,S}$), principalmente na configuração SDPM onde foram introduzidas divisórias parciais de piso com altura mais elevada.

Apesar da taxa de decaimento espacial da fala ($D_{2,S}$) não ter alcançado valores adequados em nenhuma das configurações ensaiadas, o efeito proporcionado pela instalação dos dois tipos de divisórias foi significativo, comparado ao uso somente da divisória de mesa e da sala sem as divisórias.

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 pode estar associado à falta de tratamento das superfícies da sala com materiais fonoabsorventes. Como as divisórias proporcionaram absorção sonora e, conseqüentemente, reduziram o TR e o nível do ruído de fundo, a inteligibilidade do som na sala aumentou. No entanto, a parcela de energia sonora refletida nas paredes e teto da sala permaneceu elevada e, portanto, o decaimento espacial do som proporcionado pelas divisórias não foi suficiente para reduzir a relação sinal-ruído e, conseqüentemente, a inteligibilidade do som, comprometendo as condições de privacidade acústica.

O uso em conjunto de divisórias de mesa e de piso proporcionam uma atenuação acústica satisfatória em estações de trabalho posicionadas próximo a fontes sonoras, pois o valor sugerido pela ISO 3382-3:2022 para o NPS da fala ponderado em A a 4 m de distância da fonte ($L_{p,A,S,4m}$) foi alcançado neste estudo experimental. 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 poderia ser qualificado considerando-se outras variáveis como, por exemplo, as estações de trabalho mais distantes da fonte sonora.

Com a configuração somente com as divisórias de mesa foi possível perceber o efeito de difração das divisórias em que o decaimento do $L_{p,A,S}$ foi mais pronunciado nos espaços de sombra acústica, localizados na parte posterior das divisórias, considerando-se o sentido de transmissão do som a partir da fonte sonora. Nas estações de trabalho mais afastadas das divisórias de mesa esse efeito não foi verificado de forma tão marcante. 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.

Referências

1. 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>>.

2. 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>>.
3. 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>>.
4. 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>>.
5. LONG, Marshall. *Architectural acoustics*. 2. ed. Waltham: Academic Press, 2014.
6. BRANDÃO, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016.
7. BISTAFA, Sylvio R. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.
8. OSELAND, Nigel; HODSMAN, Paige. Planning for psychoacoustics: A psychological approach to resolving office noise distraction. Research 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.
9. EGAN, M. David. *Architectural Acoustics*. 1. ed. New York: McGraw-Hill Inc., 2014.
10. 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>>.
11. ROSSING, Thomas D. *Springer Handbook of Acoustics*. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2014.
12. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 22955: Acoustics — Acoustic quality of open office spaces. 1. ed. Geneva, 2021.
13. 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.
14. 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>>.
15. RINDEL, Jens Holger. Open plan office acoustics – a multidimensional optimization problem. In: ANNUAL GERMAN CONFERENCE ON ACOUSTICS, 44., 2018, Munich. Proceedings [...]. Munich: DAGA, 2018.
16. 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>>.
17. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 3382-3: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices. 2. ed. Geneva, 2022.
18. 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>>.
19. COLNAGHI, João Pedro. Caracterização e avaliação de divisórias acústicas parciais: estudo experimental em escritório de planta livre. 2022. Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2022. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/12142>>.
20. 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.
21. 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.