2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

IMPACTO DO USO DE CORTINAS SOBRE A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO EM SALA DE AULA[1]

IKEDA, Cristina Yukari Kawakita (1); VITTORINO, Fulvio (2) ; AQUILINO, Marcelo de Mello (3); ONO, Rosaria (4)

(1) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), cristinak@ipt.br
(2) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), fulviov@ipt.br
(3) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), aquilino@ipt.br
(4) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP), rosaria@usp.br

RESUMO

Normalmente, adota-se um único valor de cada descritor acústico para toda a sala de aula, a fim de se caracterizar as condições de reverberação desse ambiente. Em escolas existentes o uso de cortinas é um mecanismo de baixo custo para tentar corrigir eventuais valores trazendo esses parâmetros para faixas aceitáveis. A presente pesquisa enfocou a distribuição espacial do parâmetro tempo de reverberação em salas de aula com cortinas abertas e fechadas. A ferramenta utilizada para estimar o comportamento do som foi a simulação computacional através do software Odeon. Os modelos da sala de aula foram ajustados utilizando-se tempos de reverberação medidos nas salas reais. Para as salas de aula, foram estudadas duas configurações de janelas fechadas: cortinas abertas e fechadas. O impacto do uso das cortinas sobre o valor do tempo de reverberação é variável em função da frequência. O seu uso não melhora significativamente a homogeneidade da distribuição do tempo de reverberação nesse ambiente.

Palavras-chave: *tempo de reverberação, sala de aula, simulação acústica.*

ABSTRACT

Usually, a single value of each acoustic descriptor is adopted for the entire classroom, in order to characterize the reverberation conditions of this environment. In existing schools the use of curtains is a low cost mechanism to try to correct any values by bringing these parameters to acceptable ranges. The present research focused on the spatial distribution of the parameter reverberation time in classrooms with open and closed curtains. The tool used to estimate the sound behavior was computational simulation using the software Odeon. The classroom models were adjusted using reverberation times measured in the real rooms. For the classrooms, two configurations of closed windows were studied: open and closed curtains. The impact of using the curtains on the value of the reverberation time varies according to the frequency. Its use does not significantly improve the homogeneity of the reverberation time distribution in this environment.

Keywords*: Reverberation Time, Classroom, Acoustic Simulation.*

---

[1] IKEDA, Cristina Yukari Kawakita; VITTORINO, Fulvio; AQUILINO, Marcelo de Mello; ONO, Rosaria. Impacto do uso de cortinas sobre a distribuição espacial do tempo de reverberação em sala de aula. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

1 INTRODUÇÃO

Em torno da fala, acontece a maior parte da atividade educacional dentro da sala de aula. A comunicação eficaz da linguagem falada deve ser permitida pela característica acústica da sala de aula (DFES, 2003). Existem vários descritores acústicos, tais como o tempo de reverberação (TR), o decaimento inicial (EDT), o índice de transmissão da fala (STI), a razão de graves (BR), o tempo central (Ts) e a definição (D_{50}), aplicados para avaliar a qualidade acústica dos espaços, e alguns deles são geralmente mais considerados quando a compreensão da mensagem falada é fundamental, conforme discutido por Ikeda (2019). Em geral, adota-se um único valor destes indicadores para se caracterizar todo o ambiente, ignorando eventuais gradientes espaciais. A presente pesquisa enfocou a distribuição espacial do parâmetro tempo de reverberação em salas de aula, considerando o impacto de abertura e fechamento de cortinas sobre esse parâmetro. O uso de cortinas é uma solução barata e de fácil implementação em ambientes já construídos.

A distribuição dos níveis de pressão sonora em salas de aula típicas é de difícil previsão, apesar de apresentarem geometrias geralmente simples devido a algumas características típicas destas salas como paredes paralelas, pé-direito baixo e distribuição desigual da absorção (CHRISTENSEN e RINDEL, 2005).

2 MÉTODO

Para se realizar o estudo proposto, foram tomados os seguintes passos:

a) escolha de uma sala de aula do ensino médio da rede particular do estado de SP, contendo apenas mobiliário comum; b) construção do modelo digital dessa sala; c) calibração das propriedades acústicas desse modelo comparando níveis de pressão sonora medidos com os níveis obtidos em simulações preliminares; e d) realização das simulações definitivas. Todas as medições e cálculos foram feitos para um plano horizontal situado a 1,20 m acima do piso.

A sala de aula considerada apresenta área de piso de 45,6 m^2 e pé-direito de 3,65 m, além das seguintes características construtivas e de mobiliário: piso revestido em pedra; parede em alvenaria revestida com argamassa e aplicação de massa corrida e pintura; forro de lã mineral; mobiliário escolar em madeira, com os tampos das mesas em fórmica, como pode ser visto na Figura 1. A Figura 2 ilustra os equipamentos empregados nas medições. Conforme o manual do software Dirac (Brüel & Kjœe, 2013), para medir o tempo de reverberação, os níveis de sinal absolutos são irrelevantes para este parâmetro, então não é necessário realizar uma calibração de nível, nem do sistema. De qualquer forma, foi realizada uma calibração do sistema em câmara reverberante.

A ferramenta utilizada para estimar o comportamento do som, ao longo de toda a sala de aula, foi a simulação computacional. Para essa etapa da pesquisa, o software escolhido foi o Odeon que faz uso de um método de cálculo híbrido combinando o método da fonte imagem com o método de traçado de raios (CHRISTENSEN e RINDEL, 2005). Os raios são tratados, pelo software, como transportadores de energia e cada vez que um raio atinge uma superfície, uma fonte secundária é gerada no ponto de colisão. A energia da fonte secundária é a energia total da fonte primária dividida pelo número de raios que dela saem e atingem a fonte secundária e multiplicados pelos coeficientes de reflexão das superfícies envolvidas no histórico do raio até aquele ponto (RINDEL, 2010).

Figura 1 – Vista da sala



Fonte: Ikeda (2019)

Figura 2 – Equipamentos utilizados



Fonte: Ikeda (2019)

Optou-se então pela configuração de engenharia nas simulações por ser um modo mais rápido que o modo de precisão, sem muita perda na qualidade dos resultados, conforme o manual do software (ODEON A/S, 2018).

Os valores dos coeficientes de absorção sonora utilizados foram, inicialmente, aqueles contidos na base de dados do programa (Tabela 1) e, depois, ajustados em função do processo de calibração do modelo realizado. O coeficiente de espalhamento utilizado para todos os materiais foi de 0,05.

Tabela 1 – Materiais aplicados às superfícies

Material no Odeon	**Absorção sonora**								**Cortina aberta**	**Cortina fechada**
	63 Hz	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**	**8000 Hz**	**m²**	**m²**
Glass, ordinary window	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04	127,5	67,5
Smooth concrete, painted or glazed	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	248,7	143,2
Smooth unpainted concrete	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	173,0	190,7
Thin plywood panelling	0,42	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06	0,06	250,7	145,2
Curtains, cotton cloth	0,07	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54	0,54	273,9	280,1

Fonte: Odeon S/A (2009)

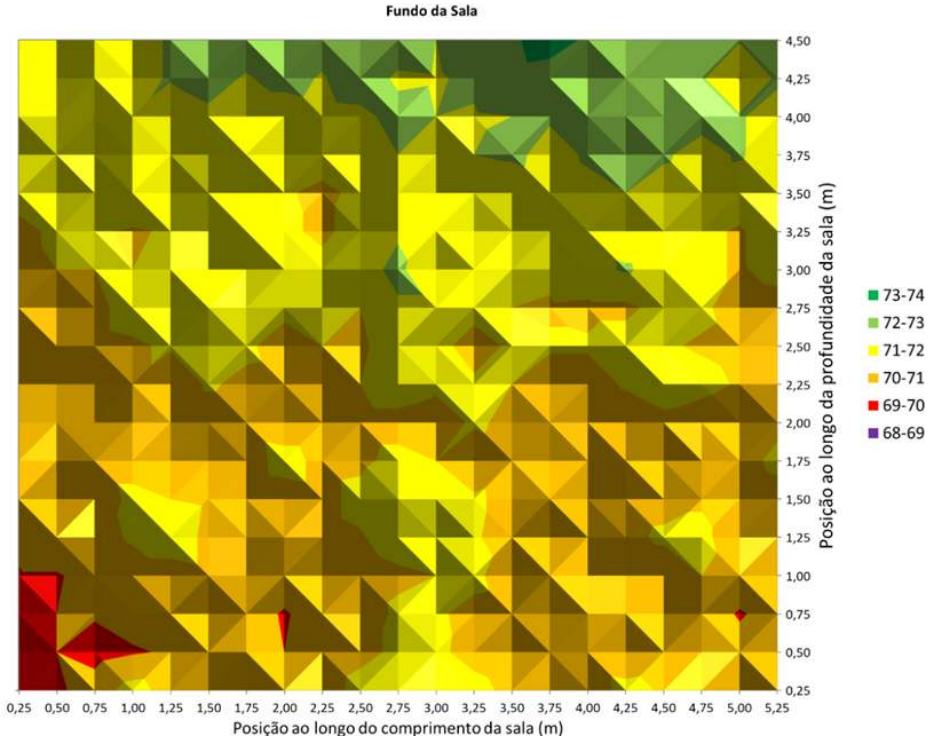
2.1 Modelo digital

Os modelos virtuais da sala de aula foram gerados no software SketchUp17, utilizando-se o plug-in SU2Odeon. Estes modelos, com as geometrias da sala, foram exportados para o software Odeon. No software, foram atribuídos materiais para cada superfície, referentes aos utilizados nas salas de aula, com seus respectivos coeficientes de absorção sonora e de espalhamento sonoro. Os modelos das salas de aula foram ajustados para coincidir com os tempos de reverberação medidos em 1000 Hz, tanto quanto possível, tolerando-se uma variação de até 5% que está dentro do limiar da percepção para o TR, segundo a ISO 3382-1 (2009).

2.2 Malha

Pela questão do longo tempo de processamento computacional, realizou-se um estudo preliminar para otimizar o tamanho da malha a ser utilizada. Foram realizadas, em uma sala de aula, medições de nível de pressão sonora ponderado na escala de sensibilidade "A", colocando-se os microfones em pontos de forma a criar uma malha de 25 cm, nos sentidos longitudinal e transversal, como ilustrada pela Figura 3. A fonte sonora utilizada para a geração de ruído rosa foi uma fonte dodecaédrica. A fonte sonora estava localizada na posição típica do professor, à frente e ao centro da sala.

Figura 3 – Distribuição do nível pressão sonora ponderada em A, em dB, no interior de uma sala de aula, obtida no estudo para a determinação da dimensão da malha para simulação acústica



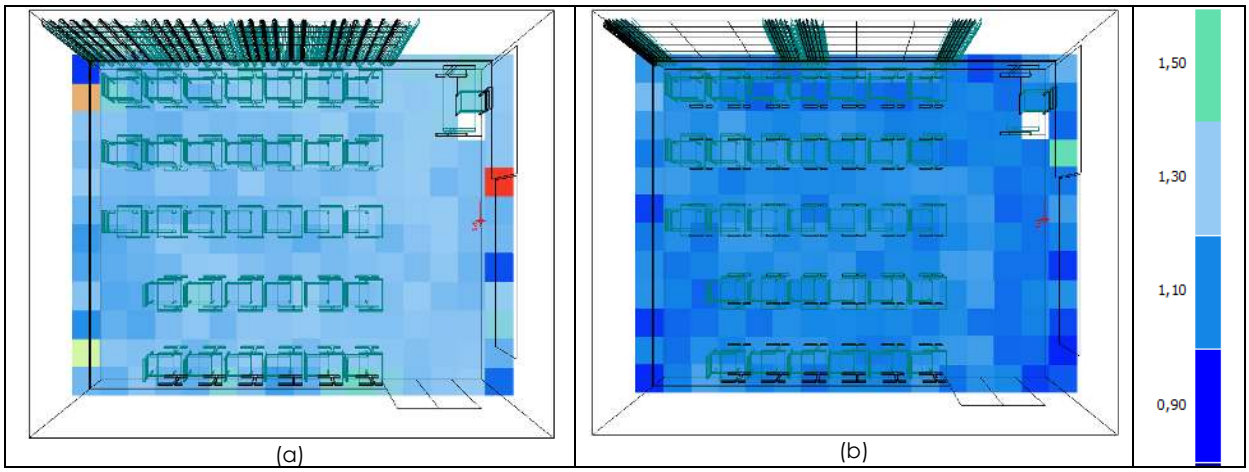
Fonte: Ikeda (2019)

Analisando-se esses resultados, concluiu-se que uma malha de 1 m, seria muito grosseira, pois haveria mais de 1 aluno localizado dentro de uma célula de cálculo e uma malha de 25 cm, apesar de mais refinada, aumentaria em dias o tempo de simulação para cada sala. Dessa forma, optou-se por uma malha de 50 cm, pois o campo sonoro não variou muito, cerca de 1 dB a 2 dB, no experimento realizado, e a distância é mais coerente com a distância que um aluno se senta em relação ao outro.

3 RESULTADOS

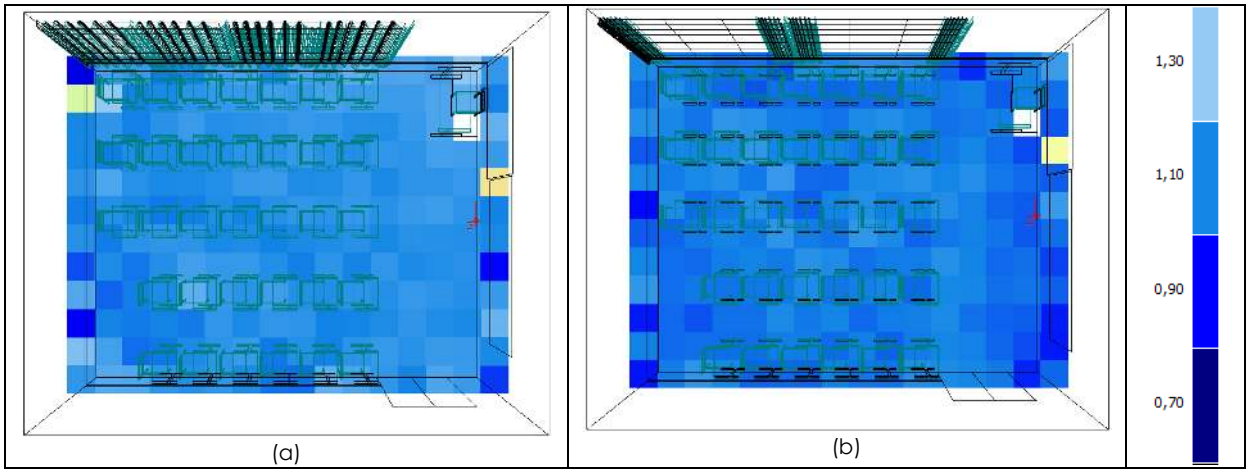
As Figuras 4 a 7 apresentam os diagramas de distribuição espacial do TR para as frequências de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz.

Figura 4 – Diagrama de distribuição espacial do TR para 500 Hz, para a configuração de cortina fechada e janela fechada (a) e cortina aberta e janela fechada (b)



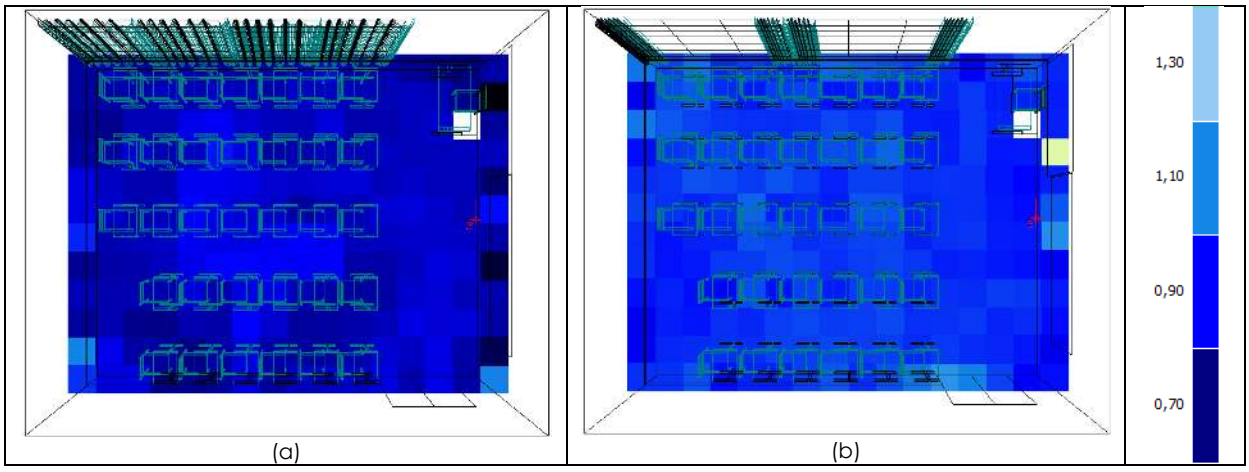
Fonte: Os autores

Figura 5 – Diagrama de distribuição espacial do TR para 1000 Hz, para a configuração de cortina fechada e janela fechada (a) e cortina aberta e janela fechada (b)



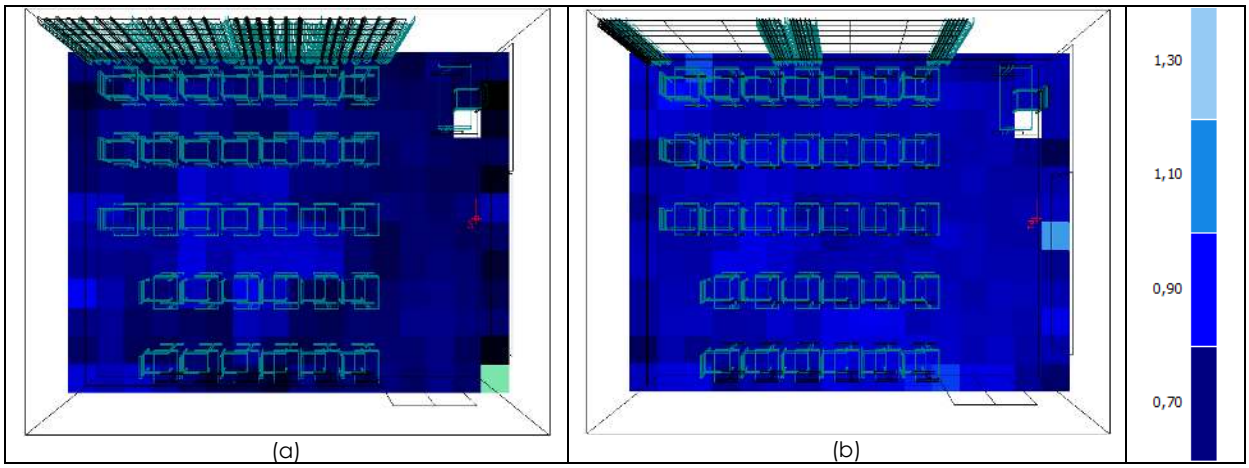
Fonte: Os autores

Figura 6 – Diagrama de distribuição espacial do TR para 2000 Hz, para a configuração de cortina fechada e janela fechada (a) e cortina aberta e janela fechada (b)



Fonte: Os autores

Figura 7 – Diagrama de distribuição espacial do TR para 4000 Hz, para a configuração de cortina fechada e janela fechada (a) e cortina aberta e janela fechada (b)



Fonte: Os autores

Na Tabela 2 são apresentados os tempos de reverberação por frequência sonora (500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz), em função de sua frequência de ocorrência acumulada (%), tanto para a situação de cortinas abertas (CA), como de cortinas fechadas (CF). São apresentadas, também, nessa tabela, as diferenças de TR para 50% dos pontos da sala (T75-T25) e para 90% dos pontos da sala (T95-T5).

Uma distribuição de frequência agrupa os dados por classes de ocorrência, resumindo a análise de uma grande massa de dados. A diferença entre o terceiro (T75) e o primeiro quartil (T25) é uma medida mais estável que a amplitude total por não considerar os valores mais extremos. Esta medida abrange 50% dos dados e é útil para detectar valores discrepantes (GUEDES et al, 2005). Para a comparação das distribuições também foram utilizados os pontos de corte entre o percentil 5 (T5) e o percentil 95 (T95). Esses pontos de corte foram escolhidos por descartarem os valores mais extremos.

Tabela 2 – Tempos de reverberação, em segundos, em função de sua frequência de ocorrência espacial acumulada (%)e em função da frequência do som (Hz).

Frequência de ocorrência acumulada	Frequência do Som (Hz)							
	500		1000		2000		4000	
	CA	CF	CA	CF	CA	CF	CA	CF
5%	1,04	1,20	1,01	1,01	0,91	0,72	0,71	0,61
25%	1,08	1,25	1,06	1,11	0,95	0,76	0,76	0,65
50%	1,11	1,27	1,08	1,13	0,97	0,79	0,78	0,67
75%	1,13	1,29	1,10	1,15	1,00	0,84	0,80	0,72
95%	1,17	1,36	1,14	1,22	1,04	0,90	0,86	0,82
T75-T25	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,08	0,04	0,07
T95-T5	0,13	0,16	0,13	0,21	0,13	0,18	0,15	0,21

Fonte: Os autores

De modo geral, a distribuição dos tempos de reverberação calculada mostra um ambiente relativamente homogêneo, já que, para todas as situações analisadas, em 50% dos pontos (T75-T25), as diferenças dos TRs variam de 0,04 s a 0,08 s e em 90% dos pontos (T95-T5), as diferenças entre 0,13 s e 0,21 s, sendo as menores

diferenças obtidas na condição de cortinas abertas. As diferenças observadas estão dentro da ordem de grandeza das incertezas das medições de tempos de reverberação calculada que foi de 0,06 s.

É possível verificar que, para este ambiente, o efeito da abertura da cortina é variável em função da frequência, tendo efeito desprezível em 1000 Hz. Para a frequência de 500 Hz o tempo de reverberação é da ordem de 0,16 s maior na condição de cortinas fechadas do que na condição de cortinas abertas. Já para a frequência de 2000 Hz a situação se inverte sendo os tempos de reverberação 0,16 s maiores na situação de cortina aberta do que na condição de cortina fechada.

4 CONCLUSÕES

O uso das cortinas não melhora significativamente a homogeneidade da distribuição do tempo de reverberação no ambiente estudado. O impacto da utilização de cortinas sobre o valor do tempo de reverberação é variável em função da frequência e pode ter sido decorrente, na situação de "cortina fechada" a um acúmulo de material absorvedor sonoro em "tiras" verticais em posições específicas que interagiram com determinados comprimentos de onda específicos. Em continuidade a esse trabalho, pretende-se repetir essas simulações em malhas mais finas para se investigar melhor esse impacto.

No contexto das salas de aula, este estudo e sua continuação são importantes como exploração inicial das inúmeras variáveis que influenciam no conforto dos alunos e professores. Além do impacto do uso das cortinas, o uso da janela aberta ou fechada, como também as condições de iluminação e ventilação desses ambientes são aspectos importantes que inter-relacionados com a acústica das salas também devem ser considerados no processo de decisão do usuário com relação à abrir ou fechar janelas e cortinas nas salas de aula.

AGRADECIMENTOS

A Elisa Morandé Sales pelo auxílio no cálculo das incertezas de medida.

REFERÊNCIAS

BRÜEL & KJæR. **DIRAC Room Acoustics Software Type 7841, User Manual: Version 6.0**, Dinamarca, 2013.

CHRISTENSEN, C.L.; RINDEL, J.H. Predicting Acoustics in Class Rooms. **Anais**: INTER NOISE 2005, Rio de Janeiro, 2005.

DFES, GREAT BRITAIN DEPARTMENT FOR EDUCATION AND SKILLS. **Acoustic design of schools**: a design guide (Building bulletin 93), Stationery Office, 2003.

GUEDES, T.A.; MARTINS, A.B.T.; ACORSI, C.R.L., JANEIRO, V. **Projeto de ensino aprender fazendo estatística,** 2005.

IKEDA, C.Y.K. **Determinação de faixas de operação de parâmetros acústicos para avaliação da qualidade sonora de salas de aula**. 2018. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-15012019-162548/en.php>. Acesso em: 26 jun. 2019.

INTERNATIONAL ONGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382-1: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces**. Suíça, 2009.

ODEON A/S: **Odeon**. Versão 10.02 Combined. Dinamarca: 2009.

ODEON A/S. **ODEON Room Acoustics Software**. User's Manual. Version 14. Lyngby. 2018.

RINDEL, J.H. Room acoustic prediction modelling. **Anais**: XXIII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, Salvador, 2010.