

Comparação do tempo de reverberação e índice de transmissão da fala (STI) em salas de aula construídas em décadas diferentes

Comparison of the reverberation time and speech transmission index (STI) in classrooms built in different decades

Paulo Henrique Trombetta Zannin
Andressa Maria Coelho Ferreira
David Queiroz de Sant'Ana

Resumo

Este trabalho compara e avalia os valores de tempos de reverberação TR medidos em dois edifícios didáticos da Universidade Federal do Paraná construídos em épocas diferentes. O TR de cada sala foi medido segundo a norma ISO 3382-1. O presente trabalho apresenta simulações referentes ao TR e Índice de Transmissão da Fala – STI. Nas simulações realizadas com o software ODEON, é observada a influência de diferentes materiais de acabamento sobre o TR e sobre o STI. As simulações indicaram para uma das salas do bloco JB, com TR médio de 2,5 s, a necessidade de substituição de alguns materiais de acabamento, especialmente no piso e no teto, por outros materiais com maior coeficiente de absorção sonora. Os resultados das simulações apontam para a redução de quase 2 s no TR após a substituição dos materiais do teto e piso. Com relação ao STI, a situação inicial apontava valores entre 0,39 e 0,42, o que classificava como “ruim” a inteligibilidade segundo os padrões estabelecidos pela norma IEC 60268-16. A redução do TR conduziu os resultados simulados para o STI a se situarem entre 0,73 e 0,76, sendo então a inteligibilidade classificada pela norma IEC, como “boa”.

Palavras-chave: Acústica. Salas de aula. Tempo de Reverberação. Simulações computacionais. Índice de Transmissão da Fala.

Abstract

This study compares and evaluates the reverberation times (RT) measured in two classroom buildings at the Federal University of Paraná, which were built in different decades. The RT of each room was measured according to the ISO/3382-1 standard. This paper presents simulations of RT and the speech transmission index (STI). In the simulations performed with the software ODEON, the influence of different materials on those indexes is analyzed. For one of the classrooms in the BG building, whose measured mean RT was 2.5 s, the simulations indicated the need to replace some of the finishing materials, especially on the floor and ceiling, for others with greater sound absorption coefficient. Results of the simulations pointed to a reduction in almost 2 s in RT. With respect to STI, the initial situation pointed to values between 0.39 and 0.42, which meant that intelligibility was poor, according to limits set by the IEC 60268-16 standard. The reduction in RT led STI values to range between 0.73 and 0.76, rendering intelligibility as good, according to the IEC 60268-16 standard.

Keywords: Acoustics. Classroom. Reverberation time. Computer simulations. Speech transmission index.

Paulo Henrique Trombetta
Zannin
Laboratório de Acústica Ambiental
- Industrial e Conforto Acústico,
Programa de Pós-Graduação em
Recursos Hídricos e Engenharia
Ambiental, Mestrado Profissional
em Meio Ambiente Urbano e
Industrial, Programa de Pós-
Graduação em Educação Física e
Enfermagem
Universidade Federal do Paraná
Centro Politécnico, Bairro Jardim
das Américas, Curitiba - PR - Brasil
Caixa Postal 19011
CEP 81531-990
Tel.: (41) 3361-3433
E-mail: zannin@ufpr.br

Andressa Maria Coelho
Ferreira
Laboratório de Acústica Ambiental
- Industrial e Conforto Acústico,
Universidade Federal do Paraná
E-mail: arqferreira@yahoo.com.br

David Queiroz de Sant'Ana
David Queiroz Arquitetura S. S.
Ltda.
Av. República Argentina, 452 cj.
1102, Água Verde, Curitiba - PR -
Brasil
CEP 80240-210
Tel.: (41) 3085-8400
Email: david@davidqueiroz.arq.br

Recebido em 27/11/08
Aceito em 03/03/09

Introdução

Existe a necessidade de estudos dos problemas acústicos das edificações com o objetivo de atingirem-se condições mínimas exigidas, de acordo com o uso e as atividades dos ocupantes. As atividades principais em uma universidade são baseadas na comunicação verbal. Para assegurar boa condição acústica para a palavra falada, o desempenho acústico de salas de aula deve ser considerado no lançamento do projeto arquitetônico, visto que o espaço é destinado à realização de tarefas que exigem alto nível de concentração (FERREIRA, 2006).

A educação formal está baseada em grande parte na comunicação verbal entre professores e alunos. Excesso de ruído e de reverberação em uma sala de aula dificulta a comunicação, transformando-se em uma barreira ao processo de aprendizado (LUBMAN; SUTHERLAND, 2003).

Hagen, Huber e Kahlert (2002) comentam que ouvir e escutar ainda são percebidos como um dever do estudante, e não como uma tarefa pedagógica. Ouvir não é suficiente; é necessário escutar de tal maneira que a percepção e a inteligibilidade dos sons emitidos entre alunos e professores sejam alcançadas.

Ainda segundo Hagen, Huber e Kahlert (2002), professores e alunos não estão cientes dos efeitos causados pela falta de um projeto acústico na transmissão de informações e no aprendizado.

Fernandes e Viveiros (2002) e Bradley (2002) sugerem que os efeitos combinados de ruído excessivo no ambiente e reverberação em salas de aula interferem no reconhecimento da fala e tendem a degradar o processo de aprendizagem.

O Tempo de Reverberação deve estar de acordo com o uso do espaço, não devendo ser longo em demasia para não perturbar a clara percepção do som, mas, também, não ser pequeno ou curto demais, o que prejudica a percepção de alguns tipos de fontes sonoras (LOSSO, 2003).

De acordo com Hodgson (2004), tempos de reverberação adequados contribuem para um melhor aprendizado nas salas de aula, contudo esse parâmetro tem sido freqüentemente negligenciado.

Para garantir boas condições acústicas para a palavra falada, a performance acústica de salas de aula deve ser levada em consideração desde a etapa do projeto arquitetônico, uma vez que esse espaço é destinado para tarefas que requerem um alto nível de concentração intelectual. Avaliações acústicas em ambientes escolares (escolas de primeiro e segundo graus e universidades) têm sido objeto de inúmeras publicações em periódicos

acadêmicos, congressos, dissertações de mestrados e teses (ASTOLFI; PELLERREY, 2008; CHIANG; LAI, 2008; ERCOLI; AZZURRO, 2001; EWANS; MAXWELL, 2000; HODGSON, 2001; 2002; 2004; HODGSON; SCHEREBNYJ, 2006; KENNEDY *et al.*, 2006; KNUDSEN, 1929; KRÜGER; ZANNIN, 2004; LERCHER; EVANS; MEIS, 2003; LORO, 2003; MAFFEI *et al.*, 2004; SALA; VILJANEN, 1995; SHIELD; DOCKRELL, 2003, 2004; ZANNIN; FERREIRA, 2007; ZANNIN; ZWIRTES, 2009; ZANNIN; PASSERO; SANT'ANA, 2009; ZWIRTES, 2006).

O objetivo deste trabalho é medir e comparar o Tempo de Reverberação das salas de aula da Universidade Federal do Paraná, em dois prédios didáticos construídos em épocas diferentes, através de medições *in situ*.

Neste trabalho também foram realizadas simulações com o software Odeon 9.0 (ODEON A/S, 2007) para buscar a adequação acústica com relação ao Tempo de Reverberação e do Índice de Transmissão da Fala (STI – *Speech Transmission Index*) de uma sala avaliada, a qual apresentou o maior Tempo de Reverberação médio, 2,5 s, entre todas as salas medidas. Foram indicados os materiais acústicos que apresentam o melhor desempenho, visando atingir as recomendações das normas nacionais e internacionais.

Características arquitetônicas das salas avaliadas

Blocos Didáticos: Centro Politécnico

O prédio denominado de Blocos Didáticos foi construído em 1963 para atender ao Setor de Tecnologia do Campus III da Universidade Federal do Paraná. Essa construção compreende seis blocos interligados, de igual padrão construtivo e de mesma disposição arquitetônica. Cada bloco tem uma circulação principal, que dá acesso às salas de aula. As salas estão distribuídas somente em um dos lados do corredor.

Esses blocos foram construídos em estrutura de concreto armado (pilares, vigas e lajes); paredes de alvenaria dupla com reboco e pintura; esquadrias de ferro e fechamento em vidro comum de 4 mm; porta em painel de madeira estruturado; teto com forro de fibra lenhosa com espessura de 20 mm, perfurado, afastado da laje 300 mm; e piso em parquet de madeira no interior das salas de aula (Figura 1). Na circulação externa o piso é de granitina moldada *in loco*.

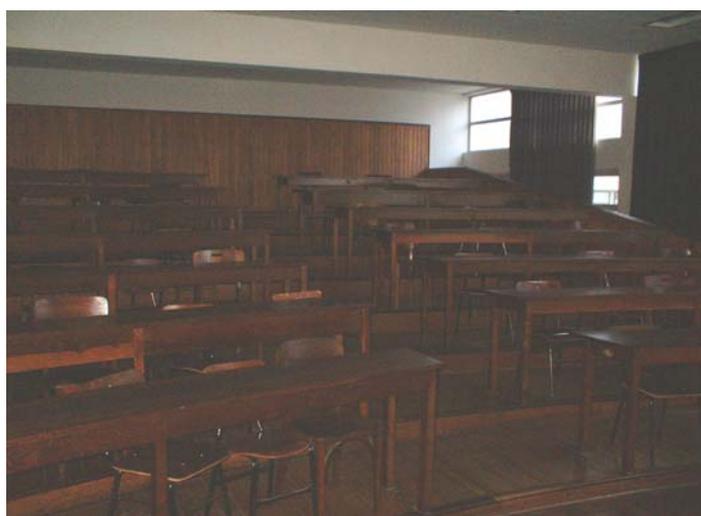


Figura 1 - Fotografia da sala PG 06 do Setor de Tecnologia: centro politécnico



Figura 2 - Fotografia da sala SATE-03 do Setor de Ciências Sociais Aplicadas: Jardim Botânico

Bloco das Ciências Sociais Aplicadas: Jardim Botânico

No ano de 2000 foi construído o Bloco das Ciências Sociais Aplicadas, para atender ao Setor de Ciências Humanas do Campus III da Universidade Federal do Paraná. A construção possui um pátio coberto, central, que dá acesso a todas as salas de aula, através de um corredor periférico. Desse pátio podem-se visualizar todas as salas de aula de todos os três pavimentos.

As salas de aula foram projetadas em módulos, em estrutura de concreto armado (pilares, vigas e lajes); paredes de alvenaria com reboco e pintura; esquadrias de PVC e fechamento em vidro comum de 4 mm; porta em painel de madeira estruturado e pintada; teto em laje nervurada sem

forro com vigas aparentes; e piso vinílico nas salas e nas circulações (Figura 2).

Metodologia

Neste trabalho foram avaliadas oito salas de aula no prédio dos Blocos Didáticos do Centro Politécnico e sete salas de aula no prédio do Bloco das Ciências Sociais Aplicadas do Jardim Botânico. O critério adotado foi a seleção por tipologia arquitetônica e características geométricas das salas de aula.

As medições de Tempo de Reverberação foram realizadas com as salas mobiliadas e sem ocupantes, no período das férias, para que os ruídos externos não interferissem nos resultados. Essa avaliação foi feita no período da tarde, entre

14h00 e 17h00, com as portas e as janelas das salas de aula fechadas e em dias sem chuva.

Em cada sala foram medidos cinco pontos. Cada ponto representa uma combinação de posição relativa entre a fonte sonora e o microfone de captação. A fonte sonora foi posicionada sobre o eixo da sala de aula a 2 m do quadro negro, onde o professor costuma permanecer.

A Figura 3 mostra o esquema de posicionamento da fonte sonora denominada P1 e dos cinco pontos de locação dos microfones referenciados na figura pelos números ímpares 1, 3, 5, 7 e 9, adotados para as medições.

O método utilizado para a obtenção do Tempo de Reverberação foi o Método do Ruído Interrompido (*Interrupted Noise Method*), seguindo o prescrito, para esse tipo de medição, pelas normas ISO 3382:1997 (ISO, 1997) – *Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters* e pela ISO 3382-1 – *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance rooms* (ISO, 2006), que vem a ser uma revisão da norma ISO 3382:1997. Ambas as normas apresentam a seguinte definição para *Interrupted Noise Method*: “método de obtenção de curvas de decaimento por registro direto do decaimento do nível de pressão sonora após a excitação de uma sala com um ruído de banda larga ou de banda delimitada” (tradução nossa).

Para a medição dos tempos de reverberação foi utilizado um analisador em tempo real de dois canais BK 2260, o qual emite um sinal sonoro – ruído rosa – para o amplificador de potência BK 2716, que está conectado à fonte sonora do decaédrica BK 4296. O som gerado é, então, captado por um microfone conectado ao analisador BK 2260, o qual calcula automaticamente o Tempo de Reverberação para cada frequência do espectro de interesse, conforme uma programação prévia do analisador. Os dados medidos em campo foram transferidos

para um computador e tratados com o auxílio do programa Qualifier Qualifier BK 7830 (BRÜEL & KJAER..., 2006). Esse programa realiza o processamento das curvas de decaimento sonoro e calcula o Tempo de Reverberação, possibilitando também sua avaliação gráfica.

Avaliadas as salas, escolheu-se uma para se realizarem simulações computacionais com o programa de computador Odeon 9.0 (ODEON A/S, 2007). Optou-se pela sala “D”, uma sala do Bloco das Ciências Sociais Aplicadas do Jardim Botânico, visto que sua qualidade acústica não atendia de forma satisfatória aos padrões nacionais e internacionais para salas de aula ou auditórios em que a ênfase de uso seja a palavra falada.

As simulações foram realizadas em duas etapas. A primeira consiste na aplicação das equações tradicionais (Sabine e Eyring) para a predição do Tempo de Reverberação de recintos fechados. As equações podem ser observadas nos itens (a) e (b) abaixo.

(a) equação de Sabine:

$$TR = \frac{0,163V}{A} \quad (1)$$

onde TR é o Tempo de Reverberação do(s) recinto(s); V é o volume da sala em m^3 ; e A é a área de absorção.

A é definido pelo produto da área de cada superfície pelo coeficiente de absorção sonora α característico de seu material. Além dos elementos construtivos da sala de aula, devem-se considerar as áreas de absorção sonora dos elementos adicionais de funcionalidade do ambiente (lousa, mesas, carteiras escolares e pessoas), bem como a atenuação sonora do ar.

A área total de absorção de uma sala pode então ser expressa como a soma das parcelas da Tabela 1.

$$A \text{ é dado por: } A = A_a + A_b + A_e + A_p + A_l (m^2) \quad (2)$$

A_a	absorção equivalente da sala	m^2
A_b	absorção equivalente das paredes	m^2
A_e	absorção equivalente dos objetos	m^2
A_p	absorção equivalente referente às pessoas na sala	m^2
A_l	absorção equivalente do ar no ambiente	m^2
F	Frequência	Hz

Fonte: Hohmann *et al.* (2004)

Tabela 1 - Áreas de absorção sonora equivalente dos elementos adicionais de funcionalidade do ambiente

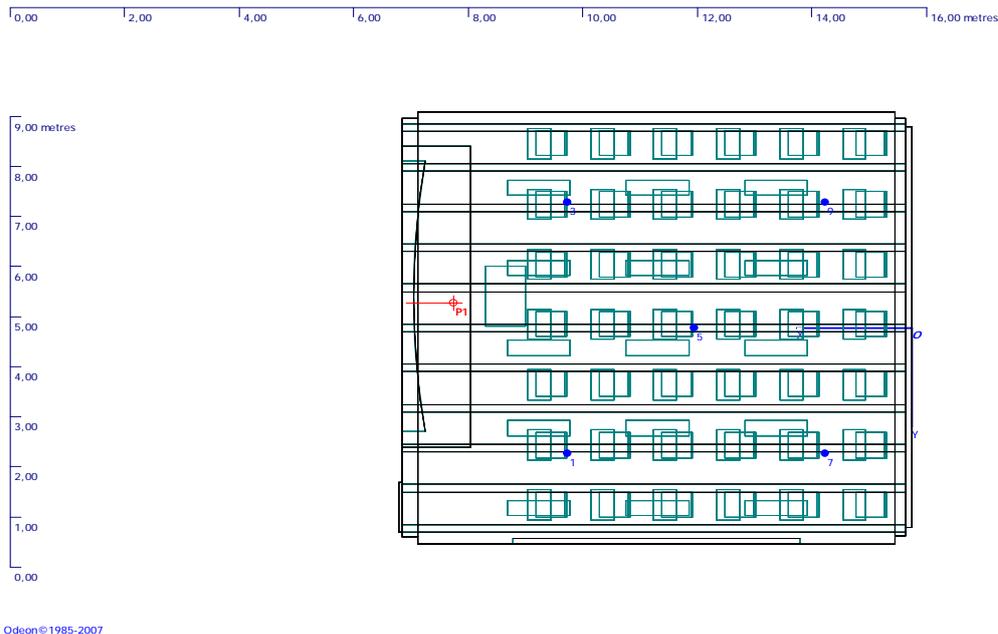


Figura 3 - Posicionamento da fonte sonora e do microfone nas medições de campo

(b) equação de Eyring:

$$TR = \frac{0,161V}{-2,3S \log(1 - \alpha_m)} \quad (s) \quad (3)$$

Onde TR é o Tempo de Reverberação do(s) recinto(s); V é o volume da sala em m^3 ; S é a área total das superfícies interiores do recinto (m^2); e α_m é o coeficiente médio ponderado de absorção sonora das várias superfícies interiores do ambiente e todos os elementos, absorventes e reflexivos, nele contidos.

Na segunda etapa utilizou-se o programa Odeon versão 9.0 (ODEON A/S, 2007), para realizar as simulações computacionais com respeito ao Tempo de Reverberação e ao Índice de Transmissão da Fala (STI – *Speech Transmission Index*). Esse software utiliza um método híbrido denominado de método da fonte secundária (NAYLOR, 1993; RINDEL, 2000). Nesse método, uma fonte secundária é gerada no ponto de colisão a cada vez que um raio é refletido por uma superfície. Essa nova fonte simula a reflexão, irradiando a energia sonora com intensidade proporcional ao co-seno do ângulo obtido entre a superfície normal e o vetor que parte da fonte secundária em direção ao receptor. Os métodos híbridos combinam as potencialidades dos dois métodos geométricos clássicos (*Ray-tracing*, *Image Source*), a velocidade do método de fonte imagem e as capacidades de tratamento da difusão do traçado de raios (LONG, 2006; VORLÄNDER, 1989).

A simulação computacional realizada nessa etapa oferece uma grande vantagem em relação às predições tradicionais. Nas simulações, definidas as áreas de absorção necessárias para o correto condicionamento de uma sala, é possível avaliar em quais superfícies a absorção é mais conveniente. Esse é um recurso bastante útil durante a etapa de projeto arquitetônico.

A fim de se obter uma predição computacional confiável, devem-se observar atentamente as características das superfícies da sala quanto aos coeficientes de absorção e difusão sonora, bem como evitar erros quanto à geometria no modelo tridimensional digital.

Segundo Zannin *et al.* (2005), para garantir a confiabilidade dos dados, faz-se necessário identificar criteriosamente os coeficientes de absorção sonora dos elementos construtivos das salas de aula. Esses dados são tabulados e disponíveis em literatura (CRUZ DA COSTA, 2003; FASOLD; VERES, 2003; GERGES, 2000; HENN; SINAMBARI; FALLEN, 1999; HOHMANN; SETZER; WEHLING, 2004; LUTZ *et al.*, 2002; MÖSER, 2004), entretanto alguns testes devem ser feitos no intuito de se obter a melhor aproximação possível dos elementos tabelados para com os elementos encontrados no ambiente real.

Além das características dos materiais de acabamento da construção, a norma EN 12354-6 recomenda adotar os valores para o coeficiente de absorção sonora do ar m , para a temperatura de $t = 20^\circ C$ e para a umidade relativa do ar de $f = 70\%$

(HOHMANN; SETZER; WEHLING, 2004). Neste trabalho foram utilizados os valores para o coeficiente de absorção do ar conforme Heckl e Müller (1995).

A reprodução das condições existentes em modelos estatísticos e de computador aumenta a confiabilidade de sua utilização em projeto e na predição de situações ainda inexistentes. Neste trabalho, para a calibração dos modelos, foram utilizados os coeficientes de absorção sonora dispostos na Tabela 2 para cálculo do Tempo de Reverberação.

Resultados e discussões

Os valores de Tempo de Reverberação encontrados nas salas de aula do centro politécnico, sem ocupantes, são apresentados no Figura 4.

Para a avaliação do Tempo de Reverberação, a medição do *TR*, deve ser feita a análise espectral

do ruído no ambiente de interesse. A norma ISO 3382 (1997), assim como o referendado por pesquisadores como Bistafa e Bradley (2000), Sant'Ana, (2008), Zannin e Zwirtes (2009), Zannin; Passero e Sant'Ana, (2009), recomenda avaliações nas frequências entre 125 Hz e 4.000 Hz. Entretanto, para situações onde a fala é atividade principal, como é o caso de salas de aula, torna-se mister efetuar uma análise mais apurada nas frequências de 500, 1.000 e 2.000 Hz (ANSI, 2002).

Ainda que analisada banda a banda, um valor único é freqüentemente utilizado para expressar o Tempo de Reverberação de uma sala. Esse valor é a média aritmética dos tempos de reverberação obtidos para as frequências de 500 Hz, 1.000 Hz e 2.000 Hz (FRANÇOIS; VALLET, 2001). A Tabela 3 mostra os valores do Tempo de Reverberação médios para as salas de aula desocupadas e mobiliadas.

Coeficiente Absorção Sonora α		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
JB	Parede tijolos rebocada caiada	0,018	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
CP							
JB	Forro laje nervurada	0,01	0,01	0,015	0,015	0,02	0,02
CP	Forro em fibra lenhosa, espessura 20 mm	0,25	0,30	0,30	0,40	0,55	0,60
JB	Janela simples fechada	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
CP							
JB	Porta madeira pintada	0,20	0,15	0,10	0,10	0,09	0,11
CP							
JB	Piso vinílico	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,10
CP	Piso parquet madeira	0,04	0,04	0,06	0,12	0,10	0,15
JB	Tablado emborrachado	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,10
CP	Tablado de madeira	0,09	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10
JB	Quadro negro de madeira, espessura 3 mm	0,28	0,20	0,10	0,10	0,08	0,08
CP							
JB	Cortina de PVC	0,06	0,06	0,17	0,17	0,03	0,03
CP	Cortina de jeans	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10
JB	Carteiras de fórmica	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
CP	Carteiras de madeira	0,02	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03
JB	Cadeiras de fórmica	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
CP	Cadeiras de madeira	0,02	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03

Tabela 2 - Coeficientes de absorção sonora dos materiais existentes nas salas do Centro Politécnico (CP) e do Jardim Botânico (JB)

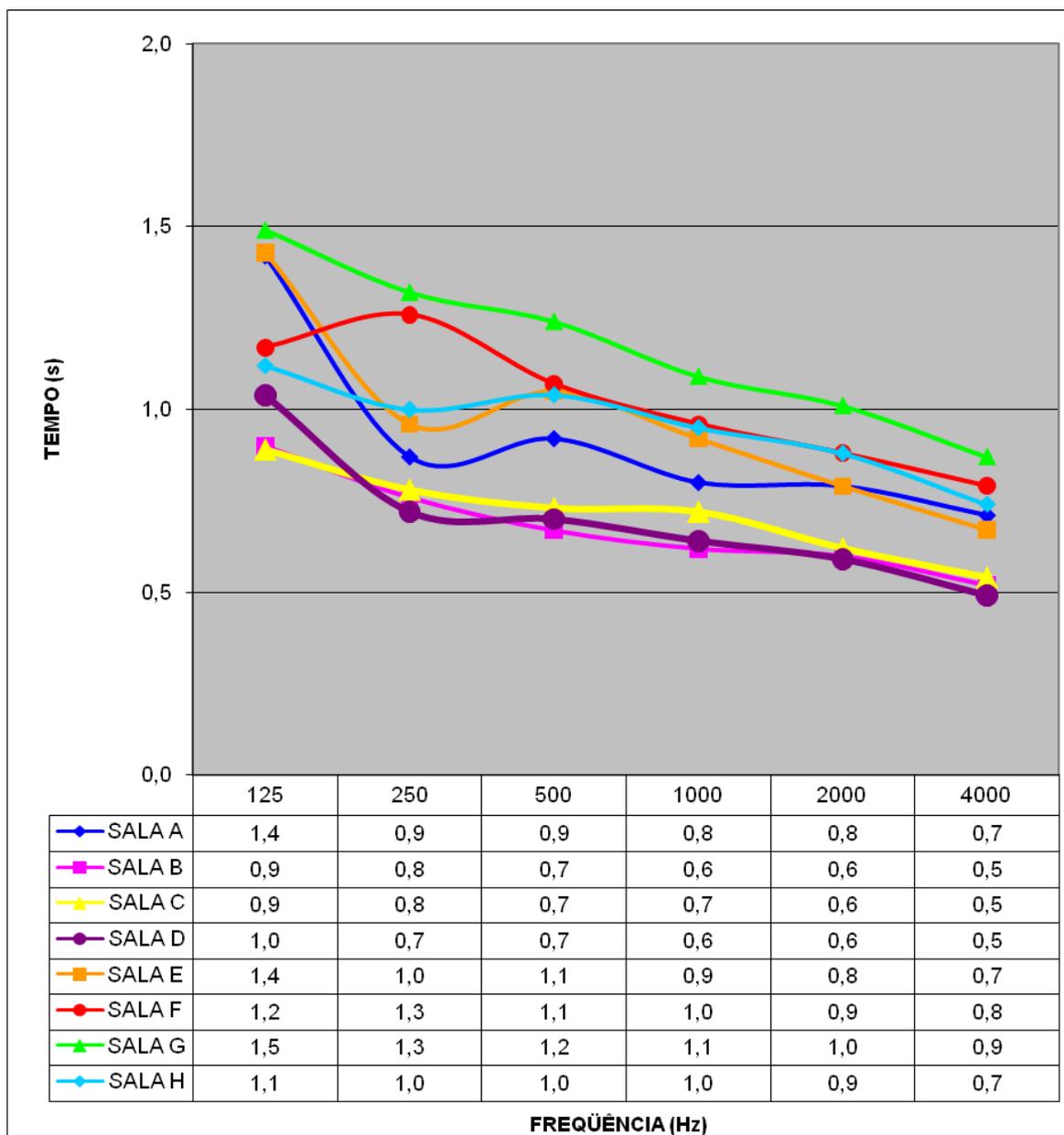


Figura 4 - Valores dos tempos de reverberação medidos nas salas de aula do centro politécnico, sem ocupantes e mobiliada

SALAS	VOLUME V (m³)	ÁREA DE ABSORÇÃO MÉDIA (m²)	TEMPO DE REVERBERAÇÃO TR (s)
A	367,18	67,99	0,8
B	294,74	58,87	0,6
C	294,74	58,73	0,7
D	294,74	58,89	0,6
E	367,18	67,99	0,9
F	367,18	61,07	0,9
G	564,93	71,98	1,1
H	330,53	45,16	0,9

Tabela 3 - Tempo de Reverberação como média aritmética dos Tempos de Reverberação nas frequências de 500, 1.000 e 2.000 hz nas salas do centro politécnico

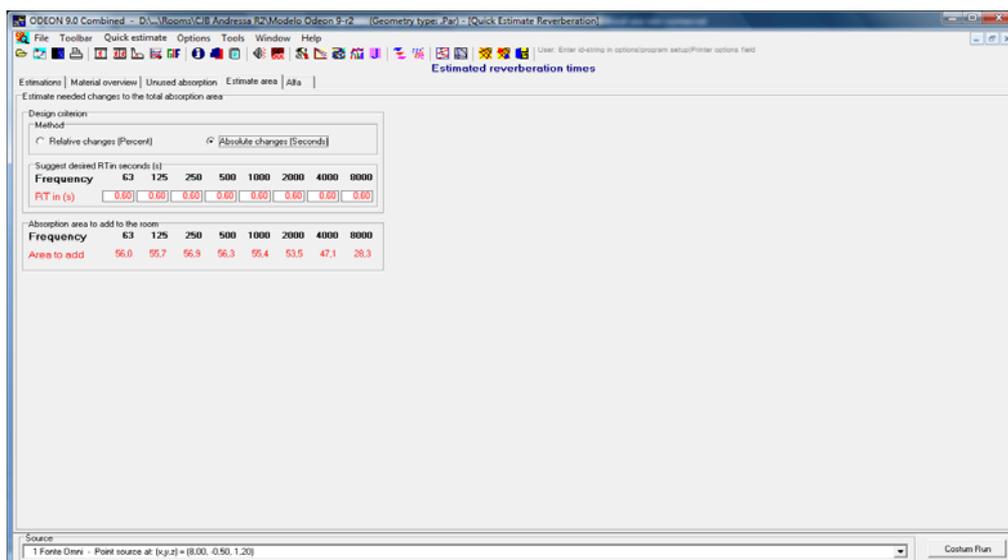


Figura 5 - Estimativa de áreas de absorção em função do TR desejado

Os valores de Tempo de Reverberação medidos nas salas “B”, “C” e “D”, com volume de 294,74 m³, que foram projetadas como anfiteatros, variam de 0,6 s a 0,7 s, estando de acordo com os valores recomendados pela norma americana ANSI S12.60 (2002), de 0,7 s nas frequências de 500 Hz, 1.000 Hz e 2.000 Hz para salas de aula com volumes entre 283 m³ e 566 m³. As salas “B”, “C” e “D” satisfazem também o proposto por Bistafa e Bradley (2000), que sugerem um TR adequado para salas de aula entre 0,6 s e 0,8 s.

Cabe ressaltar que as salas avaliadas foram construídas na década de 60 para atender à universidade pública. As dificuldades burocráticas tornam por vezes a conservação do prédio deficiente. Apesar disso, as salas “E”, “F”, “G” e “H” estudadas necessitariam de poucas intervenções para que os valores recomendados possam ser alcançados.

O mesmo não se pode dizer das salas do bloco jardim botânico. Estas salas possuem tempos de reverberação excessivamente altos. Com volumes inferiores a 280 m³, as salas apresentam valores médios para o Tempo de Reverberação entre 1,3 s e 2,5 s.

Os valores de Tempo de Reverberação, medidos nas salas de aula do Bloco das Ciências Sociais Aplicadas – Campus Jardim Botânico, avaliadas sem ocupantes e mobiliadas, são apresentados na Figura 6, e as médias das bandas de 500 Hz, 1.000 Hz e 2.000 Hz na Tabela 4.

Tempos de reverberação inadequados podem ser considerados como uma causa crítica para a

queda de qualidade do ensino, pois a comunicação se torna excessivamente difícil, causando prejuízos ao processo de aprendizagem, conseqüentemente à formação acadêmica e à sociedade.

As medições de campo demonstraram a necessidade de adequação acústica das salas de aula, em especial as do Bloco das Ciências Sociais Aplicadas do Campus Jardim Botânico.

Os resultados das simulações acústicas da sala de aula “D”, segundo as equações de Sabine e Eyring, indicam a necessidade de se acrescentar cerca de 55 sabines nas frequências de 500, 1.000 e 2.000 Hz para que o TR desejado de 0,6 s seja alcançado para essa sala de aula. Os acréscimos de absorção em sabines para cada banda de oitava são apresentados na Figura 5.

A utilização de materiais leves e porosos, bons absorvedores acústicos para a redução da reverberação e controle de ruído em ambientes de trabalho, é recomendação amplamente difundida entre pesquisadores e a indústria da construção civil. Materiais absorventes de som, principalmente no forro e no piso, devem ser utilizados no tratamento acústico de salas de aula (FRANGOS, 2003; HODGSON, 2002; ZANNIN; MARCON, 2007).

Para a redução do TR de 2,5 s, encontrado na sala “D” do jardim botânico, para 0,6 s, foram utilizados materiais disponíveis atualmente no mercado da construção civil, conforme a Tabela 5.

SALAS	VOLUME V (m ³)	ÁREA DE ABSORÇÃO MÉDIA (m ²)	TEMPO DE REVERBERAÇÃO TR (s)
A	277,49	24,50	1,3
B	277,80	23,87	1,3
C	156,10	14,76	1,8
D	277,49	15,74	2,5
E	277,80	14,52	2,7
F	156,10	9,40	2,3
G	156,14	16,94	1,5

Tabela 4 - Tempo de Reverberação como média aritmética dos Tempos de Reverberação nas frequências de 500, 1.000 e 2.000 hz nas salas do jardim botânico

Coefficiente Absorção Sonora α	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Forro Prisma Decor – Isover do Brasil ¹	0,64	0,72	0,66	0,84	0,91	0,90
Piso de parquet de madeira sobre concreto ²	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10

Fonte: 1 Isover do Brasil; 2 Odeon S.A.

Tabela 5 - Coeficientes de absorção sonora dos materiais utilizados para correção do TR na sala "d" do jardim botânico

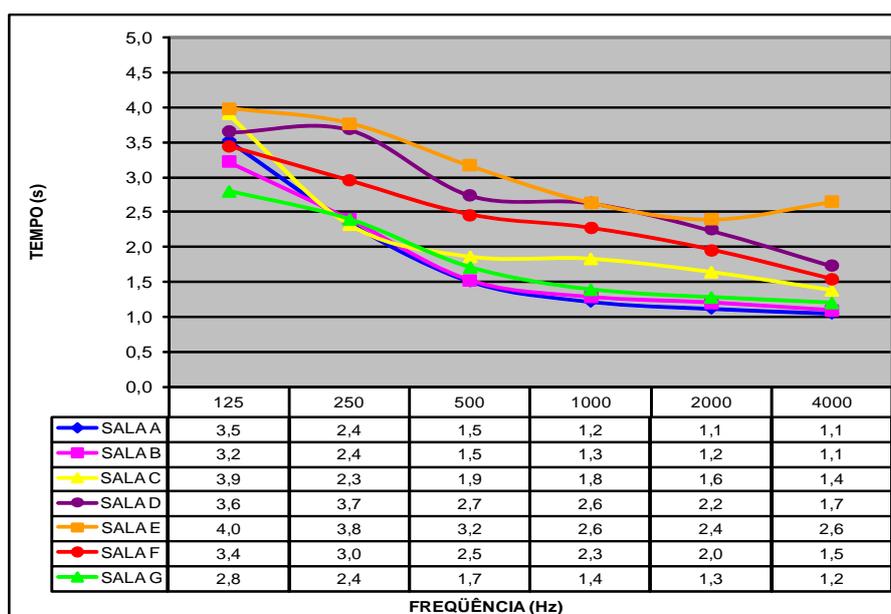


Figura 6 - Valores dos Tempos de Reverberação medidos nas salas do Jardim Botânico, sem ocupantes e mobiliada

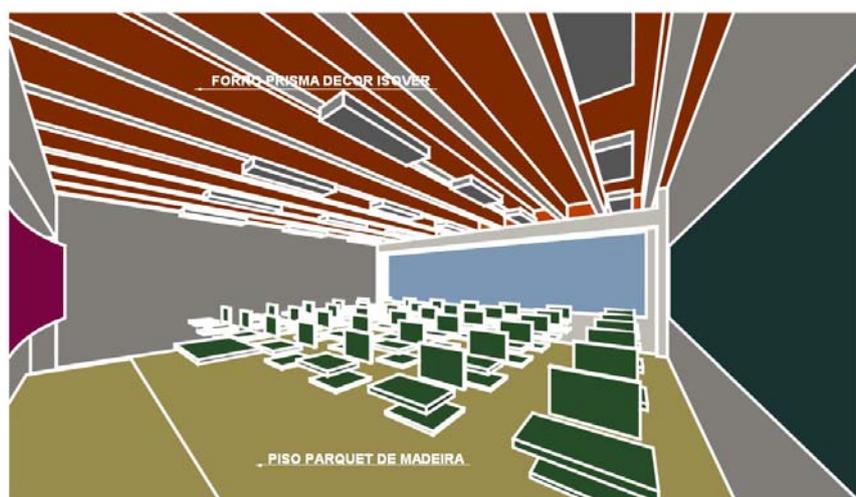


Figura 7 - Superfícies sugeridas para o tratamento acústico

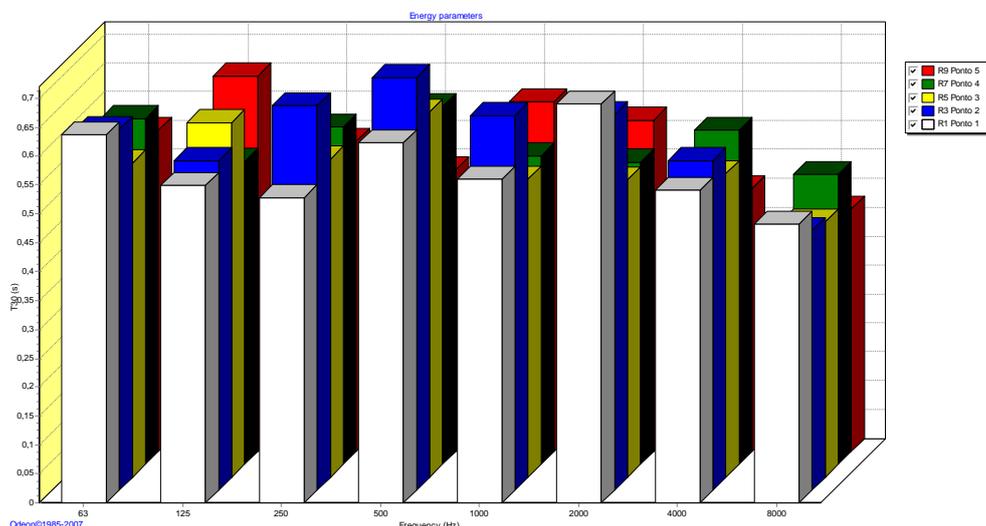


Figura 8 - Tempos de Reverberação simulados para a sala “D” tomados ponto a ponto

Foi sugerida na simulação a substituição do piso vinílico encontrado na sala existente por um revestimento de madeira (parquet) – material bastante comum nas construções brasileiras. Além do piso, o teto foi tratado, revestindo-se toda sua superfície, exceto as bases das vigas, revestidas com um forro de alta absorção sonora, modelo Prisma Decor, também disponível no mercado da construção civil. As áreas tratadas são apresentadas na Figura 7.

Verificou-se que a troca de revestimentos produziu um ambiente com uma reverberação em torno de 0,6 s, o que satisfaz as recomendações da norma ANSI S12.60, a qual estabelece como valor ótimo de referência 0,6 s para o Tempo de Reverberação nas frequências de 500, 1.000 e

2.000 Hz, para salas de aula com volume menor do que 283 m³.

A Figura 8 apresenta os Tempos de Reverberação simulados ponto a ponto para a sala “D”, conforme posicionamento de pontos apresentados na Figura 3.

Por meio dessa simulação constatou-se que a pequena quantidade de absorção disponível atualmente na sala de aula “D” do jardim botânico produz um ambiente excessivamente reverberante para sua função, porém, após a indicação de novos materiais de revestimento, percebeu-se que sua condição acústica passou de desfavorável a adequada. O aumento da absorção sonora proposto para a sala “D” fez com que o Tempo de Reverberação ficasse concordante com

valores adotados internacionalmente, como, por exemplo, pela norma ANSI S12.60.

Além do TR, avaliou-se também o STI, através de simulação computacional.

O STI, definido na norma IEC 60268-16 – *Sound System Equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index* (2003), é outro parâmetro importante para se avaliar a inteligibilidade da fala dentro de uma sala, além do parâmetro *Deutlichkeit – D*, definido na ISO 3382 (1997).

Para se avaliar o STI assim como a *Deutlichkeit*, no entanto, uma grande quantidade de equipamentos se faz necessária, além dos já descritos para se avaliar o Tempo de Reverberação. Em especial, como explicitado de maneira tácita na norma IEC 60268-16 (2003), para a medição do STI é necessária a utilização de uma boca artificial para se simular a voz do orador; no caso de uma sala de aula, a voz do professor ou professora, além de um equalizador sonoro.

O procedimento de medição do STI e as limitações no uso desse parâmetro encontram-se descritos nos mínimos detalhes na Norma IEC 60268-16 (2003).

A Norma IEC define a qualidade da inteligibilidade da fala explicitando uma avaliação subjetiva correspondente a uma faixa

de valores medidos de STI, conforme a Tabela 6, abaixo.

Observa-se que, para todos os pontos medidos, os valores simulados correspondem a uma qualidade da inteligibilidade da fala, classificada segundo a norma IEC 60268-16 (2003) como “ruim” (ver Tabela 6).

As condições de inteligibilidade para todo o ambiente da sala reproduzem de maneira semelhante às obtidas para as posições tomadas uma a uma. A Tabela 7, abaixo, apresenta os resultados simulados para o STI tomando-se uma malha regular de 30 cm x 30 cm calculada a uma altura de 120 cm do piso. A Figura 9 mostra de maneira inequívoca a má qualidade da inteligibilidade da fala na sala “D” do jardim botânico.

As correções sugeridas para o TR apresentaram (ver Tabela 5 e Figura 6), como esperado, grande impacto sobre a inteligibilidade da fala.

Os resultados das simulações computacionais que adotaram materiais mais absorventes para o piso e o teto podem ser observados na Figura 10 e na Tabela 8, em que se pode notar um aumento de aproximadamente 30 pontos nos valores do STI.

Os valores obtidos para o STI após a redução da reverberação da sala “D”, acima de 0,70, caracterizam a nova condição acústica como de “boa” inteligibilidade, segundo a norma IEC 60268-16 (ver Tabela 6).

STI	Impressão Subjetiva
0,75 – 1,00	Excelente
0,60 – 0,75	Boa
0,45 – 0,60	Satisfatória
0,30 – 0,45	Ruim
0,00 – 0,30	Muito ruim

Tabela 6 - Grau de avaliação da inteligibilidade da fala através do STI segundo IEC 60268-16

Parâmetro energético	ponto 1	ponto 2	ponto 3	ponto 4	ponto 5
STI	0,4	0,42	0,39	0,39	0,39

Tabela 7 - Índice de Transmissão da Fala simulado para os pontos de medição avaliados in situ - reprodução das condições de campo

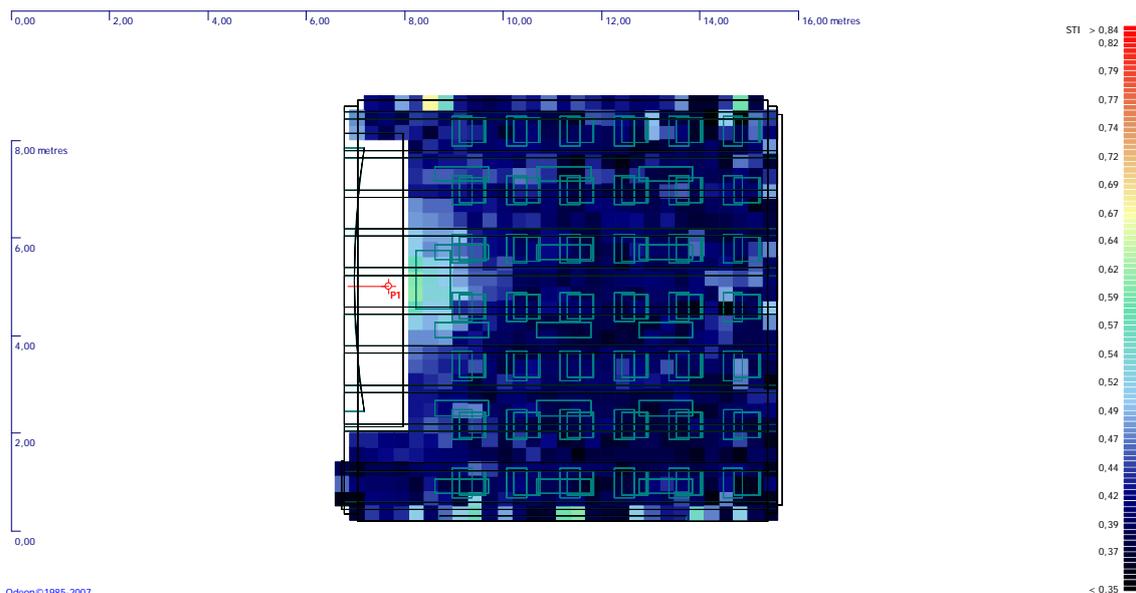


Figura 9 - STI para a sala de aula "D" conforme características arquitetônicas identificadas em campo

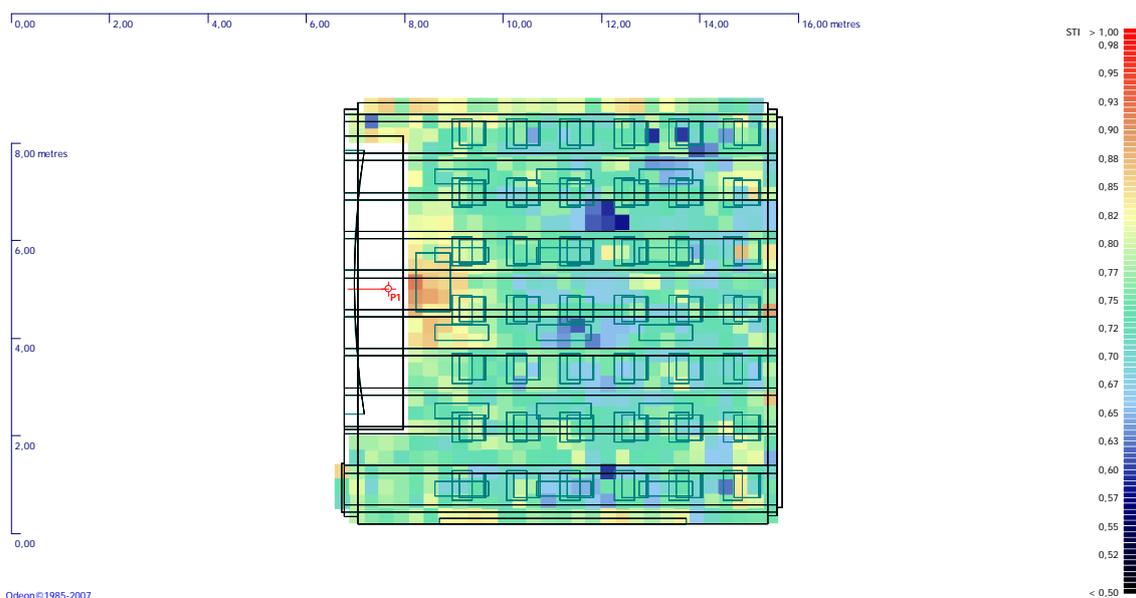


Figura 10 - Simulação do STI para a sala de aula "D" conforme substituição do revestimento do piso e adição de absorção no teto

Parâmetro energético	ponto 1	ponto 2	ponto 3	ponto 4	ponto 5
STI	0,76	0,75	0,73	0,75	0,73

Tabela 8 - Índice de Transmissão da Fala simulado para os pontos de medição avaliados in situ - substituição do revestimento do piso e adição de absorção no teto

Conclusões

Analisando os resultados, conclui-se que as salas de aula do centro politécnico, construídas na década de 60, apresentaram tempos de reverberação mais próximos dos recomendados por normas internacionais, como a norma americana ANSI S12.60. Observou-se que as salas de aula do centro politécnico necessitam de pouca ou nenhuma intervenção acústica para atingir os valores ótimos recomendados para o Tempo de Reverberação para salas de aula avaliadas na condição mobiliadas e vazias.

Os valores de Tempo de Reverberação encontrados nas salas de aula do jardim botânico, construídas no ano de 2000, não estão de acordo com os recomendados pela norma americana ANSI S12.60. Nenhuma sala do Campus Jardim Botânico satisfaz suas exigências.

Nas simulações acústicas da sala que apresentou o maior TR médio – sala “D” do jardim botânico –, a substituição do piso vinílico por parquet de madeira e a instalação de forro de material absorvente no teto mostraram-se eficientes para a adequação acústica da sala a suas atividades principais, aulas expositivas.

Observou-se, após as sugestões de controle da reverberação, uma redução de aproximadamente 2 s no Tempo de Reverberação. Os valores próximos a 0,5 s em todas as bandas de oitava estão em conformidade com os estabelecidos pela ANSI S12.60.

Observou-se também que as simulações do Índice de Transmissão da Fala apontaram para uma má inteligibilidade da fala na sala de aula “D” do jardim botânico. Os valores do STI variaram entre 0,39 e 0,42, o que aponta para uma impressão subjetiva, segundo a IEC 60268-16, classificada de “ruim”.

A proposta de correção do Tempo de Reverberação com a adoção de materiais de revestimento com maiores coeficientes de absorção sonora apresentou um grande impacto sobre a inteligibilidade da fala. Os valores simulados para o STI mostraram um aumento em torno de 30 pontos após a substituição do material do piso e a adição de absorção no teto. Esse aumento fez com que a sala de aula “D” com o TR corrigido apresentasse valores de STI variando entre 0,73 e 0,76, o que, segundo a caracterização da impressão subjetiva da norma IEC 60268-16, classifica a sala de aula “D” como tendo uma “boa” inteligibilidade.

Do acima exposto percebe-se que, mesmo com o desenvolvimento científico e técnico na área de

acústica de salas, na área de acústica em edificações, no desenvolvimento de novos materiais acústicos, podendo hoje ser medidos com relativa facilidade diversos parâmetros importantes na avaliação da acústica de salas, como índice de inteligibilidade da fala, clareza C_{80} , definição D_{50} , além, é claro, do Tempo de Reverberação, vê-se que as salas de aula construídas na década de 60 são, do ponto de vista acústico, muitíssimo melhores que as recentemente construídas.

Além disso, pode-se concluir que, na atividade escolar, a principal forma de transferência de conhecimento ainda se dá via comunicação oral. Sob pena do prejuízo na qualidade da formação dos alunos, faz-se necessário, portanto, que adequadas condições acústicas em salas de aula sejam garantidas tanto na etapa de projeto de novas salas quanto nas existentes.

Referências

- AMERICAN NATIONAL STANDARD. **ANSI S12.60: acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools.** Melville, 2002.
- ASTOLFI, A.; PELLERREY, F. Subjective and Objective Assessment of Acoustical and Overall Environmental Quality in Secondary School Classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 123, n. 1, p. 163-173, 2008.
- BISTAFÀ, S.; BRADLEY, J. Reverberation Time and Maximum Background-Noise Level for Classroom from a Comparative Study of Speech Intelligibility Metrics. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 107, n. 2, p. 861-875, 2000.
- BRADLEY, J. S. Optimising Sound Quality for Classrooms. In: ENCONTRO DA SOBRAC, 20., 2002; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METROLOGIA EM ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, 2., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2002.
- BRÜEL & KJÆR SOUND AND VIBRATION MEASUREMENT A/S. Qualifier Type 7830 for Windows. Version 2.8.0, 2006. 1 CD-ROM.
- CHIANG, C.-M.; LAI, C.-M. Acoustical Environmental Evaluation of Joint Classrooms for Elementary Schools in Taiwan. **Building and Environment**, Oxford, v. 43, n. 10, p. 1619-1632, 2008.

- CRUZ DA COSTA, E. **Acústica Técnica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- ERCOLI, L.; AZZURRO, A. Case Study: the acoustical characteristics of typical Argentinean classrooms. **Building Acoustics**, Liverpool, v. 8, n. 4, p. 301-310, 2001.
- EVANS, G. W.; MAXWELL, L. E. The Effects of Noise on Pre-school Children's Pre-reading Skills. **Journal of Environmental Psychology**, Londres, v. 20, n.1, p. 91-97, 2000.
- FASOLD, W.; VERES, E. **Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und Konstruktive Lösungen**. Berlin: Bauwesen, 2003.
- FERNANDES, A. G.; VIVEIROS, E. B. Impacto do Ruído de Tráfego em Edificações Escolares: uma metodologia de avaliação para o planejamento urbano. In: ENCONTRO DA SOBRAC, 20.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METROLOGIA EM ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, 2., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2002.
- FERREIRA, A. M. C. **Avaliação do Conforto Acústico em Salas de Aula: estudo de caso na Universidade Federal do Paraná**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- FRANÇOIS, D.; VALLET, M. **Noise in Schools**. World Health Organization Regional Office for Europe, 2001.
- FRANGOS, A. School Districts Spend to Ensure Good Acoustics. **Wall Street Journal**, Nova York, p. B 1, 30 jul. 2003.
- GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. Florianópolis: UFSC, 2000.
- HAGEN, M.; HUBER, L.; KAHLERT, J. Acoustic School Sasing. In: INTERNATIONAL FORUM ACUSTICUM SEVILHA, Sevilha, 2002. **Proceedings...** Sevilha, 2002. 1 CD-ROM.
- HECKL, M.; MÜLLER, H. A. **Technischen Akustik**. 2. ed. Berlin: Springer, 1995.
- HENN, H.; SINAMBARI, G. R.; FALLEN, M. **Ingenieur: Akustik**. 2. ed. Berlin: Vieweg, 1999.
- HODGSON, M. Case-Study Evaluations of the Acoustical Designs of Renovated University classrooms. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 65, n.1, p. 69-89, 2004.
- HODGSON, M. Empirical Prediction of Speech Levels and Reverberation in Classrooms. **Building Acoustics**, Liverpool, v. 8, n. 1, p. 1-14, 2001.
- HODGSON, M. Rating, Ranking, and Understanding Acoustical Quality in University classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 112, n. 2, p. 568-575, 2002.
- HODGSON, M.; SCHEREBNYJ, K. Estimation of the Absorption Coefficients of the Surfaces of Classrooms. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 67, n. 9, p. 936-944, 2006.
- HOHMANN, R.; SETZER, M. J.; WEHLING, M. **Bauphysikalische Formeln und Tabellen**. 4. ed. Berlin: Werner, 2004.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382:1997**: acoustics measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Geneva, 1997.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382-1:2006** : acoustics, measurement of room acoustic parameters, part 1: performance rooms. Geneva, 2006.
- INTERNATIONAL STANDARD. **IEC 60268-16**: sound system equipment, part 16: objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Suíça, 2003.
- KENNEDY, S. M. *et al.* Subjective Assessment of Listening Environments in University Classrooms: perceptions of students. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 119, n. 1, p. 299-309, 2006.
- KNUDSEN, V. O. The Hearing of Speech in Auditoriums. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v.1, n. 1, p. 56-82, 1929.
- KRÜGER, E. L.; ZANNIN, P. H. T. Acoustic, Thermal and Luminous Comfort in Classrooms. **Building and Environment**, Oxford, v.39, n. 9, p. 1055-1063, 2004.

- LERCHER, P.; EVANS, G. W.; MEIS, M. Ambient Noise and Cognitive Processes Among Primary Schoolchildren. **Environment and Behavior**, v. 35, n. 6, p. 725-735, 2003.
- LONG, M. **Architectural Acoustics** Nova York: Elsevier, 2006.
- LORO, C. L. P. **Avaliação Acústica de Salas de Aula**: estudo de caso em salas de aula padrão 023 da rede pública. 2003. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2003.
- LOSSO, M. A. F. **Qualidade Acústica de Edificações Escolares em Santa Catarina**: avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação. 2003. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- LUBMAN, D.; SUTHERLAND, L. C. Good Classroom Acoustics in a Good Investment. **Classroom Acoustics**, p. 1-2, 2003.
- LUTZ, P. *et al.* **Lehrbuch der Bauphysic**. Stuttgart: B. G. Teubner GmbH, 2002.
- MAFFEI, L. *et al.* Assessment of Large-scale Action Plans to Reduce External Background Noise in School Buildings. **Building Acoustics**, Liverpool, v. 11, n. 4, p. 259-269, 2004.
- MÖSER, M. **Engineering Acoustics**. Berlin: Springer, 2004.
- NAYLOR, G. M. ODEON: Another Hybrid Room Acoustical Model. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 38 n. 2-4, p. 131-143, 1993.
- ODEON A/S. Odeon for Windows. Version 9.0: Odeon A/S. [S.I]: 2007. 1 CD-ROM.
- RINDEL, J. H. The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. **Journal of Vibroengineering**, Kaunas, Lituânia, v. 3, n. 4, p. 219-224, 2000.
- SALA, E.; VILJANEN, V. Improvement of Acoustic Conditions for Speech Communication in Classrooms. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 45, n. 1, p. 81-91, 1995.
- SANT'ANA, D. Q. de. **Avaliação Acústica em Edifícios Religiosos**. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- SHIELD, B.; DOCKRELL, J. E. External and Internal Noise Surveys of London Primary Schools. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 115, n. 2, p. 730-738, 2004.
- SHIELD, B. M.; DOCKRELL, J. E. The Effects of Noise on Children at School: a review. **Building Acoustics**, Liverpool, v. 10, n. 2, p. 97-116, 2003.
- VORLÄNDER, M. Simulation of the Steady State Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-Tracing/Image Source Algorithm. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 86, n. 1, p. 172-178, 1989.
- ZANNIN, P. H. T. *et al.* Comparação entre Tempos de Reverberação Calculados e Medidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 75-85, out./dez. 2005.
- ZANNIN, P. H. T.; PASSERO, C. R. M.; SANT'ANA, D. Q. Acoustic Design of Enclosed Spaces. In: BRINKERHOFF, B. N. (ed.). **Ergonomics: design, integration and implementation**. Hardcover: Nova Science, [2009].
- ZANNIN, P. H. T.; FERREIRA, J. A. C. In Situ Acoustic Performance of Materials Used in Brazilian Building Construction. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 21, n. 8, p. 1820-1824, 2007.
- ZANNIN, P. H. T.; MARCON, C. R. Objective and Subjective Evaluation of the Acoustical Comfort in Classrooms. **Applied Ergonomics**, Oxford, v. 38, n.5, p. 675-680, 2007.
- ZANNIN, P. H. T.; ZWIRTES, D. P. Z. Evaluation of the Acoustic Performance of Classrooms in Public Schools. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 70, n. 4, p. 626-635, 2009.
- ZWIRTES, D. P. Z. **Avaliação do Desempenho Acústico de Salas de Aula**: estudo de caso nas escolas estaduais do Paraná. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 2006.