

Conforto Acústico Ambiental no Ambiente Construído: Medições e Simulações do Índice de Transmissão da Fala (STI), Definição do Som (D_{50}) e Tempo de Reverberação (T_R) em Salas de Aula Universitárias

Margret Sibylle Engel

Dr.rer.nat, Free University of Bozen-Bolzano, Itália
margretengel@yahoo.com

Júlio Otávio Herrmann

Mestre em Eng. Ambiental, UFPR, Brasil
julio_otavio@hotmail.com

Paulo Henrique Trombetta Zannin

Professor Dr.-Ing., UFPR, Brasil
paulo.zannin@gmail.com

RESUMO

A qualidade acústica das salas de aula tem forte interferência no processo de ensino e aprendizagem. Esta interferência foi avaliada usando a técnica impulsiva para medir o índice de transmissão da fala (STI), o tempo de reverberação (TR) e a definição D_{50} , por serem os descritores acústicos mais relevantes na avaliação de salas de aula, onde a exposição verbal é o meio de comunicação entre professores e alunos. A avaliação ocorreu em dois prédios da Universidade Federal do Paraná (UFPR) edificadas um, na década de 1960 e outro em 2016. Os valores medidos de STI além de fornecer a real condição acústica das salas, foram usados como parâmetro de ajuste para simulações feitas com o “software” ODEON. Após as medições foram realizadas simulações de modo a dimensionar quais categorias de melhorias, poderiam ser realizadas. As simulações acústicas apresentaram sugestões para qualificar a qualidade do conforto acústico das salas de aula, garantindo que o ensino e aprendizagem não sofram prejuízos, em função da estrutura física das salas de aula. Os valores de STI, TR e D_{50} medidos mostram que no prédio antigo, salvo uma única sala que preserva o teto original que apresentava um elevado coeficiente de absorção sonora, tem valores razoáveis, ou seja, ficam aquém do ideal para salas de aulas, segundo a norma IEC 60268-16 (2011). Pode-se constatar que as salas que tiveram teto trocados por um recobrimento de PVC, tiveram uma queda acentuada na qualidade acústica. O prédio mais novo, possui salas com boas condições de conforto acústico.

PALAVRAS-CHAVE: Índice de transmissão de fala (STI). Tempo de reverberação (TR). Definição (D_{50}).

1 INTRODUÇÃO

O processo de aprendizagem depende de diversos elementos como professor, aluno, material didático, ambiente, clima, luz, cores do ambiente e da acústica do mesmo. As instituições de ensino devem oferecer espaços físicos propícios ao desenvolvimento das atividades educacionais. A qualidade acústica do local de ensino é uma das variáveis com forte influência no aprendizado dos alunos. Condições acústicas desfavoráveis tornam o ambiente para o aprendizado exaustivo (HAGEN; HUBER; KAHLERT, 2002). A percepção da fala depende do nível sonoro como a “fala” é emitida, depende da localização do orador e do ouvinte, da distância entre orador e receptor e das condições físicas do ambiente onde a comunicação é realizada, por exemplo: formato da sala, ausência ou presença de materiais com maior, ou menor coeficiente de absorção sonora, entre outros (SALA; RANTALA, 2016). A inteligibilidade da fala depende ainda fortemente do local onde estão localizadas as salas de aula. Se as salas estiverem localizadas perto de avenidas e/ou ruas de grande fluxo de veículos, notoriamente por melhor que seja a “acústica das salas” o ruído externo causará danos a comunicação verbal. Se localizadas em um ambiente distante de avenidas e/ou ruas, proporcionarão uma boa comunicação entre o orador e os ouvintes.

A inteligibilidade da fala é descrita como um método de medição direta do entendimento da fração de palavras ou sentenças por um ouvinte (LONG, 2006). Às duas principais formas de calcular a inteligibilidade da fala são (HONGISTO; KERANEN; LARM, 2004, p. 481): O método audiológico, descrito na norma do *American National Standards Institute* ANSI/ASA S12.60-2010/PART 1: Acoustical Performance criteria - (ANSI) e gera o índice de inteligibilidade da fala (SII) ou o índice de articulação (AI). Já o método de função de transferência de modulação (MTF), descrito na norma IEC 60268-16 (2011), gera o índice de transmissão da fala (STI).

Uma comparação e avaliação entre valores de tempo de reverberação TR medidos, com simulações de STI em salas de dois edifícios da Universidade Federal do Paraná construídos em épocas diferentes, examinando a influência de diferentes materiais de acabamento sobre o TR e sobre o STI, foi conduzido por Zannin et al. (2009). As simulações chegam a indicar para

uma das salas, com TR médio de 2,5 s., a necessidade de substituição de materiais de acabamento, especialmente no piso e no teto, por materiais com maior coeficiente de absorção sonora. Os resultados das simulações usando materiais com absorção sonora mais elevada apontam para a redução de quase 2 s no TR e uma melhora no STI de valores entre 0,39 e 0,42, considerados qualitativamente como “pobre” para valores entre 0,73 e 0,76, considerados como “excelente”, conforme a norma IEC 60268-16 (2003) de STI.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho estudou a inteligibilidade da fala através das medições do STI – “*Speech Transmission Index*” (Índice de transmissão da fala), “*Definition*” D_{50} (Definição) e “*Reverberation Time*” (Tempos de reverberação - TR) de salas de aula do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná construídas em 1960 e 2016. Estes três parâmetros são os mais adequados descritores acústicos para caracterizar a qualidade acústica de salas, no caso, salas de aula universitárias (FASOLD; VERES, 2003; LAZARUS; SUST; STECKEL; KULKA; KURTZ, 2007, p. 274; ANSI/ASA s12.60, 2010). Foram realizadas também simulações com o “*software*” ODEON, na busca da melhoria do conforto acústico das salas de aula universitárias.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho contempla duas etapas: a primeira consiste no levantamento de dados através de medições sonoras e a segunda na modelagem matemática através do “*software*” ODEON 11 combined.

Nas medições do STI foram usados um computador, uma placa de som, um medidor de nível de pressão sonora, um equalizador, um amplificador e uma boca artificial (caixa de som direcional, que simula a boca humana). Já para a medição do TR e do D_{50} que são feitas em conjunto, foram utilizados os mesmos equipamentos, com pequenas alterações. Retirou-se o equalizador e substituiu-se uma caixa de som dodecaédrica (caixa de som omnidirecional) pela boca artificial.

É importante ressaltar que as medições de STI foram feitas separadamente das medições de TR e D_{50} , já que as configurações e os equipamentos para as mesmas são diferentes.

3.1 Levantamento de dados

Na etapa de levantamento de dados, as medições de STI, TR e D_{50} foram realizadas nas salas de aula dos dois prédios do Centro Politécnico da UFPR, o da década de 60 onde foram investigadas as dependências PG03, PG 04, PG05, PG06, PG07 E PG15, e no prédio novo, das ciências exatas, construído em 2016 onde foram analisadas as salas PA01, PA03 PA05 e PA06. Esta etapa foi realizada em períodos nos quais as salas estavam desocupadas, condição esta colocada pelas normas técnicas e literatura corrente que foram seguidas para desenvolver este trabalho: 1) Norma IEC 60268-16 (2011); 2) o livro de Controle de Ruído e Acústica de Salas (Schallschtz + Raumakustik in der Praxis) de Fasold e Veres (2003); e 3) Norma ANSI/ASA s12.60 (2010). Todas as medições foram realizadas aos sábados à tarde, garantindo assim a ausência de alunos nas salas, bem como nos prédios onde estas salas se encontram.

As medições foram tomadas em silêncio, sem alunos – com exceção dos operadores. As salas estavam com a porta e janelas fechadas, salvo onde o mecanismo de fechamento das janelas estava estragado que foram os casos da PG03 e da PG04. O ruído externo, que forma o ruído de fundo das salas, foi mensurado para usar nas simulações. A Figura 1 mostra algumas das salas de aula durante o período de medição.

Figura 1: Sala de aula no bloco construído em 1960



Fonte: os autores, 2021.

3.2 Modelagens no software ODEON 11 Combined

Primeiramente foram construídas as salas de aula em ambiente virtual, usando um “software” Sketchup na versão livre. As salas já vetorizadas com suas camadas (forro, piso, janelas, carteiras, assentos) foram finalmente exportadas para o ODEON 11.

Com as salas em ambiente virtual já com os resultados bastante próximos do real foi realizada uma nova modelagem, desta vez com o forro acústico, intencionando-se a verificação da mudança na qualidade sonora das salas de aula. Na tabela 1 encontram-se os valores de absorção sonora dos materiais utilizados nos forros do teto, para as salas de aula antigas (denominação “PG”) do prédio antigo do Centro Politécnico da UFPR, conforme o espectro de frequências de 125 Hz a 8000Hz. Na Tabela 2 constam os valores de absorção sonora dos forros acústicos do prédio novo (denominação “PA”).

Tabela 1: Valores de absorção sonora dos forros antigo (Celotex M1) e novo (PVC)

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Celotex M1	0,12	0,48	0,50	0,79	0,93	0,82	0,48
PVC	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06

Fontes: KNUDSEN e HARRIS (1978, p.408); SILVA (2009).

Tabela 2: Valores de absorção sonora do foro Thermanex® Star SK

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Thermanex®	0,05	0,05	0,04	0,55	0,65	0,45	0,45

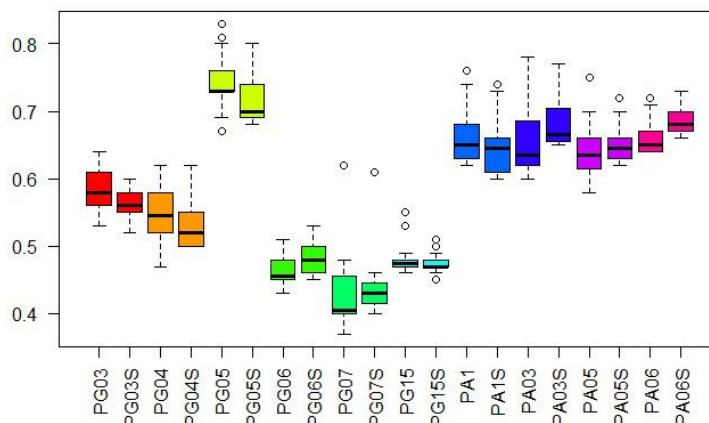
Fonte: KNAUF AMG (2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os dados de medição e simulação obtidos nas salas de aula do prédio construído na década de 60 (denominação PG) e de 2016 (denominação PA).

A Figura 2 mostra os valores medidos de STI nas salas de aula, assim como os valores de STI das simulações – os quais são reconhecidos, com terminação em ‘S’, por exemplo: Sala PG06S.

Figura 2: STI médio medido e STI médio simulado das salas de aula



Fonte: os autores, 2021.

Ao se analisar as salas do prédio antigo na Figura 2, é visto que as salas PG03 e PG04 tem um desempenho de STI ligeiramente melhor que a PG06, PG07 e PG15. Esta diferença é atribuída a um defeito na alavanca no sistema de fechamento das janelas, visto que algumas janelas não puderam ser fechadas, havendo assim um acréscimo de STI conforme o estudo de Tang e Yeung (2006).

Os “outliers” superiores na Figura 2 representam as posições nas salas de aula ou os alunos que sentam logo em frente a boca artificial ou professor, indicando que os alunos que se posicionam logo a frente, próximos ao professor recebem uma inteligibilidade de fala privilegiada. Bem como os “outliers” inferiores mostram os alunos que teriam uma inteligibilidade da fala prejudicada.

A dispersão ou variabilidade dos dados, dado pelo tamanho das caixas, mostra uma certa homogeneidade no STI das salas de aula, sendo destacada a PG15 por ter a menor variabilidade apesar do STI abaixo de 0,5.

Conforme a classificação da ISO 9921 (2003), as salas de aula avaliadas no prédio antigo são ‘razoáveis’; com exceção à PG05. Pelo mesmo parâmetro, as salas do prédio novo e a PG05 são classificadas como ‘boas’.

A norma adotada para a medição, IEC 60268-16 (2011), sugere em seu Anexo G que o valor de STI para salas de aula deve estar acima de 0,62. Essa referência, evidencia ainda mais a falta de qualidade das salas de aula PG03, PG04, PG06, PG07 e PG15, todas da construção antiga. Em contrapartida, as salas do prédio mais recente e a PG05 estão conforme sugestão da norma para aplicação específica mencionada para salas de aula.

Do ponto de vista da norma finlandesa SFS 5907 (2006), nenhuma das salas analisadas é apropriada, dado que a exigência é de STI maior ou igual a 0,80 para salas de aula.

A Tabela 3 compara as normas apresentadas com as salas de aulas medidas.

Tabela 3: Comparação de valores de STI – Quantitativo e qualitativo

Prédio	Sala de aula	Quantitativo	ISO 9921 (2003)	Anexo G - IEC 60268-16 (2011)	SFS 5907 (2006)
DÉCADA 60 Século XX	PG03	0,58	Razoável	Não conforme	Não apropriada
	PG04	0,55	Razoável	Não conforme	Não apropriada
	PG05	0,74	Bom	Conforme	Não apropriada
	PG06	0,46	Razoável	Não conforme	Não apropriada
	PG07	0,43	Pobre	Não conforme	Não apropriada
	PG15	0,48	Razoável	Não conforme	Não apropriada
EXATAS Segunda década do século XXI	PA01	0,66	Bom	Conforme	Não apropriada
	PA03	0,65	Bom	Conforme	Não apropriada
	PA05	0,64	Bom	Conforme	Não apropriada
	PA06	0,66	Bom	Conforme	Não apropriada

Fontes: ISO 9921 (2003); Anexo G IEC 60268-16 (2011); SFS 5907 (2006).

A pesquisa de Milulski e Radosz (2011), em 110 salas na Polônia, encontrou uma grande diversidade de propriedades acústicas entre as salas de aula. Esta diversidade foi relacionada a diferenças construtivas e dos materiais empregados nas salas, da mesma maneira que foi encontrado na UFPR.

Na Finlândia, 16 das 40 salas estudadas por Sala e Rantala (2016), o STI estava abaixo de 0,75, enquanto no presente estudo 9 das 10 salas analisadas obtiveram esse valor. Em relação aos valores de TR na faixa de 250 Hz a 4000 Hz, na Finlândia 30 das 40 salas ficaram com valores abaixo de 0,6 segundos contra 1 das 10 analisadas na UFPR; onde apenas a PG05 tem TR menor, sendo de 0,5 segundos. Ao compararmos os valores obtidos nas medições com as escalas qualitativas de D_{50} de Fasold e Veres, (2003) e Ansay e Zannin (2016), compilou-se a Tabela 4. Vale lembrar que a escala de Ansay e Zannin (2016) foi calculada a partir de Marshall (1994). Conclui-se que os valores qualitativos estipulados por Marshall exigem um desempenho maior da qualidade acústica das salas.

Tabela 4: Comparação de valores de D_{50} – Quantitativo e qualitativo

Prédio	Sala	Quantitativo	Fasold e Veres (2003)	Ansay e Zannin (2016)
DÉCADA de 60 Século XX	PG03	0,5	Não atende	Razoável
	PG04	0,41	Não atende	Razoável
	PG05	0,82	Atende	Bom
	PG06	0,48	Não atende	Razoável
	PG07	0,41	Não atende	Razoável
	PG15	0,44	Não atende	Razoável
EXATAS Segunda década do século XXI	PA01	0,71	Atende	Bom
	PA03	0,66	Atende	Razoável
	PA05	0,66	Atende	Razoável
	PA06	0,65	Atende	Razoável

Fontes: FASOLD e VERES (2003); ANSAY e ZANNIN (2016).

Fazendo um comparativo entre as medidas de STI, D_{50} e TR, com seus valores correspondentes em suas escalas qualitativas, considerando que o valor de STI razoável não atende padrão de acústica para sala de aula, observa-se que há uma congruência bastante

grande no que diz respeito as classificações qualitativas da ISO 9921 (2003), com Fasold e Veres (2003) e com a ANSI/ASA S12.60 (2010) conforme a Tabela 5.

Somente os valores de TR nas salas PA03 e PA05 ficaram com resultados qualitativos diferentes, porém muito próximos de atender a ANSI s12.60 (2010).

Tabela 5: Valores medidos (quantitativos) e relação com valores qualitativos de STI, TR e D50

Sala	STI		D ₅₀		TR 500, 1000 e 2000 Hz	
	Quantitativo	Qualitativo ISO 9921 (2003)	Quantitativo	Qualitativo Fasold e Veres (2003)	Quantitativo (s)	Qualitativo ANSI/ASA s12.60 (2010)
PG03	0,58	razoável	0,5	não atende	1,15	não atende
PG04	0,55	razoável	0,41	não atende	1,49	não atende
PG05	0,74	bom	0,82	atende	0,51	atende
PG06	0,46	razoável	0,48	não atende	1,19	não atende
PG07	0,43	pobre	0,41	não atende	1,73	não atende
PG15	0,48	razoável	0,44	não atende	1,55	não atende
PA01	0,66	bom	0,71	atende	0,6	atende
PA03	0,65	bom	0,66	atende	0,7	não atende
PA05	0,64	bom	0,66	atende	0,7	não atende
PA06	0,66	bom	0,65	atende	0,65	atende

Fontes: ISO 9921 (2003); FASOLD e VERES (2003); ANSI/ASA s12.60 (2010).

De modo a verificar a alteração na acústica das salas do prédio da década de 60 onde foi trocado o forro Celotex M1, por PVC, foram feitas novas simulações para comparação. Lembrando que o forro de PVC é muito usado no Brasil, por ser durável e economicamente acessível, apesar da péssima absorção sonora. Na tabela 6 apresentam-se os valores médios nas simulações com forro acústico e com forro de PVC.

Tabela 6: Valores de STI com forro de PVC e Celotex M1

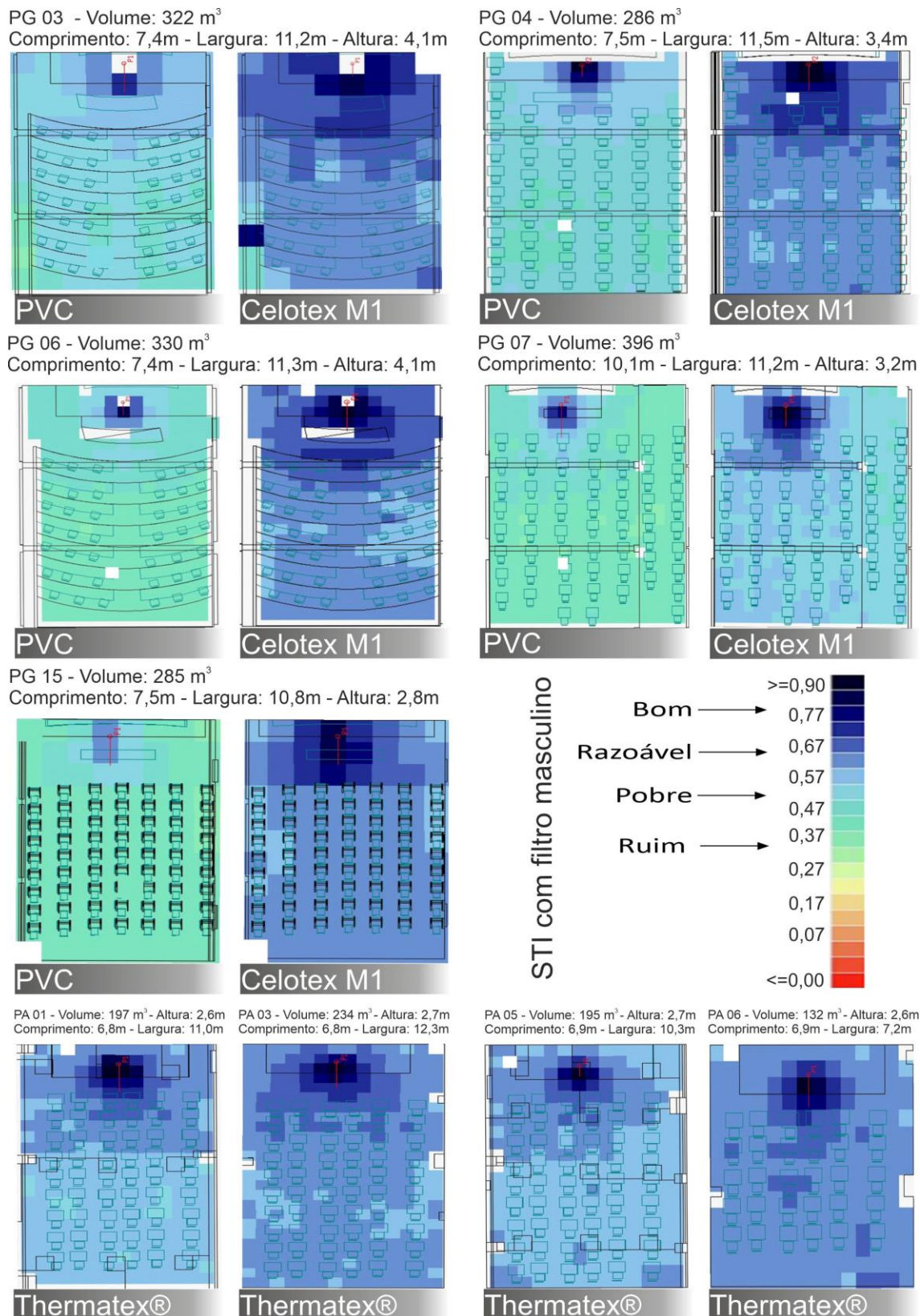
Sala	STI médio medido com forro de PVC	STI médio simulado com forro de PVC	STI médio simulado com forro de Celotex M1
PG03	0,58	0,56	0,71
PG04	0,55	0,53	0,69
PG06	0,46	0,48	0,67
PG07	0,43	0,44	0,61
PG15	0,48	0,47	0,68

Fonte: os autores, 2021.

Conforme os valores simulados, a mudança na qualidade acústica das salas observada a partir da troca do material do forro, desencadeia uma diferença significativa nos valores de STI. Observa-se a melhoria na Tabela 6, assim como na Figura 3, que mostram o STI simulado, onde tons mais escuros de azul indicam STI com valores mais elevados, representando melhoria na qualidade acústica da sala de aula. Esta mudança na qualidade do STI é marcante e tende a melhorar a comunicação entre alunos e professores. As simulações foram realizadas através do “software” ODEON 11 *combined* com teto de PVC e Celotex M1 para as salas com denominação “PG”. Nas salas do Prédio de Exatas da UFPR, construído em 2016, com denominação “PA”,

percebe-se a nítida qualidade das salas acústica, devido ao teto revestido de material absorvente Thermatex®, em relação às salas da década de 60 que tem o teto recoberto por PVC. A título de comparação de desempenho acústico, deve-se observar as Tabelas 5 e 6.

Figura 3: Simulações com forro de teto em PVC, Celotex M1 e Thermatex®



Fonte: os autores, 2021.

5 CONCLUSÕES

Ainda que estudos recentes apontem a necessidade da qualidade acústica nos ambientes de aprendizagem, o presente trabalho apresenta resultados que sugerem que a acústica das salas de aula analisadas é negligenciada e subestimada pelo Departamento de Manutenção da UFPR.

A troca do teto Celotex M1 por um forro de PVC nas salas mais antigas do Centro Politécnico prejudicou a transmissão da fala nas salas de aula, sendo confirmado através dos resultados obtidos nas simulações realizadas.

Por fim, em boa parte da literatura consultada não há descrição da metodologia de forma nítida e verificou-se o uso de equipamentos não recomendados. Ressalta-se que as medições de STI devem ser feitas com caixa acústica direcional (como o simulador de boca) e TR devem ser feitas caixa omnidirecional (como o autofalante dodecaédrico), em concordância com as normas ISO 3328-1 (2009) e IEC 60268-16 (2011).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. **ANSI/ASA s12.60-2010/PART 1**: Acoustical Performance criteria, Design Requirements, and guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools. Acoustic Society of America, 2010.

ANSAY, Samuel; ZANNIN, Paulo Henrique T. **Using the parameters of Definition, D₅₀, And Reverberation Time, RT, to investigate the acoustic quality of classrooms**. Canadian Acoustics / Acoustique Canadienne Vol. 44 No. 4, 2016, – 1.

DEPARTAMENT FOR EDUCATION – EDUCATION FUNDING AGENCY. BUILDING BULLETIN 93 (**BB93**). Acoustic design for schools: performance standards England, 2015.

FASOLD, Wolfgang; VERES, Eva. **Schallschutz und Raumakustik in der Praxis**. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. Muss-medien GmbH, Berlin, 2003.

FINNISH STANDARDS ASSOCIATION SFS. **SFS 5907**: ACOUSTIC Classification of Spaces in Buildings, Suomen Standardisoimisliitto. 2006.

HAGEN, Mechthild *et al.* **Acoustic school easing**. Anais: Forum Acusticum Sevilla, Sevilla, 2002.

HONGISTO, Valtteri *et al.* **Simple model for acoustical design of open-plan offices**. Acta Acustica, Stuttgart, v. 90, p. 481, 2004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60268-16**: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Switzerland, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9921:2003**: Ergonomics – Assessment of speech communication. Switzerland, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382-1:2009**: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces. Switzerland, 2008.

KNAUF AMG. Ficha técnica 04/2016. Disponível em: <http://knauf.com.br/sites/default/files/Ficha%20T%C3%A9cnica%20-%20Knauf%20AMF_0.pdf> Acesso: 5 nov 2017.

KNUDSEN, Vern. O.; HARRIS, Cyril. M. **Acoustical designing in architecture** Published by the American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1978, 408 p.

LAZARUS, Hans *et al.* **Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation**. Auflage 1. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, 274 p.

LONG, Marshall. **Architectural Acoustic**. San Diego: Elsevier, 2006.

MARSHALL, L. Gerald. **An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio**. The Journal of the Acoustical Society of America, 96, 2251, 1994. <https://doi.org/10.1121/1.410097>

MIKULSKI, Witold; RADOSZ, Jan. **Acoustics of Classrooms in Primary Schools** – Results of the Reverberation Time and the Speech Transmission Index Assessments in Selected Buildings. Archives of Acoustics, **36**, 4, 2011, p. 777–793. <https://doi.org/10.2478/v10168-011-0052-6>

SALA, Eeva.; RANTALA, Leena. **Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland**. Applied Acoustics, 114, 2016, p. 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.08.009>

SILVA, Elaine L. **Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade dos Edifícios/CETAC**. Curitiba, 24 set. 2009. Informação por e-mail <ellemos@ipt.br>

TANG, Shiu-keung.; YEUNG, M. H. **Reverberation Times and Speech Transmission Indices in Classrooms**. Journal of Sound and Vibration, v. 294, junho de 2006, p. 596-607. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.11.027>

ZANNIN, Paulo Henrique T. *et al.* **Comparação do tempo de reverberação e índice de transmissão de fala (STI) em salas de aula construídas em décadas diferentes**. Ambiente construído, Porto Alegre v. 9, n. 3, 2009, p. 125-139.