



Estudo das condições acústicas de uma sala de aula de ensino superior via medição e simulação

Oliveira, L. O. M.¹; Resende, C. A. O.¹; Sampaio, G. B. R.¹; Melo, V. S. G.^{1,2}; Tenenbaum, R. A.²

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,
{luiz.oliveira, carlos.resende, gabriel.sampaio}@eac.ufsm.br

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,
viviane.melo@ufsm.br, ratenenbaum@gmail.com

Resumo

As condições acústicas de uma sala de aula típica do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) são abordadas neste trabalho. A ideia partiu de um projeto da Acústica Jr., empresa júnior do Curso de Engenharia Acústica da UFSM, de otimizar acusticamente as salas de aula da universidade. A Sala 152 do Anexo A do CT, tomada como paradigma, é medida acústica e geometricamente. As medições acústicas são executadas segundo a norma ABNT NBR ISO 3382-2:2017. São calculados os parâmetros tempo de reverberação, definição e índice de transmissão da fala. Verifica-se que esses parâmetros são inadequados. A sala é, em seguida, simulada no *software* RAIOS 7 e os mesmos parâmetros são calculados e comparados com os medidos. Um ajuste nos coeficientes de absorção de algumas superfícies é conduzido, de modo a aproximar os resultados medidos dos simulados, dada a incerteza existente quanto aos coeficientes de absorção das superfícies. Esta é uma primeira etapa de um projeto maior em que a empresa Acústica Jr. elaborará a adequação acústica da sala, com o apoio de uma empresa de materiais acústicos. Depois de finalizado o projeto, novas simulações serão conduzidas, de modo a minimizar o custo dos materiais a serem implementados. Naturalmente, uma medição final da sala modificada servirá de comprovação.

Palavras-chave: acústica de salas de aula, condicionamento acústico, medições acústicas, simulações acústicas.

Study of the acoustic conditions of a higher education classroom through measurement and simulation.

Abstract

The acoustic conditions of a typical classroom at the Centro de Tecnologia (CT) of the Federal University of Santa Maria (UFSM) are addressed in this work. The idea came from a project by Acústica Jr., a junior company of the Acoustic Engineering Course at UFSM, to acoustically optimize the university's classrooms. Room 152 in Annex A of the CT, taken as a paradigm, is acoustically and geometrically measured. Acoustic measurements are performed according to ABNT NBR ISO 3382-2:2017 standard. The parameters reverberation time, definition and speech transmission index are calculated. It is seen that these parameters are unsuitable. The room is then simulated in software RAIOS 7 and the same parameters are calculated and compared with the measured ones. An adjustment in the absorption coefficients of some surfaces is carried out, in order to bring the measured results closer to the simulated ones, given the existing uncertainty regarding the surfaces' absorption coefficients. This is the first stage of a larger project in which the company Acústica Jr. will elaborate the acoustic suitability of the room, with the support of an acoustic materials company. After finishing the project, new simulations will be conducted, in order to minimize the cost of the materials to be implemented. Of course, a final measurement of the modified room will serve as proof.

Keywords: classrooms acoustics, acoustic conditioning, acoustic measurements, acoustical simulations.

1. Introdução

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) hospeda o único curso de graduação em Engenharia Acústica do Brasil. Todavia, suas salas de aula — como as da maioria das salas das universidades do país — não possuem condições acústicas adequadas ao ensino. Visando iniciar um movimento para mudar este cenário, a empresa júnior do curso de Engenharia Acústica, a Acústica Jr., firmou parceria com uma empresa de materiais acústicos e com o Centro de Tecnologia (CT) da UFSM para a adequação acústica de uma das salas de aula do centro. Em um primeiro momento será realizada a adequação de apenas uma sala. No entanto, caso haja uma resposta positiva de estudantes e professores, espera-se que os demais ambientes possam, pouco a pouco, ser transformados acusticamente, segundo padrão da sala adaptada.

O ambiente utilizado neste projeto foi a Sala 152, localizada no andar térreo do Anexo A do CT. A Figura 1 indica a localização da sala em questão. Este primeiro artigo conta com medições de parâmetros acústicos objetivos, a partir do método do ruído interrompido descrito na norma ABNT NBR ISO 3382-2:2017 [1], e com simulações realizadas no *software* de simulação acústica de salas RAIOS 7 [2].



Figura 1: Vista aérea da região do CT com indicação da localização da Sala 152. Fonte: Extraído do Google Earth™ [3].

Não são recentes os estudos relacionando o processo de ensino-aprendizado e as condições acústicas nas salas de aula. No artigo de revisão de Minelli [4], é possível encontrar correlações entre o tempo de reverberação e a capacidade de aprendizagem dos discentes. Valores iguais ou superiores a 1,6 segundos desse parâmetro comprometem o ensino. Conjuntamente, o valor ideal encontrado para uma boa qualidade de educação é próximo a 0,6 segundos, tal como o recomendado na ANSI/ASA S12.60-2010 [5], e uma relação sinal-ruído igual ou superior a 12 dB, com ponderação A.

Outro aspecto é a saúde vocal dos professores, os quais utilizam sua voz de forma rotineira, lecionando por horas ao longo do dia. O trabalho de Bottalico [6] teve como objetivo medir o efeito do tempo de reverberação na fadiga vocal de curto prazo. Nele, uma análise do esforço vocal dos docentes indicou que os falantes experimentaram menos fadiga vocal em salas com tempo de reverberação próximo a 0,6 segundos, tal como nos estudos relativos ao ensino. Importante salientar que tempos de reverberação muito baixos podem também comprometer a saúde vocal dos professores pela incapacidade da sala de dar sustentação à voz, exigindo maior esforço. Dessa forma, entende-se como fundamental para a saúde dos ocupantes e compreensão das aulas o tratamento acústico adequado das salas de aula. Antes de seguir os procedimentos experimentais e as simulações, vale entender os parâmetros que serão utilizados para

avaliar a qualidade da sala. O presente trabalho apresenta um diagnóstico das condições acústicas da sala em estudo, para propor a implantação de condicionamento acústico, visando alcançar qualidade acústica em conformidade com as normas relevantes estabelecidas para salas de aula.

2. Parâmetros objetivos

Visando realizar a análise objetiva de uma sala, sem depender da subjetividade individual, utilizam-se os parâmetros objetivos de salas. Dependendo da finalidade do ambiente alguns parâmetros têm relevância maior. Para este caso, analisaremos o tempo de reverberação (T_{20}), a definição (D_{50}) e o índice de transmissão da fala (STI – do inglês *Speech Transmission Index*).

2.1 Tempo de reverberação (T_{20})

O primeiro parâmetro objetivo apresentado é o tempo de reverberação. Este é o mais popular dos parâmetros objetivos, sendo comumente apresentado independentemente para representar as condições acústicas em uma sala e é mencionado em diversas normas referentes à acústica.

Por definição, o tempo de reverberação é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora da resposta impulsiva decaia 60 dB em relação ao valor máximo. Para se encontrar este valor, deve-se aplicar a integral cumulativa invertida da resposta impulsiva quadrática da sala alvo ($h^2(t)$). Com isso, determina-se a reta ajustada do decaimento sonoro na sala, utilizada para calcular o T_{20} , a partir da expressão

$$T_{20} = 3 (t_{-25} - t_{-5}), \quad (1)$$

em que t_{-5} e t_{-25} referem-se ao tempo encontrado na reta ajustada, entre -5 e -25 dB. Os gráficos da Figura 2 apresentam este procedimento para duas bandas de 1/1 oitava.

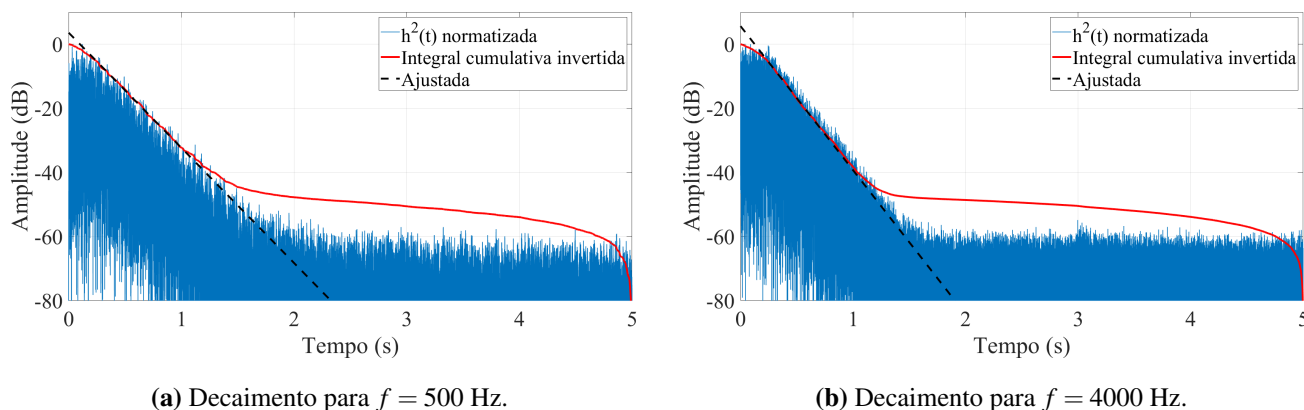


Figura 2: Exemplos de curvas de decaimento.

2.2 Definição (D_{50})

As primeiras reflexões possuem significativa relevância na experiência sonora, principalmente para a fala. Caso a energia das primeiras reflexões seja maior que a das reflexões subsequentes, a articulação da fala é mais facilmente compreendida. Visando criar um parâmetro que melhor se correlacione com a experiência subjetiva da reverberação, foi proposto por Thiele [7] o parâmetro definição. A definição consiste na fração de energia contida nos primeiros 50 ms da resposta impulsiva, sendo dado pela expressão

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}. \quad (2)$$

Valores de referência para a qualificar o D_{50} foram pesquisados por Long [8] e podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Referência para qualidade do D_{50} [8].

D_{50}	
Excelente	$\geq 0,86$
Bom	0,67 a 0,85
Razoável	0,39 a 0,66
Ruim	0,18 a 0,38
Péssima	$\leq 0,17$

Considerando quão crítica é a compreensão da fala no caso de salas de aula e que o objetivo é criar uma sala referência em acústica, buscará se atingir excelência no D_{50} , ou seja, valores acima de 0,86.

2.3 Índice de transmissão da fala (STI)

Esse parâmetro dá um passo além da definição ao levar em consideração características relativas à voz humana e a relação sinal-ruído (SNR) no ambiente. Para este trabalho, o STI foi calculado pelo método indireto descrito na norma ABNT NBR IEC 60268-16:2018 [9] a partir da expressão

$$m_{k,m} = \frac{\left| \int_0^{\infty} h_k(t) e^{-j2\pi f_m t} dt \right|}{\int_0^{\infty} h_k^2(t) dt} \left[1 + 10^{-\text{SNR}_k/10} \right]^{-1}, \quad (3)$$

tal que o subíndice k refere-se aos 7 filtros de oitava entre 125 Hz e 8 kHz relativos ao alcance vocal humano, o subíndice m refere-se às 14 frequências de modulação entre 0,63 Hz e 12,5 Hz relativas ao ritmo natural da fala e o SNR é a relação sinal-ruído.

Tal como o D_{50} também existe uma classificação qualitativa do STI, encontrada na norma ABNT NBR IEC 60268-16:2018 [9]. Esta pode ser observada na Tabela 2. Espera-se também alcançar excelência no STI.

Tabela 2: Referência para qualidade do STI [9].

STI	
Excelente	$\geq 0,75$
Bom	0,60 a 0,75
Razoável	0,45 a 0,60
Ruim	0,30 a 0,45
Péssima	$< 0,30$

Com o entendimento pleno dos parâmetros objetivos para análise da sala, pode-se partir para as medições e as simulações do recinto.

3. Metodologia

Esta seção disserta sobre os procedimentos adotados para realizar as medições e simulações dos parâmetros acústicos da Sala 152, apresentada na Figura 3. O ambiente de estudo possui comprimento de 11,8 m, largura de 6,5 m e pé direito de 3,34 m, totalizando um volume de 256,5 m³. A sala possui capacidade para cerca de 43 alunos, conforme as cadeiras dispostas no local, sendo estas de madeira, assim como o piso. As paredes e o teto da sala são de alvenaria pintada, há vigas e instalação elétrica aparente, uma tela de projeção, um quadro branco, mesa e cadeira do professor e persianas à frente das janelas de vidro.



(a) Vista da parte frontal da sala.



(b) Vista da parte dos fundos da sala.

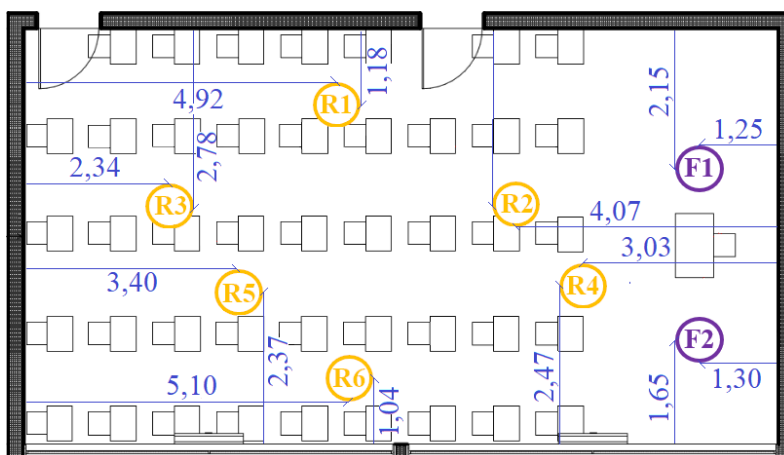
Figura 3: Imagens da Sala 152 do CT.

3.1 Medições acústicas

As medições na Sala 152 foram realizadas no dia 19 de junho de 2023, entre 20h30 e 22h00, de modo a obter uma relação sinal-ruído suficientemente boa para a determinação dos parâmetros objetivos em análise. Além disso, buscou-se evitar a influência do fluxo de pessoas e veículos próximos ao local. Os procedimentos adotados seguiram conforme as diretrizes da norma ABNT NBR ISO 3382-2:2017 [1], sendo adotado o método de precisão para configurações de fonte-receptor. Para obter as curvas de decaimento, utilizou-se o método do ruído interrompido, em que as curvas de decaimento são obtidas a partir de gravação direta do decaimento do nível de pressão sonora, ocorrido após excitação na sala com ruído de banda larga.

3.1.1 Configuração e instrumentação

Para respeitar o número mínimo de posições de receptores e fontes, especificados na norma ABNT NBR ISO 3382-2:2017 [1] relacionado ao método de precisão, foram adotadas duas posições de fonte sonora, seis posições de microfones e três decaimentos foram medidos para cada ponto. A Figura 4 mostra as posições de fonte-receptor utilizadas, sendo importante apontar que duas pessoas permaneceram no local. Para todos os receptores (R1, ..., R6) foi adotada a altura de 1,30 m em relação ao solo, enquanto para as fontes (F1 e F2) foi adotada a altura de 1,70 m.

**Figura 4:** Configuração de posições fonte-receptor para as medições acústicas na Sala 152.

As curvas de decaimento em função do tempo decorrido após a interrupção da fonte sonora, foram obtidas para faixa de frequência de 100 Hz a 10 kHz. Ao longo do procedimento, utilizou-se a instrumentação

apresentada na Tabela 3. É válido salientar que foi aplicado o ajuste de sensibilidade¹ em cada um dos microfones no início e no fim da medição, utilizando um calibrador.

Tabela 3: Lista de equipamentos utilizados.

Equipamento	Fabricante	Modelo
Amplificador de potência sonora	B&K	2716
Fonte omnidirecional	B&K	4292 L
3 × microfones de campo difuso 1/2"	B&K	4942
3 × cabos BNC-BNC	–	–
Cabo P10-P10	–	–
Cabo Speakon-Speakon	–	–
Cabo USB	–	–
Notebook	Dell	Inspiron 14 5480
Placa de áudio	PreSonus	AudioBox 44VSL
Placa de aquisição	National Instruments	NI 9234
Termo-higrômetro	–	–
3 × Tripés	–	–
Calibrador	B&K	4231

A cadeia de medição utilizada para aquisição dos sinais é apresentada na Figura 5.

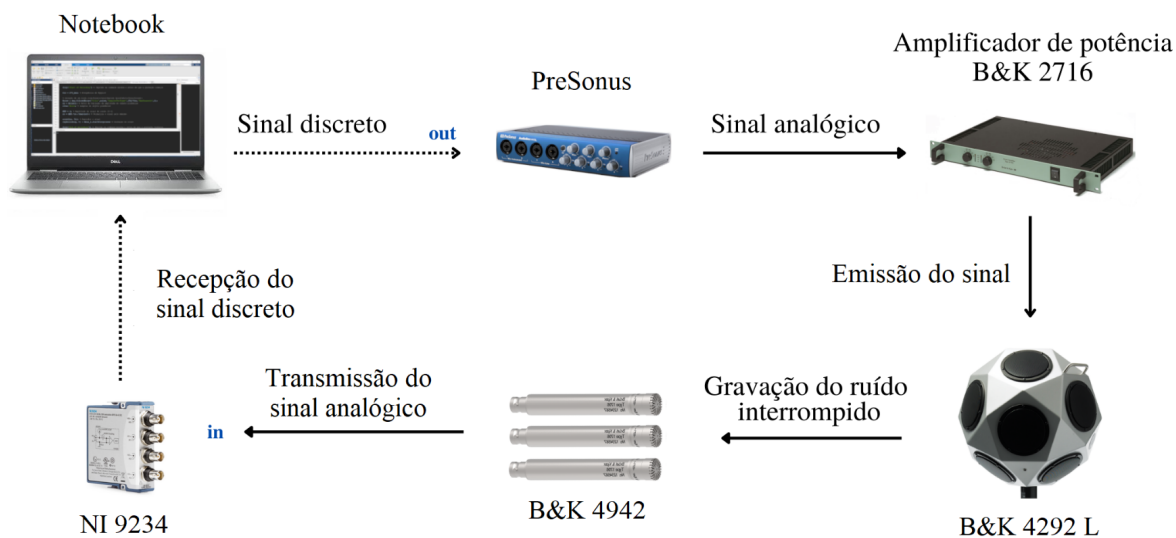


Figura 5: Cadeia de medição.

3.1.2 Processamento dos dados

O processamento dos dados foi realizado com o *software* Matlab. Inicialmente, foi feita a leitura dos dados obtidos, sendo aplicados filtros de banda de 1/3 de oitava nos sinais de decaimento. Foram efetuados os procedimentos necessários para realizar uma integral cumulativa invertida, facilitando a identificação dos pontos de ajuste da reta e a necessidade de aumentar o ganho do amplificador durante a medição para uma maior faixa dinâmica. O pós-processamento e determinação dos resultados dos parâmetros T_{20} , D_{50} e STI foi realizado via ITA-Toolbox [10], que consiste em uma toolbox *open source* de acústica para Matlab, desenvolvida pelo Institute of Hearing Technology and Acoustics da RWTH Aachen University.

¹O ajuste foi aplicado em 1 kHz para um nível sonoro de 94 dB.

3.2 Simulações computacionais

As simulações foram realizadas no *software* RAIOS 7, visando avaliar as condições acústicas originais da sala e, posteriormente, comparar com a sala tratada. Para tal, é realizada uma simulação inicial com os coeficientes de absorção dos materiais na sala encontrados em bancos de dados. Após esta primeira simulação, esses coeficientes são ajustados até obtenção de equidade no T_{20} entre os valores de medição e simulação.

Para se simular o campo acústico da sala, bem como obter os parâmetros objetivos, são necessários: dados de entrada referentes às condições atmosféricas e ao método de cálculo do programa; geometria tridimensional da sala; e atribuição dos coeficientes de absorção e espalhamento de todas as superfícies existentes na geometria. Como comentado anteriormente, o T_{20} será utilizado para o ajuste, no entanto, também será obtido o D_{50} nessa simulação.

3.2.1 Dados de entrada

Primeiramente, como dados de entrada da simulação, definiram-se as condições atmosféricas e os parâmetros de cálculo do código computacional que serão utilizados em todas as simulações. A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros.

Tabela 4: Dados de entrada de simulação.

Parâmetro	Valor
Temperatura	15,8°C
Umidade relativa	76%
Pressão atmosférica	1 atm
Discretização espacial	400 elementos
Decaimento de parada	-40 dB
Duração da resposta impulsiva	3 s
Potência da fonte sonora	1 W
Número de raios	100.000

3.2.2 Geometria da sala de aula

O próximo quesito necessário para as simulações é a geometria do ambiente. O modelo 3D foi construído em AutoCAD, respeitando as dimensões originais em metros e as posições de fontes e receptores descritas na Figura 4. Foram adicionados os tampos das mesas, assentos das cadeiras e a tela de projeção à sala. As Figuras 6 e 7 apresentam a planta baixa e um corte longitudinal da Sala 152 no *software* AutoCAD.



Figura 6: Planta baixa da Sala 152.

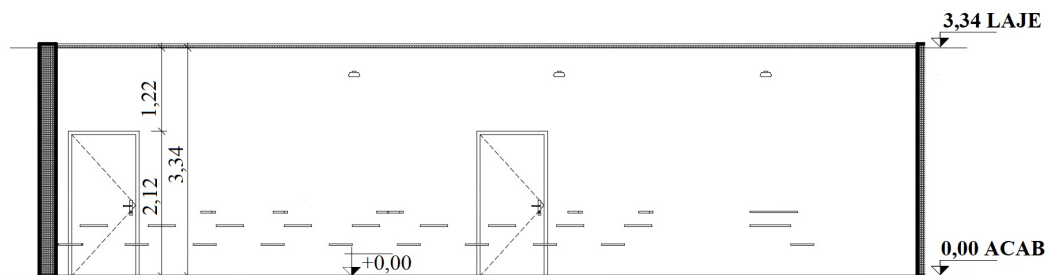


Figura 7: Corte longitudinal da Sala 152.

3.2.3 Coeficientes de absorção e de espalhamento

Para cada superfície da geometria é preciso definir coeficientes de absorção e de espalhamento via seleção de materiais. Estabeleceu-se o coeficiente de espalhamento em 0,01, um nível mínimo, devido à pequena quantidade de dados disponível. A Tabela 5 apresenta cada material usado em cada tipo de superfície e os seus coeficientes de absorção originais.

Tabela 5: Coeficientes de absorção dos materiais indicados para as superfícies da Sala 152.

Material	Frequência (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Portas de madeira	0,30	0,20	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10
Mesas e cadeiras de compensado	0,11	0,11	0,12	0,12	0,10	0,10	0,10
Laje de concreto	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Quadro branco e tela de projeção em PVC	0,15	0,15	0,15	0,20	0,40	0,35	0,35
Piso de Parquet	0,02	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10	0,15
Barramento de madeira	0,19	0,23	0,25	0,30	0,37	0,42	0,42
Persianas	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10	0,10

Com os coeficientes de absorção dos materiais encontrados na base de dados, não foi possível alcançar o T_{20} obtido na medição, sendo estes ajustados de modo a convergir para os resultados experimentais. Foram alterados os coeficientes de absorção dos materiais considerados mais prováveis de ocasionar a diferença de resultados. Estes foram o material do quadro branco e tela de projeção, do piso de parquet e das persianas das janelas. A Tabela 6 indica as alterações realizadas.

Tabela 6: Coeficientes de absorção dos materiais originais e ajustados no Raios 7 para a Sala 152.

Material	Frequência (Hz)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Quadro branco e tela de projeção em PVC	0,15	0,15	0,15	0,20	0,40	0,35	0,35
Quadro branco e tela de projeção em PVC (ajustado)	0,15	0,15	0,20	0,20	0,40	0,35	0,35
Piso de Parquet	0,02	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10	0,15
Piso de Parquet (ajustado)	0,20	0,25	0,60	0,35	0,18	0,05	0,01
Persianas	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10	0,10
Persianas (ajustado)	0,03	0,05	0,20	0,65	0,18	0,10	0,10

Após a definição desses três fatores, temos, enfim, a sala inserida no *software* RAIOS 7, apresentada na Figura 8. As cores indicam os materiais utilizados. Os poliedros verdes representam as posições dos receptores enquanto os dodecaedros vermelhos representam as fontes.

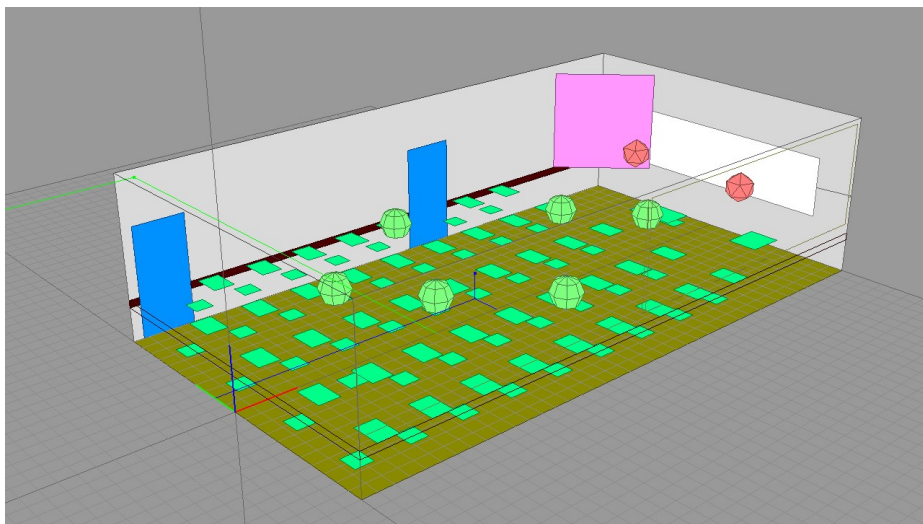


Figura 8: Sala 152 no RAIOS 7 com fontes e receptores e materiais em cada uma das superfícies.

4. Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados para os seguintes parâmetros: tempo de reverberação (T_{20}), definição (D_{50}) e índice de transmissão da fala (STI). Os resultados das medições e simulações são comparados.

4.1 Tempo de reverberação (T_{20})

A Figura 9 apresenta o valor médio de T_{20} em banda de 1/1 oitava correspondente às medições realizadas, ou seja, a média espacial para todos os pares fonte-receptor. Também é apresentado o desvio padrão calculado a partir das dispersões dos resultados de cada par fonte-receptor. O desvio apresentado tem relação principalmente com os modos acústicos da sala, visto que sua frequência de corte é de 149,68 Hz. É válido destacar que nesta banda os resultados pela simulação em acústica geométrica, método utilizado pelo RAIOS 7, possuem incerteza significativa. A banda de 125 Hz será apresentada por ser o limite inferior da faixa de frequência da fala considerado no STI e os resultados encontrados nessa banda devem ser analisados pelos valores obtidos nas medições.

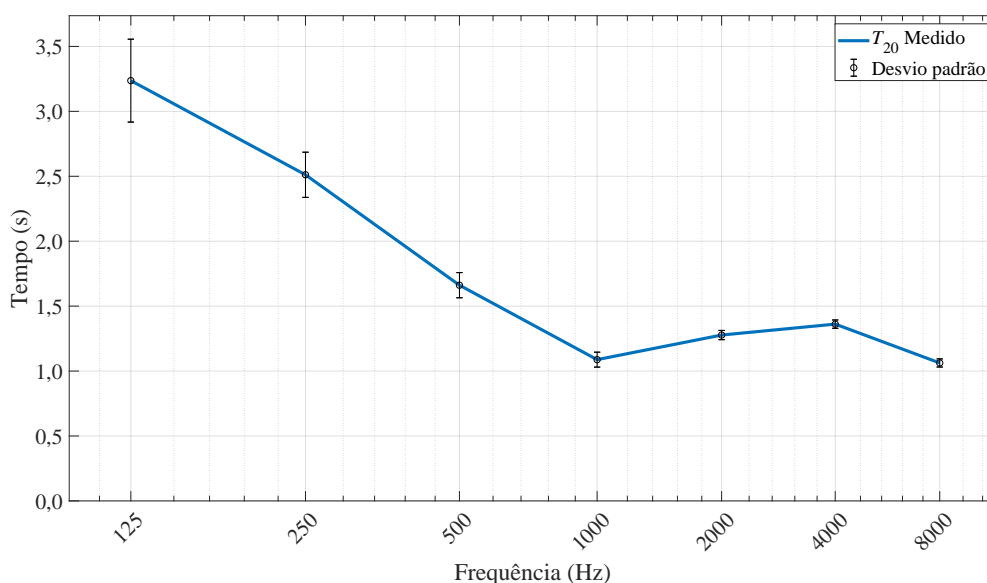


Figura 9: T_{20} médio em banda de 1/1 oitava e desvio padrão entre os decaimentos.

Os resultados obtidos a partir das simulações, com ajustes de alguns coeficientes de absorção, podem ser observados na Figura 10, em que é realizada uma comparação com os resultados obtidos a partir das medições. O ajuste foi realizado conforme a alteração dos coeficientes de absorção indicados na Tabela 6, apresentada na Seção 3.2.3. A partir da Figura 10, nota-se que o tempo de reverberação simulado com ajuste está conforme o medido, exceptuando-se a banda de 125 Hz.

Verifica-se que os valores para T_{20} , tanto medidos quanto simulados, observados em conjunto nas Figuras 10a e 10b, não estão próximos aos recomendados pela ANSI/ASA S12.60-2010 [5]. Como dito anteriormente, o tempo de reverberação ideal para este tipo de ambiente é de 0,6 s, com foco nas bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz pela norma supracitada, em salas de aula com volume menor que 283 m³ (equivalente a 10.000 pés cúbicos), caso da sala em análise.

Além disso, torna-se relevante destacar a queda do tempo de reverberação especificamente para a frequência de 1 kHz, o que resultou em uma maior atenção quanto ao ajuste realizado nas simulações com o *software* RAIOS 7.

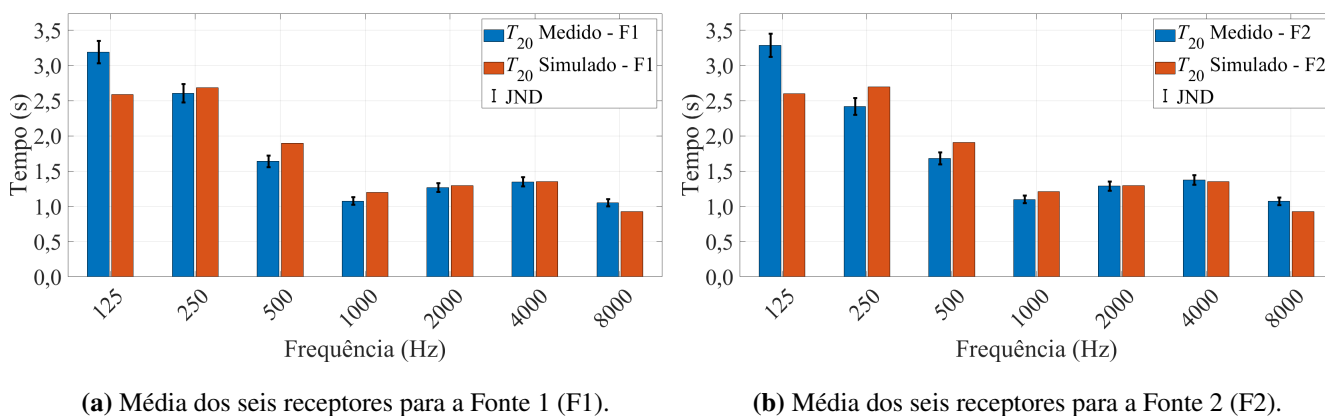


Figura 10: T_{20} medido e simulado com ajuste para F1 e F2 em banda de 1/1 oitava.

Diante do apresentado nas Figuras 10a e 10b, observa-se que os tempos de reverberação simulados ainda não se aproximam do comportamento do T_{20} medido quanto ao seu valor real e seu respectivo JND (*just noticeable difference*).

4.2 Definição (D_{50})

A definição (D_{50}) medida e simulada podem ser observadas na Figura 11. Analisando as curvas encontradas para esse parâmetro, nota-se que os valores obtidos nas medições, resultantes do pós-processamento utilizando o ITA-Toolbox, encontram-se consideravelmente abaixo de 50% para toda a faixa de frequência analisada. Isto indica que a inteligibilidade da fala na Sala 152 é comprometida pela maior energia contida na cauda reverberante, visto que essa energia contaminará a dicção dificultando o entendimento de sílabas subsequentes. Assim, a energia da cauda tenderá a mascarar o próximo som direto que atinge o ouvinte, como destaca Brandão [11].

Na Figura 11, observa-se que os valores de D_{50} também indicam que a inteligibilidade da fala é comprometida no ambiente, uma vez que a região da cauda reverberante carrega a maior parte da quantidade de energia. Por outro lado, nota-se que com o ajuste realizado, Figuras 11a e 11b, para valores próximos à faixa de 500 Hz e 2 kHz são superiores a 50%. A partir desse resultado, verifica-se a influência da absorção nesse parâmetro objetivo, uma vez que o seu aumento provoca um decaimento mais rápido da energia sonora dentro da sala, o que leva a uma maior concentração de energia na parte inicial do decaimento. De forma geral, os resultados medidos e simulados indicam a necessidade de um bom equilíbrio da absorção sonora na sala e necessidade de meios para direcionamento da energia inicial da fala.

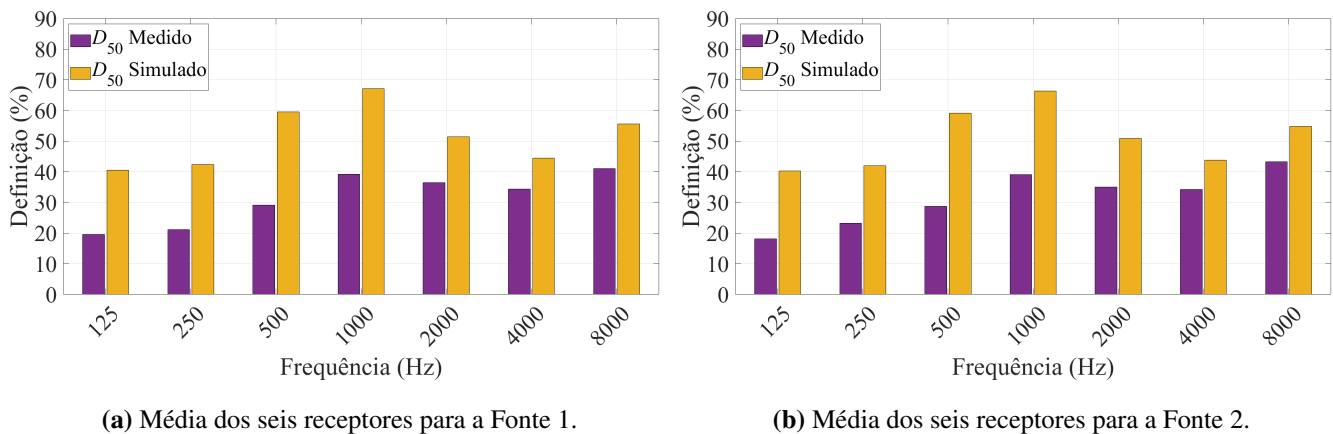


Figura 11: D_{50} medido e simulado com ajuste para F1 e F2 em banda de 1/1 oitava.

4.3 Índice de transmissão da fala (STI)

Diferentemente dos parâmetros anteriores, o STI foi apenas calculado a partir das medições pela consideração do SNR e diferença observada no D_{50} medido e simulado. Também será apresentado por receptor como é um valor único que independe da frequência. A Tabela 7 apresenta os valores encontrados de STI. Estes resultados foram encontrados a partir do STI para cada medição em cada ponto, isto é, as duas fontes e as três medições por fonte, totalizando seis valores para realização das médias. Apesar da proximidade dos Receptores 2 e 4 das fontes² a melhora no STI é marginal comparando-os com os demais receptores. A maior variação foi de 0,05 e todos os pontos se encontram na região “razoável” do STI³. Estes resultados corroboram com o encontrado no D_{50} e também indicam a necessidade de um bom equilíbrio da absorção sonora na sala e necessidade de meios para direcionamento da energia inicial da fala.

Tabela 7: STI em cada par fonte-receptor.

Receptor	STI	
	F1	F2
R1	0,51	0,53
R2	0,50	0,53
R3	0,48	0,52
R4	0,53	0,50
R5	0,51	0,48
R6	0,52	0,48

5. Considerações finais

A pesquisa realizada avaliou a qualidade acústica da Sala 152, localizada no andar térreo do Anexo A do Centro de Tecnologia (CT), que consiste no ambiente escolhido para análise e futuro projeto de condicionamento acústico de sala de aula da Universidade Federal de Santa Maria.

A partir das medições e simulações realizadas neste primeiro momento, foi possível constatar que a Sala 152 do CT encontra-se com condições acústicas inadequadas para a prática do ensino. Apesar dos resultados de STI entre 0,48 e 0,53, para os diferentes pares fonte-receptor, valores classificados como razoáveis segundo a referência normativa [9], observou-se que o tempo de reverberação do local encontra-se acima do recomendado nas bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz para esse tipo de ambiente. Levando em consideração o volume da sala, conforme a ANSI/ASA S12.60-2010 [5], o ideal é de 0,6 s,

²Ver Figura 4 para referência dos pontos de medição.

³Ver Tabela 2 para referência qualitativa do STI.

o que indica a possibilidade de realização de melhorias a partir de uma proposta de condicionamento acústico.

Considerando que a arquitetura da sala analisada é comum para uma grande parcela das salas do CT, os resultados deste estudo reforça a necessidade de iniciar um movimento para alterar as condições acústicas desses espaços de ensino. As próximas etapas deste projeto são:

- aplicação de questionário, para avaliação subjetiva, aos docentes e discentes que utilizam a Sala 152 com as condições atuais;
- confecção do projeto arquitetônico da sala com aplicação de absorvedores e refletores, para diminuição da reverberação e aumento da energia nas primeiras reflexões;
- simulação da sala com o condicionamento proposto e adequações ao projeto caso necessário;
- execução do projeto de condicionamento e realização de novas medições acústicas na sala; e
- aplicação de novo questionário, para avaliação subjetiva, após algumas semanas de utilização da sala com condicionamento, para averiguar o grau de satisfação de docentes e discentes.

Ao fim das etapas supracitadas espera-se conscientizar os gestores, do Centro de Tecnologia e de outros centros da universidade, para o padrão construtivo de ambientes de ensino, com destaque no cuidado das condições acústicas internas de salas de aula para que, gradualmente, a UFSM possa se tornar uma referência na acústica de suas salas e, por consequência, de seu ensino no Brasil.

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer todo o apoio e infraestrutura fornecidos pelo curso de graduação em Engenharia Acústica, pelo Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, pela iniciativa da Acústica Júnior e, em especial, a empresa Trisoft, cujo subsídio dos materiais acústicos tornará possível a execução de projeto de condicionamento acústico da Sala 152 do CT da UFSM. Assim como o apoio dos professores, colegas, amigos e familiares durante o processo de elaboração deste trabalho.

Referências

1. ABNT NBR ISO 3382. *Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns*. Rio de Janeiro, 2017. 19 p.
2. TENENBAUM, Roberto A.; CAMILO, Thiago S. Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas: teoria, implantação computacional e validação experimental. *Seminário Música Ciência Tecnologia*, v. 1, n. 1, 2004.
3. GOOGLE Earth. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>.
4. MINELLI, Greta; PUGLISI, Giuseppina Emma; ASTOLFI, Arianna. Acoustical parameters for learning in classroom: A review. *Building and Environment*, Elsevier, v. 208, p. 108582, 2022.
5. CALLAGHAN, Aedan. Sound transmission guidelines in mass timber schools; meeting asa/ansi s12. 60-2010. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 153, n. 3_supplement, p. A91–A91, 2023.
6. BOTTALICO, Pasquale; GRAETZER, Simone; HUNTER, Eric J. Effect of reverberation time on vocal fatigue. In: *Proceedings of the International Conference on Speech Prosody*. [S.l.: s.n.], 2016. v. 2016, p. 494–497.
7. THIELE, Von R. Richtungsverteilungen und zeitfolge der schallruckewurfe in raumen. *Acustica*, p. 291–302, 1953.
8. LONG, Marshall. *Architectural Acoustics*. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2014. ISBN 978-0-12-398258-2.
9. ABNT NBR IEC 60268. *Acústica – Equipamentos de sistemas de som – Parte 16: Avaliação objetiva da inteligibilidade da fala pelo índice de transmissão da fala*. Rio de Janeiro, 2018.
10. DIETRICH, Pascal; GUSKI, Martin; KLEIN, Johannes; MÜLLER-TRAPET, Markus; POLLOW, Martin; SCHARRER, Roman; VORLÄNDER, Michael. Measurements and room acoustic analysis with the ita-toolbox for matlab. In: *40th Italian (AIA) Annual Conference on Acoustics and the 39th German Annual Conference on Acoustics (DAGA)*. [S.l.: s.n.], 2013.
11. BRANDÃO, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1 (rev). ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.