

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DA NBR ISO 3382-2 E ANÁLISE DOS  
TEMPOS DE REVERBERAÇÃO DAS SALAS DE AULA DO PRÉDIO 11209 DO  
CAMPUS CENTRO DA UFRGS

por

Alexandre Borges Ferreira da Costa

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

Alexandre Borges Ferreira da Costa

METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DA NBR ISO 3382-2 E ANÁLISE DOS  
TEMPOS DE REVERBERAÇÃO DAS SALAS DE AULA DO PRÉDIO 11209 DO  
CAMPUS CENTRO DA UFRGS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Comissão de Avaliação:

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof<sup>a</sup>. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, novembro de 2020

## CIP - Catalogação na Publicação

Ferreira da Costa, Alexandre Borges  
Metodologia de aplicação da NBR ISO 3382-2 e  
análise dos tempos de reverberação das salas de aula  
do prédio 11209 do campus centro da UFRGS / Alexandre  
Borges Ferreira da Costa. -- 2020.  
27 f.  
Orientador: Juan Pablo Raggio Quintas.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2020.

1. acústica. 2. tempo de reverberação. 3. conforto  
acústico. 4. isolamento acústico. I. Raggio Quintas,  
Juan Pablo, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Borges Ferreira da Costa, Alexandre. **Metodologia de aplicação da NBR ISO 3382-2 e análise dos tempos de reverberação das salas de aula do prédio 11209 do campus centro da UFRGS**. 2020. 27 folhas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

## RESUMO

Neste trabalho é aplicada a metodologia abordada na norma NBR ISO 3382-2 para realizar a medição dos tempos de reverberação das salas de aula do prédio 11209 do campus centro da UFRGS, a fim de investigar a ocorrência de problemas relacionados ao conforto acústico, relatados por seus ocupantes. Foi feita uma avaliação qualitativa das características acústicas das salas, inclusive referente ao isolamento acústico. As medições foram realizadas nas salas utilizando o método da resposta impulsiva integrada com nível de inspeção. Foi constatado que as salas possuíam tempos de reverberação excessivos, acima de 0,6 segundos, que foi considerado como o valor máximo aceitável. Além disso, foram destacados fatores que poderiam estar contribuindo para o excesso do nível de ruído percebido por alunos e professores. Foi sugerida a troca da porta por uma com maior capacidade de isolamento e a substituição do material das janelas que ficavam entre as salas e os corredores. Acredita-se que essas mudanças melhorariam o isolamento da sala, diminuindo o nível de ruído. Foi proposta a utilização de um forro acústico para reduzir o excesso de reverberação. Os valores dos tempos de reverberação calculados utilizando o forro proposto foram satisfatórios, visto que ficaram abaixo do limite máximo estabelecido.

**PALAVRAS-CHAVE:** acústica, tempo de reverberação, conforto acústico, isolamento acústico.

Borges Ferreira da Costa, Alexandre. **Application methodology of NBR ISO 3382-2 and reverberation time analysis in classrooms of the building 11209 of UFRGS's central campus.** 2020. 27 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

#### ABSTRACT

In this study the methodology addressed in the NBR ISO 3382-2 standard is applied to measure the reverberation times in classrooms of the building 11209 of UFRGS's central campus, in order to investigate the occurrence of problems related to acoustical comfort described by its occupants. A qualitative assessment of the classrooms' acoustical characteristics was made, including the ones relative to their acoustical insulation. The measurements were done in the classrooms using the impulse response method with the inspection level. It was verified that the classrooms had excessive reverberation times, above 0,6 seconds, which was considered the maximum acceptable limit value. Moreover, points that could be contributing to the excessive noise levels noted by pupils and teachers were highlighted. It was suggested the replacement of the doors for new ones with more insulation capacity and the change of the material of the windows located between the classrooms and the corridors. It is believed that these changes could improve the classrooms' insulation, decreasing noise levels. It was also suggested the use of an acoustical liner to reduce the excessive reverberation. The reverberation time results calculated using the chosen liner were satisfactory, since they were lower than the maximum limit established.

**KEYWORDS:** acoustics, reverberation time, acoustic comfort, acoustic insulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da energia sonora incidindo sobre uma superfície.....	2
Figura 2 – Planta baixa das salas 21 e 22 do prédio 11209.....	4
Figura 3 – Planta baixa da sala 53 do prédio 11209.....	5
Figura 4 – Representação dos pontos de medição e da localização da fonte sonora na sala 21.....	6
Figura 5 – Representação dos pontos de medição e da localização da fonte sonora na sala 22.....	7
Figura 6 - Representação dos pontos de medição e da localização da fonte sonora na sala 53.....	7
Figura 7 – (a) Sonômetro tipo 2250, Brüel and Kjaer; (b) balão utilizado como fonte sonora.....	8
Figura 8 – Representação do sonômetro posicionado em um ponto receptor.....	9
Figura 9 – (a) Decaimento do nível de pressão sonora em 500 Hz da sala 21; (b) Tempos de reverberação $t_{20}$ em função da frequência na sala 21.....	10
Figura 10 – (a) Decaimento do nível de pressão sonora em 500 Hz da sala 22; (b) Tempos de reverberação $t_{20}$ em função da frequência na sala 22.....	11
Figura 11 – (a) Decaimento do nível de pressão sonora em 500 Hz da sala 53; (b) Tempos de reverberação $t_{20}$ em função da frequência na sala 53.....	11
Figura 1.A.A – Gráfico do índice de redução sonora de portas acústicas de diferentes modelos em função da frequência.....	17
Figura 2.A.A – Ensaio de absorção do forro Prisma Decor 15mm.....	17

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores máximos do tempo de reverberação de salas de aula em função de seu volume.....	12
Tabela 2 – Dados da absorção acústica do Forro Prisma Decor .....	13
Tabela 3 – Tempos de reverberação (TR) das salas após a utilização do forro acústico	13
Tabela 1.A - Coeficientes de absorção das salas .....	18
Tabela 2.A – Áreas das superfícies e número de cadeiras das salas .....	18

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
2.1 Absorção sonora.....	2
2.1.1 Coeficiente de absorção sonora.....	2
2.2 Reverberação sonora.....	3
2.3 Tempo de Reverberação (TR).....	3
2.4 Isolamento acústico.....	3
2.4.1 Perda de transmissão (PT).....	4
2.5 NBR ISO 3382-2:2017 - Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns.....	4
3. METODOLOGIA.....	4
3.1 Escolha das salas.....	4
3.2 Níveis de exatidão.....	5
3.3 Posições de Medição.....	5
3.4 Método de medição.....	7
3.5 Materiais utilizados.....	8
3.6 Procedimento de medição.....	9
3.6.1 Média espacial.....	9
3.7 Análise qualitativa.....	10
3.8 Comparação dos resultados medidos.....	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
4.1 Tempos de reverberação.....	10
4.2 Comparação dos resultados.....	11
4.3 Análise qualitativa das características das salas.....	12
4.4 Propostas para o tratamento acústico das salas.....	13
4.4.1 Forro acústico.....	13
4.4.2 Tempos de reverberação após aplicação do forro acústico.....	13
4.4.3 Porta Acústica.....	14
4.4.4 Substituição dos vidros das janelas.....	14
5. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
ANEXO A – DADOS DO ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA DA PORTA DE MADEIRA ISD35 E DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DO FORRO PRISMA DECOR	17
APÊNDICE A – DADOS UTILIZADOS NOS CÁLCULOS DOS TEMPOS DE REVERBERAÇÃO DAS SALAS.....	18
APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CÁLCULOS DOS TEMPOS DE REVERBERAÇÃO.....	19



## 1. INTRODUÇÃO

É evidente que o conforto de cada indivíduo influencia diretamente o seu desempenho em diversos tipos de atividades. O sentimento de desconforto provoca irritação, ansiedade, estresse, mudanças no humor, perda nas capacidades de concentração e de comunicação. Essas manifestações estão similarmente relacionadas a falta de conforto acústico, embora sua importância seja frequentemente subestimada devido ao desconhecimento relativo às implicações dos efeitos sonoros resultantes de um condicionamento acústico mal feito ou inexistente.

De acordo com relatos de alunos e professores, as salas de aula do prédio 11209 da UFRGS não possuem uma qualidade acústica adequada. Isso pode estar relacionado a tempos de reverberação maiores que os tempos ótimos recomendados para locais com essa finalidade e a possível deficiência no isolamento das portas e janelas, que acaba permitindo a entrada excessiva de sons externos e aumentando o nível de pressão sonora interno.

Atualmente, a educação em escolas e universidades depende fortemente da capacidade de comunicação verbal. A qualidade acústica das salas de aula influencia diretamente no processo de comunicação, interferindo na capacidade de aprendizagem. Um dos fatores que interfere no desempenho sonoro de uma sala é a reverberação acústica, fenômeno decorrente da reflexão das ondas sonoras nas superfícies de um ambiente fechado. Em locais com reverberação excessiva, quando o tempo de permanência do som no ambiente é elevado, há uma perda na inteligibilidade da fala, prejudicando a comunicação, o que acaba sendo um empecilho à transmissão de informação e diminui o desempenho dos alunos. Além disso, em salas de aula acusticamente mal projetadas os professores acabam apresentando transtornos vocais devido ao esforço feito para compensar as dificuldades de comunicação.

Diversos estudos foram realizados para avaliar parâmetros acústicos em salas de aula. Raeder e Nakazato (2018) fizeram um estudo de caso das condições acústicas em escolas privadas no Brasil. Das doze salas de aula analisadas, dez possuíam algum tipo de tratamento acústico e apresentaram valores satisfatórios de tempo de reverberação, enquanto as outras duas não possuíam nenhum tratamento e tiveram valores acima do recomendado em normas internacionais. O isolamento sonoro entre as salas foi considerado satisfatório na maioria dos casos, mas o isolamento entre as salas e os corredores foi considerado baixo e o nível de ruído de fundo estava acima de valores aceitáveis na maior parte das análises.

Zannin e Zwirter (2009) avaliaram o conforto acústico de salas de aula de escolas públicas paranaenses, construídas de acordo com três padrões de construção. Foi constatado que todas as escolas apresentavam erros concernentes a acústica das salas e esses foram relacionados a erros no projeto arquitetônico e na escolha dos materiais de acabamento interno.

Choi, S, et al (2014) analisaram a influência que diversas variáveis de qualidade do ambiente interno de salas de aula exerciam sobre a satisfação dos alunos, incluindo variáveis de conforto acústico. O estudo indicou que há relações significativas entre a satisfação dos alunos com as variáveis de qualidade analisadas e a satisfação com a qualidade interna geral das salas. Além disso, a satisfação com as salas foi relacionada à percepção dos estudantes de uma melhora no processo de aprendizagem e a um maior contentamento com os cursos.

A qualidade acústica de uma sala de aula é, então, um ponto crítico a ser considerado no projeto de ambientes de ensino. Locais onde a aprendizagem é

diretamente dependente da qualidade da comunicação verbal devem receber uma atenção especial quanto ao seu condicionamento acústico.

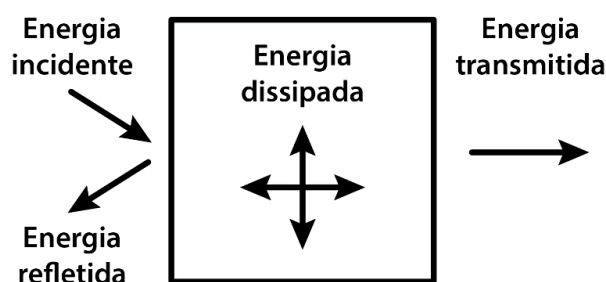
Este trabalho, a fim de determinar possíveis causas para o desconforto acústico percebido pelos usuários das salas de aula do prédio 11209 da UFRGS, tem como objetivos: avaliar os tempos de reverberação das salas, seguindo as orientações apresentadas na NBR ISO 3382-2; fazer uma análise qualitativa referente às possíveis causas para os problemas relatados, tanto para o condicionamento quanto para o isolamento acústico; e propor possíveis soluções para os problemas identificados.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 Absorção sonora

Ao incidir sobre uma superfície, a energia sonora incidente pode ser decomposta em duas parcelas: a energia refletida e a energia absorvida. Esta última é composta pela energia dissipada no interior do material da superfície e pela energia que é transmitida através desse. Uma representação da decomposição da energia sonora ao incidir sobre uma superfície pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 – Representação da energia sonora incidindo sobre uma superfície



A absorção sonora de um material está relacionada à quantidade de energia que é absorvida por este, seja por dissipação ou por transmissão da energia sonora incidente. Um bom material absorvente apresenta uma parcela de energia absorvida superior a parcela de energia refletida.

#### 2.1.1 Coeficiente de absorção sonora

A capacidade de um material de absorver energia sonora é quantificada pelo seu coeficiente de absorção sonora. Esse representa uma relação entre a energia sonora incidente e a energia sonora absorvida.

O coeficiente não depende apenas da natureza do material, como também das características de sua superfície, da forma como é instalado no local de interesse e varia com a frequência do som incidente. É geralmente representado por  $\alpha$  e seu valor varia entre 0 e 1, sendo  $\alpha = 0$  o valor correspondente a um material que reflete todo o som incidente, e  $\alpha = 1$  o coeficiente de um material totalmente absorvente. Os valores dos coeficientes para diferentes bandas de frequência são determinados através de ensaios feitos em câmaras reverberantes.

A absorção sonora de uma superfície,  $A$ , depende do seu coeficiente de absorção e de sua área superficial. Como o coeficiente de absorção sonora é adimensional,  $A$  tem unidades de  $m^2$  (Sabine), como indicativo de área de absorção, e é dada por

$$A = \alpha \cdot S \quad (1)$$

em que  $S$  é a área da superfície ( $m^2$ ).

## 2.2 Reverberação sonora

A reverberação sonora é um fenômeno ondulatório associado à reflexão das ondas sonoras. É o efeito produzido quando o som refletido de forma repetitiva chega no ouvido humano. Diferencia-se do eco pelos intervalos de tempo em que diferentes reflexões do som chegam ao receptor. Para a reverberação, estes intervalos de tempo devem ser menores que 0,1 s. Isto faz com que a sensação provocada seja de um prolongamento do som emitido. O excesso de reverberação em ambientes fechados dificulta a compreensão da fala e prejudica o processo de comunicação.

## 2.3 Tempo de Reverberação (TR)

Em um local fechado, após a interrupção de uma fonte sonora, o nível de pressão sonora de um som produzido por esta decai devido à perda de energia sonora para o ambiente. Essa perda está relacionada a absorção sonora dos materiais e elementos do local com os quais o som interage. Este decaimento é gradativo e leva um tempo para acontecer, durante o qual o som permanece no ambiente refletindo sobre as suas superfícies. O tempo de reverberação (TR) é definido como o tempo necessário para que a média espacial da densidade de energia sonora no ambiente decaia 60 dB após a interrupção da fonte. Este decaimento corresponde a uma diminuição da energia sonora em um milhão de vezes. Um dos pioneiros no estudo da acústica, Wallace Sabine, estabeleceu uma relação para o cálculo do tempo de reverberação de uma sala,  $T$  em s, como mostrado abaixo

$$T = 0,161 \frac{V}{\sum_i^n A_i} \quad (2)$$

em que  $V$  é o volume da sala ( $m^3$ ) e  $A_i$  é a absorção sonora da  $i$ -ésima superfície que delimita a sala ( $m^2$  (Sabine)).

Para lugares distintos com diferentes funcionalidades, o tempo de reverberação deverá ser diferente, de forma a proporcionar o conforto adequado e a experiência acústica desejada. Em salas de aula, por exemplo, tempos de reverberação excessivos prejudicam a inteligibilidade e, conseqüentemente, a transmissão da informação, além de causarem desconforto.

## 2.4 Isolamento acústico

O isolamento acústico de um recinto está relacionado a capacidade das superfícies desse impedirem a passagem de som, tanto de dentro para fora como de fora para dentro. Assim como o condicionamento, o isolamento acústico de um ambiente tem uma grande influência no conforto acústico percebido pelos seus usuários. Em locais com isolamento deficiente, o nível de ruído pode prejudicar a capacidade de comunicação no ambiente e, em salas de aula, é um entrave para o processo de aprendizagem.

### 2.4.1 Perda de transmissão (PT)

Segundo Bistafa (2018), toda vez que uma frente de onda sonora muda seu meio de propagação há uma perda em sua intensidade. Dessa forma, quando o som incide sobre as paredes que delimitam uma sala, há uma mudança no seu meio de propagação, fazendo com que haja uma redução em seu nível de pressão sonora. A capacidade de transmissão do som de uma parede é caracterizada pelo coeficiente de transmissão,  $\tau$ . Porém, o parâmetro mais utilizado para quantificar a capacidade de isolamento de uma parede é a perda na transmissão, *PT*. Essa possui uma relação inversa com  $\tau$ , apresentando um valor maior quanto menor for o coeficiente de transmissão. A perda na transmissão depende da frequência do som e, tipicamente, apresenta valores mais elevados para valores mais altos de frequência.

### 2.5 NBR ISO 3382-2:2017 - Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns

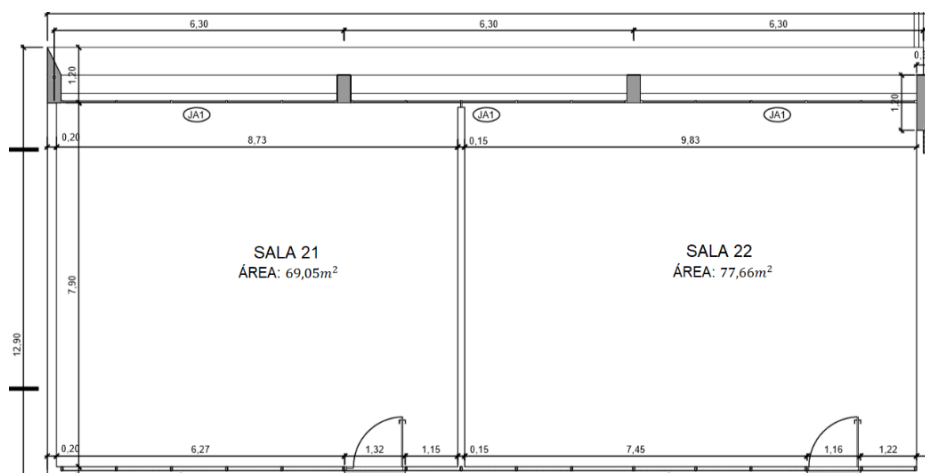
A NBR ISO 3382-2 (2017) é uma norma que aborda medições de parâmetros de acústicas de salas. Em sua segunda parte, trata do tempo de reverberação em salas comuns. Para medições de TR, além de diferenciar três níveis de exatidão, especifica métodos e descreve processos de medição, as características dos dispositivos e equipamentos necessários, os requisitos, números e combinações de posições de medição e como devem ser avaliados os dados e apresentados em relatório. Neste trabalho a NBR ISO 3382-2 foi utilizada como base para orientar as medições de TR das salas de aula.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Escolha das salas

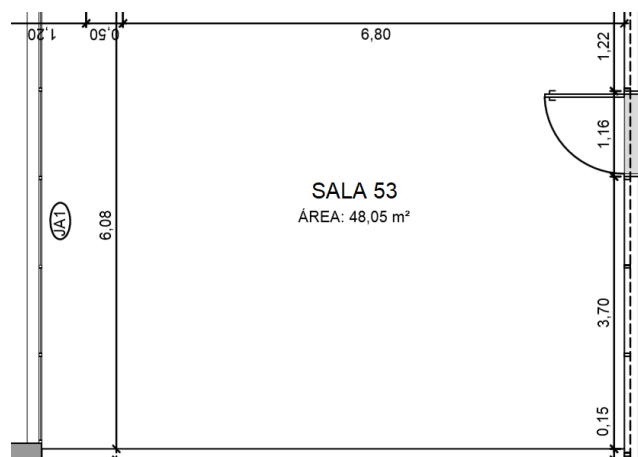
Para a escolha das salas de aula a serem avaliadas foi utilizado um critério geométrico. Tendo em vista que o TR depende do volume do local e que todas as salas do prédio possuem o mesmo pé-direito de 3,4 m, elas foram escolhidas com base em suas áreas. O prédio continha três tipos diferentes de salas de aula com relação às suas geometrias, portanto foram escolhidas três delas para realizar as medições, uma de cada tipo. As salas 21 e 22 foram escolhidas para representarem os dois tipos encontrados do segundo ao quarto pavimento. A Figura 2 mostra a planta das salas 21 e 22.

Figura 2 – Planta baixa das salas 21 e 22 do prédio 11209.



Entre o quinto e o sexto pavimento, as salas de aula eram muito semelhantes, com área de aproximadamente  $48 \text{ m}^2$ . Para representá-las, foi escolhida a sala 53, mostrada na Figura 3.

Figura 3 – Planta baixa da sala 53 do prédio 11209.



Como se pode observar, as salas 21, 22 e 53 possuem área de  $69,05 \text{ m}^2$ ,  $77,66 \text{ m}^2$  e  $48,05 \text{ m}^2$  e volumes de  $234,77 \text{ m}^3$ ,  $264,04 \text{ m}^3$  e  $163,37 \text{ m}^3$ , respectivamente. Como as diferenças entre as salas do quinto e do sexto pavimento eram muito pequenas, foi considerado que não haveriam diferenças significativas nos tempos de reverberação medidos.

### 3.2 Níveis de exatidão

A ISO 3382-2 discrimina três níveis de exatidão em relação às posições de medição: Inspeção, Engenharia e Precisão. A diferença entre os níveis está na quantidade de posições de fonte e de microfone, no número de combinações fonte-microfone utilizadas para fazer as medições e no número de decaimentos em cada posição (para medições utilizando o método do ruído interrompido). Conseqüentemente isso influencia o tempo necessário para a realização das medições. Cada um dos níveis apresenta uma exatidão diferente para os resultados de tempo de reverberação medidos.

Por ser exigida uma quantidade menor de posições de medição entre os três níveis descritos, como exemplo de aplicação, foi escolhido o método de Inspeção. Segundo a norma, para este método são necessárias uma ou mais posições de fonte, duas ou mais posições de microfone, no mínimo duas combinações fonte-microfone e as medições devem ser feitas em bandas de oitava. Nos casos em que não há requisitos para bandas de frequência específicas, a norma sugere que, para o método de inspeção, a faixa de frequência avaliada cubra pelo menos de 250 Hz a 2000 Hz. A norma afirma que, para esse método, é assumida uma exatidão nominal melhor que 10% para bandas de oitava.

### 3.3 Posições de Medição

Segundo a norma, as posições da fonte podem ser escolhidas como as posições consideradas normais para o uso da sala, portanto as posições de fonte foram colocadas centralizadas e próximas ao quadro em todas as salas. Desta forma as fontes estariam representando a posição aproximada de um professor na sala durante a aula. É sugerido que, para faixas usuais de frequência, as posições de microfone estejam afastadas entre si

a uma distância mínima de 2 m e que a distância entre qualquer posição de microfone e a superfície refletora mais próxima seja de pelo menos 1 m. Além disso, é recomendado evitar a escolha de posições simétricas.

Para evitar uma influência muito forte do som direto, as posições de microfone não devem estar muito próximas a nenhuma posição de fonte. A distância mínima,  $d_{\min}$ , em metros, entre estas é calculada a partir da Equação (3).

$$d_{\min} = 2\sqrt{V/c \cdot T} \quad (3)$$

em que  $V$  é o volume da sala ( $m^3$ ),  $c$  é a velocidade do som no meio ( $m/s$ ) e  $T$  é uma estimativa do tempo de reverberação ( $s$ ). Considerando um tempo de reverberação estimado de  $T = 2 s$  e a velocidade do som no ar aproximadamente  $c = 343 m/s$ , obteve-se os valores de  $d_{\min}$  de 1,17 m, 1,24 m e 0,97 m para as salas 21, 22 e 53, nesta ordem.

As posições de fonte e microfone utilizadas para as medições nas salas 21, 22 e 53 são mostradas nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente.

Figura 4 – Representação dos pontos de medição e da localização da fonte sonora na sala 21.

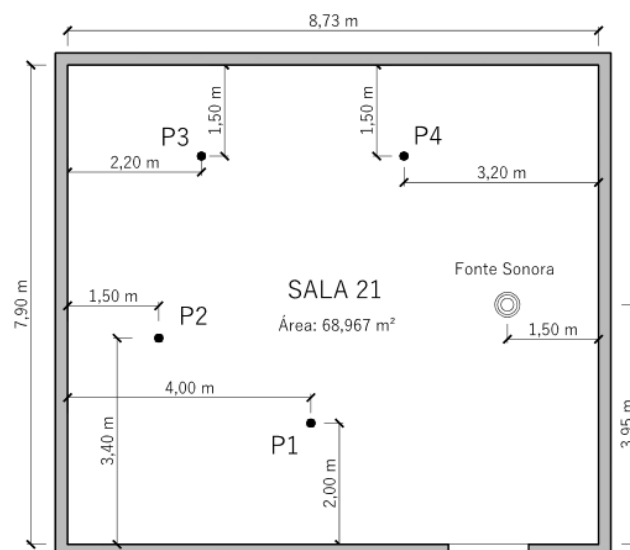


Figura 5 – Representação dos pontos de medição e da localização da fonte sonora na sala 22.

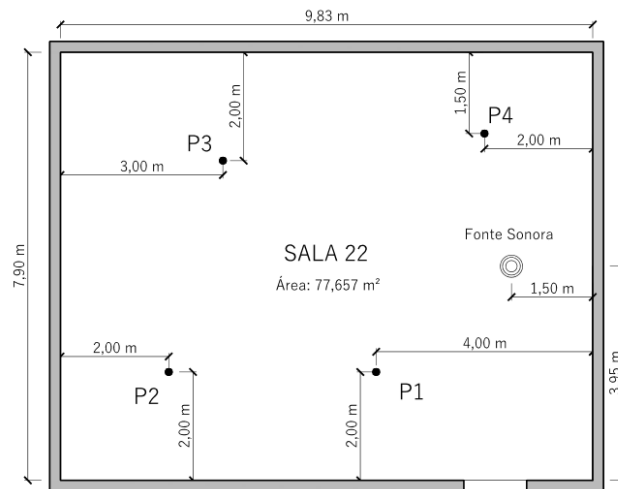
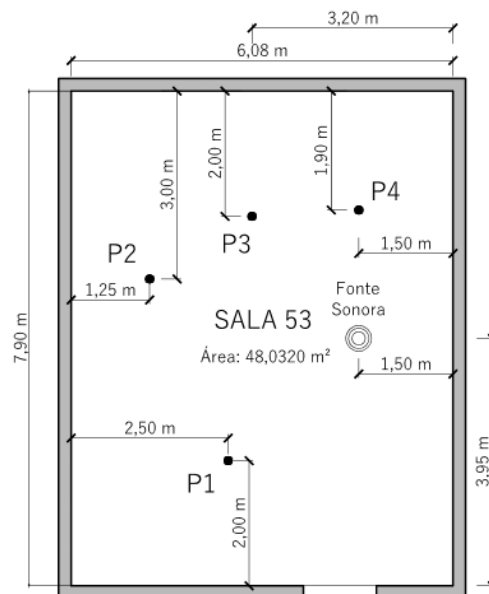


Figura 6 - Representação dos pontos de medição e da localização da fonte sonora na sala 53.



Os pontos P1, P2, P3 e P4 representam os locais onde o microfone foi sucessivamente posicionado e a demarcação Fonte Sonora representa a posição onde foi produzida a excitação inicial para a realização da medição.

### 3.4 Método de medição

A ISO 3382-2 descreve dois métodos referentes ao procedimento de medição: Método do Ruído Interrompido e o Método da Resposta Impulsiva Integrada. Para ambos os métodos é pressuposto o mesmo valor esperado.

Por não possuir os equipamentos necessários para a aplicação do método do ruído interrompido, foi utilizado o método da resposta impulsiva integrada. Esse consiste em um método em que o som inicial é produzido por uma fonte impulsiva, como o estouro

de balão ou o disparo de uma pistola. Após a excitação impulsiva, o aparelho de medição detecta a ultrapassagem do nível de pressão sonora definido como gatilho do procedimento e começa a medir o decaimento do som. A medição é interrompida quando o sonômetro detecta o ruído de fundo do local novamente, o que é feito automaticamente. O aparelho faz uma integração reversa no tempo do quadrado das respostas impulsivas e, então, mostra as curvas de decaimento em função do tempo e dos tempos de reverberação no espectro de frequências.

De acordo com a definição de tempo de reverberação, o monitoramento do decaimento sonoro deveria ocorrer até uma diminuição de 60 dB após a interrupção da fonte. Porém, devido à dificuldade de se obter ruídos de fundo baixos o suficiente no local a ser analisado, a excitação gerada pela fonte deveria ser extremamente alta para que houvesse uma diferença de 60 dB entre o som impulsivo e o ruído de fundo. Por isso, os tempos de reverberação são geralmente avaliados para decaimentos de 20 ou 30 dB e as respectivas linhas de regressão são, então, extrapoladas para 60 dB. Os tempos de reverberação avaliados a partir do decaimento de 20 e 30 dB são representados, respectivamente, por  $t_{20}$  e  $t_{30}$  (s). De acordo com a norma, convém que, para a obtenção de  $t_{20}$  e  $t_{30}$ , os valores do nível de pressão sonora da excitação impulsiva estejam, respectivamente, 35 dB e 45 dB acima do nível de pressão sonora do som residual. Além disso, a norma dá preferência à utilização de  $t_{20}$  já que a avaliação subjetiva da reverberação é relacionada à parte inicial do decaimento.

### 3.5 Materiais utilizados

A ISO 3382-2 diz que os microfones utilizados nas medições devem ser omnidirecionais. Afirma também que é apropriado que a fonte seja a mais omnidirecional possível. Para os níveis de exatidão de inspeção e engenharia não há requisitos específicos quanto a direcionalidade da fonte, contudo ela deve produzir um nível de pressão sonora suficiente para que se obtenham as curvas de decaimento para a faixa de avaliação escolhida sem que haja contaminação pelo som residual.

Para fazer as medições dos tempos de reverberação, foi utilizado um sonômetro tipo 2250 da marca Brüel & Kjær, de classe 1, com calibração NBR/IEC 17025. Esse foi utilizado como microfone/receptor do som emitido pela fonte, e foi responsável pela mensuração dos valores de TR. Como instrumento de elevação e fixação do sonômetro foi utilizado um tripé. Para produzir a excitação impulsiva, foram utilizados balões. O sonômetro e um dos balões são mostrados nas Figuras 7(a) e 7(b).

Figura 7 – (a) Sonômetro tipo 2250, Brüel and Kjaer; (b) balão utilizado como fonte sonora.



(a)



(b)



### 3.6 Procedimento de medição

O sonômetro era fixado a um tripé com 1,2 m de altura do solo e posicionado em um dos pontos estabelecidos como receptores. Após, o aparelho era acionado para começar o procedimento de medição. Uma representação do posicionamento do sonômetro em uma medição é mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Representação do sonômetro posicionado em um ponto receptor.



O balão era, então, estourado na posição de fonte sonora definida e esperava-se até que o aparelho emitisse um sinal indicativo de que a medição havia terminado. Os resultados eram avaliados logo após sua obtenção para verificar qualquer anormalidade que pudesse invalidar a medição e, caso necessário, essa era feita novamente. Esse procedimento foi repetido para as medições de todas as combinações de fonte/receptor nas três salas escolhidas para a avaliação.

As medições foram feitas no dia 24 de outubro de 2019 no período da tarde, durante a semana acadêmica da universidade. O procedimento foi realizado com duas pessoas presentes nas salas. A norma sugere que as medições sejam feitas sem qualquer pessoa presente, entretanto afirma que podem ser feitas com até duas pessoas no local e ainda assim considerar seu estado como desocupado. Como pessoas também absorvem o som, é possível que os valores medidos sejam um pouco inferiores aos valores reais dos tempos de reverberação das salas.

#### 3.6.1 Média espacial

Os valores obtidos através das medições para cada combinação de posições de fonte e microfone devem ser utilizados para se obter a média espacial do TR da sala. Uma das formas apresentadas na norma consiste em calcular a média aritmética dos tempos de reverberação individuais para todas as combinações de posições de fonte e microfone independentes. O sonômetro foi configurado para que esse procedimento fosse feito automaticamente após as medições.

### 3.7 Análise qualitativa

Além do possível excesso de reverberação, houveram relatos de excesso de ruído nas salas durante as aulas. Por isso, foi feita uma análise qualitativa das características das salas que poderiam ser as causas para os problemas descritos. Foi feita uma avaliação de alguns dos elementos presentes no interior das salas, assim como a inspeção visual de portas, janelas e divisórias, pontos considerados críticos quanto aos fenômenos investigados.

### 3.8 Comparação dos resultados medidos

Para que se pudesse avaliar a magnitude dos resultados das medições, os tempos de reverberação foram comparados com valores limites estabelecidos para ambientes de ensino. Devido à ausência de norma brasileira que especifique tempos de reverberação ótimos para salas de aula, foram utilizadas como referências a norma internacional ANSI S 12.60 – Critérios de Performance Acústica, Requerimentos de Projeto e Orientações para Escolas (*Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools*, em inglês) (ANSI, 2010), publicada pelo *American National Standard Institute*, que estabelece orientações e diretrizes de projeto concernentes à acústica de salas em escolas e espaços de ensino, e a recomendação proposta por Berglund, et al (2000).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Tempos de reverberação

Obtidos a partir das medições, as curvas de decaimento médio do nível de pressão sonora em função do tempo para a frequência de 500 *Hz* e os gráficos dos tempos de reverberação médios em função da frequência para cada sala são mostradas nas Figuras 9(a), 9(b), 10(a), 10(b), 11(a) e 11(b).

Figura 9 – (a) Decaimento médio do nível de pressão sonora em 500 *Hz* da sala 21; (b) Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios em função da frequência na sala 21

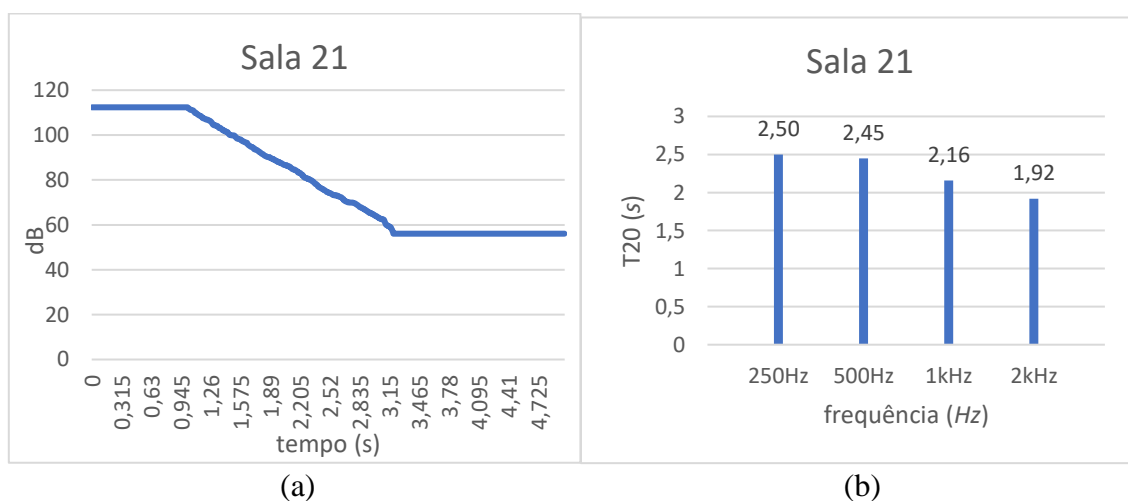


Figura 10 – (a) Decaimento médio do nível de pressão sonora em 500 Hz da sala 22; (b) Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios em função da frequência na sala 22

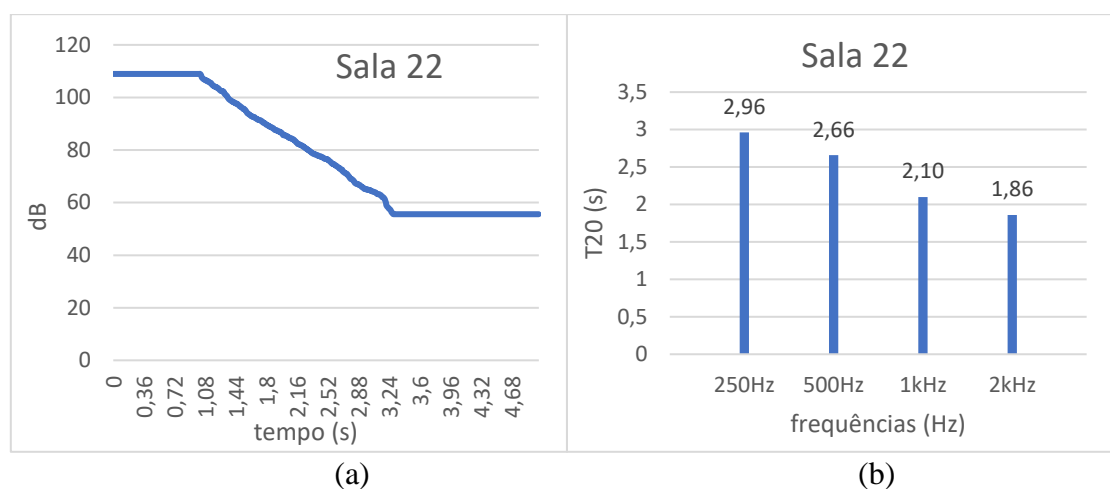
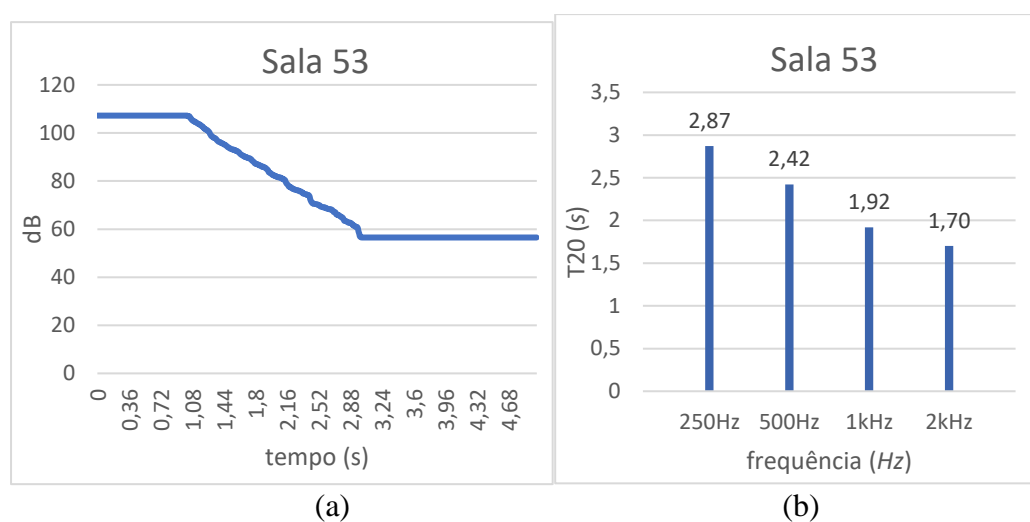


Figura 11 – (a) Decaimento médio do nível de pressão sonora em 500 Hz da sala 53; (b) Tempos de reverberação  $T_{20}$  médios em função da frequência na sala 53



Como pode-se observar nas figuras, as curvas mostram que os decaimentos apresentam um comportamento linear. Isso é desejado, pois a não linearidade das curvas pode ser um indício de que haja uma sobreposição de modos com diferentes tempos de reverberação, o que implicaria em resultados não confiáveis. Os tempos de reverberação apresentaram valores que diminuem com o aumento da frequência, sendo significativamente mais altos em frequências mais baixas.

#### 4.2 Comparação dos resultados

Na norma ANSI S12.60 (2010) são encontrados valores de TR recomendados para salas de aula de acordo com seus respectivos volumes. Estes valores são mostrados na Tabela 2.

Tabela 1 – Valores máximos do tempo de reverberação de salas de aula em função de seu volume.

Espaço de aprendizagem	Tempo de reverberação máximo permitido para níveis de pressão sonora nas bandas de oitava com frequências de banda média de 500, 1000 e 2000 Hz (s)
Núcleo do espaço de aprendizagem com volume fechado $\leq 283m^3$ ( $\leq 10.000 ft^3$ )	0,6 s
Núcleo do espaço de aprendizagem com volume fechado $> 283 m^3$ e $\leq 566 m^3$ ( $> 10.000 ft^3$ e $\leq 20.000 ft^3$ )	0,7 s
Núcleo dos espaços de aprendizagem com volumes $> 566 m^3$ ( $> 20.000 ft^3$ )	Sem requisitos

Conforme mostrado na Tabela 2, tendo em vista que todas as salas possuem volumes menores que  $283m^3$ , o limite máximo para os tempos de reverberação estabelecido é de 0,6 s para bandas de oitava com frequências de banda média de 500, 1000 e 2000 Hz. Este valor está de acordo com o que é recomendado por Berglund et al (2000) que afirma que o tempo de reverberação em salas de aula deve ser aproximadamente 0,6 segundos. Para salas com alunos com algum tipo de perda auditiva, é declarado que o valor deve ser preferencialmente menor.

Como pode ser observado, para todas as salas analisadas os tempos de reverberação medidos estavam acima dos valores indicados pela ANSI S12.60 (2010) e por Berglund et al (2000).

Dados os resultados obtidos, é possível constatar que o desconforto acústico sentido, pelo menos em parte, estava relacionado aos altos valores de tempos de reverberação das salas.

#### 4.3 Análise qualitativa das características das salas

Todas as salas possuíam o mesmo tipo de acabamento interno, paredes simples em todos os lados, parede externa composta predominantemente por janelas, porta e janelas superiores na parede do lado do corredor, piso de manta vinílica e teto de concreto aparente. Em relação aos elementos internos, diferenciavam-se apenas quanto ao número de cadeiras. Nenhuma das salas avaliadas possuía qualquer tipo de tratamento acústico. Visto que as salas não possuíam dimensões exageradas e dada a proporção direta entre o volume e o tempo de reverberação, é possível relacionar os resultados de TR medidos a baixa absorção acústica dos materiais que compõe o acabamento interno das salas.

Conforme relatado, o nível de ruído interno das salas era perceptivelmente alto em alguns momentos durante a aula, principalmente nos momentos em que havia muita movimentação nos corredores do prédio. Isso indica uma possível deficiência no isolamento da divisória com o corredor.

Foi verificado que todas as portas das salas analisadas possuíam frestas significativamente grandes na parte superior, com aproximadamente 2 cm de altura. Da mesma forma, acima dessas haviam janelas na parte superior da parede que se estendiam por todo o seu comprimento. Esses dois fatores provavelmente teriam relação com o aumento do nível de ruído durante momentos de grande movimentação nos corredores do prédio. Foi dada ênfase nos dois pontos destacados, visto que, caso fossem consideradas

modificações para melhorar o isolamento, haveria mais facilidade em trocar o material das janelas ou substituir a porta por uma com melhor capacidade isolante e que preenchesse apropriadamente o respectivo vão. Além disso, durante a visita ao prédio, em uma das salas foi encontrada uma janela na parede externa que estava com sua movimentação travada devido a um defeito em seu mecanismo, impedindo o fechamento completo, o que igualmente poderia contribuir para o aumento do nível de ruído nas salas.

#### 4.4 Propostas para o tratamento acústico das salas

##### 4.4.1 Forro acústico

Foi proposta a utilização de um forro acústico para diminuir os tempos de reverberação das salas. O forro escolhido foi o Prisma Decor, da fabricante Isover, pertencente ao grupo Saint-Gobain. A Tabela 3 mostra os valores dos coeficientes de absorção acústica do forro, retirados do catálogo fornecido pelo fabricante, que é mostrado na Figura 2.A.A, no Anexo A.

Tabela 2 – Dados da absorção acústica do Forro Prisma Decor

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Coef. Abs	0,75	0,95	0,85	1,00

Para o cálculo dos tempos de reverberação, são necessários os coeficientes de absorção acústica das superfícies e das cadeiras presentes nas salas. Esses dados e os valores das áreas das superfícies e do número de cadeiras de cada sala são mostrados, respectivamente, na Tabela 1.A e Tabela 2.A, presentes no Apêndice A.

##### 4.4.2 Tempos de reverberação após aplicação do forro acústico

A partir dos dados apresentados nos Apêndice A, foram calculados os tempos de reverberação das salas após a aplicação do forro acústico proposto. O procedimento de cálculo utilizado é exemplificado no Apêndice B. Esse procedimento foi aplicado a todas as salas para as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 3 – Tempos de reverberação (TR) das salas após a utilização do forro acústico

	TR em 250 Hz (s)	TR em 500 Hz (s)	TR em 1000 Hz (s)	TR em 2000 Hz (s)
Sala 21	0,65 s	0,51 s	0,56 s	0,47 s
Sala 22	0,65 s	0,52 s	0,56 s	0,48 s
Sala 53	0,65 s	0,51 s	0,55 s	0,47 s

Os resultados obtidos mostram que a utilização do forro Prisma Decor reduziu significativamente os tempos de reverberação em todas as salas. Apenas os valores de TR em 250 Hz ficaram acima de 0,6 segundos. Apesar disso, os resultados estão de acordo com o que é proposto pela norma ANSI S12.60 (2010), já que o limite de 0,6 segundos estabelecido por ela inclui somente as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz. Portanto, os valores TR resultantes da aplicação do forro Prisma Decor foram considerados

satisfatórios e sua utilização possivelmente resolveria o excesso de reverberação das salas.

#### 4.4.3 Porta Acústica

Conforme relatado, as reclamações referentes ao excesso de ruído indicavam possíveis deficiências de isolamento nas partes das salas que faziam divisa com o corredor. Com isso, para melhorar o isolamento, foi sugerida a instalação de uma porta acústica da empresa Isar. A escolha do modelo foi feita a partir de uma sugestão encontrada no site da Isar, que indica a utilização da porta acústica de madeira modelo ISD35 em escolas. A porta escolhida possui um índice de redução de ruído de 35 dB(a). O gráfico do índice de redução de ruído em função da frequência é mostrado na Figura 1.A.A, no Anexo A. A empresa oferece projetos personalizados, o que possibilitaria solicitar portas que preencham completamente o espaço correspondente, sem deixar frestas.

#### 4.4.4 Substituição dos vidros das janelas

Além da utilização das portas acústicas, seria apropriado substituir o vidro das janelas da parte superior das paredes entre as salas e os corredores. Foi sugerida a troca por vidros de fundição, com espessura de 4 a 6 mm, de duas placas com camada de ar intermediária. Segundo a NBR 12179 (1992) o vidro escolhido possui isolamento acústico de 36 dB para frequências de 500 Hz.

Não foram realizadas medições de ruído das salas, porém, a implementação das mudanças das portas e dos vidros sugeridas, mesmo que não acabasse completamente com o excesso de ruído, certamente reduziria o problema. É importante salientar que, para que se consiga um isolamento adequado, todas as janelas devem estar completamente fechadas.

## 5. CONCLUSÃO

O presente estudo possibilitou a aplicação das orientações da NBR ISO 3382-2 na avaliação dos tempos de reverberação das salas de aula do prédio 11209 da UFRGS para investigar possíveis problemas acústicos sentidos por seus ocupantes. A análise dos dados obtidos através das medições, após comparações feitas com a norma ANSI S12.60 (2010) e com a recomendação proposta por Berglund et al (2000), mostra que os tempos de reverberação das salas eram muito altos. Isso pode ser uma das causas para o desconforto acústico sentido pelos usuários. Como as salas não possuíam dimensões excessivamente grandes, os tempos de reverberação altos foram associados principalmente às características dos materiais de revestimento interno.

Foi proposta a utilização do forro acústico Prisma Decor como tratamento para os excessos de reverberação verificados. Os tempos de reverberação calculados com a implementação do forro proposto foram considerados satisfatórios, já que os valores de TR das salas foram significativamente reduzidos e ficaram abaixo do limite estabelecido pela norma ANSI S12.60 (2010).

Foi feita uma avaliação qualitativa de algumas características das salas levando em consideração as reclamações referentes aos níveis de ruído. Foram destacadas as frestas na parte superior das portas e as janelas na parte superior das paredes que faziam divisa com os corredores como fatores que poderiam estar contribuindo para o problema. Foi proposta a substituição das portas por portas acústicas de madeira, modelo ISD 35,

da empresa Isar. Ademais, foi sugerida a troca do material das janelas por vidros de fundição em duas placas com camada de ar intermediária. Apesar da ausência de dados quantitativos dos níveis de ruído, acredita-se que a implementação das propostas aumentaria o isolamento entre as salas e os corredores, amenizando o incômodo relatado.

Para trabalhos futuros, recomenda-se fazer avaliações quantitativas do excesso de ruído das salas, assim como a análise de possíveis alterações que possam solucionar o problema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 12179 / 1992, Tratamento acústico em recintos fechados**. 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR ISO 3382-2 / 2017, Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns**. 2017.

ANSI – American Standards Institute, **ANSI S 12.60 / 2010, Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools – Part 1: Permanent Schools**. 2010

BERGLUND, B.; LINDVALL, T.; SCHWELA, D. H. New WHO Guidelines for Community Noise. **Noise & Vibration Worldwide**, v. 31, n. 4, p. 24–29, 2000.

Bistafa, S. R., **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 3ª ed. São Paulo – Blucher, 2018

COEFICIENTES DE ABSORÇÃO ACÚSTICA. USP. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2426540>>. Acesso em: nov. de 2020.

CHOI, S. et al. Indoor Environmental Quality of Classrooms and Student Outcomes: A Path Analysis Approach. **Journal of Learning Spaces**, v. 2, n. 2, 2014.

Da Costa, E. C., **Acústica Técnica**. 1ª ed. São Paulo – Blucher, 2003

Do Valle, S., **Manual Prático de Acústica**. 1ª ed. Música e Tecnologia, 2006.

PORTA ACÚSTICA MADEIRA. Isar, 2020. Disponível em: <<https://www.isar.com.br/isolamento-acustico/porta-acustica-madeira>>. Acesso em: nov. de 2020.

PRISMA DECOR – FORROS MODULARES E REMOVÍVEIS. Isover. Disponível em: <<https://www.isover.com.br/construcao-civil/forros-para-teto/prisma-decor-termico-acustico>>. Acesso em: nov. de 2020.

RAEDER, A.; NAKAZATO, M. Study case on the acoustic quality of classrooms in Brazil. **INTER-NOISE 2018 - 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Impact of Noise Control Engineering**, 2018.

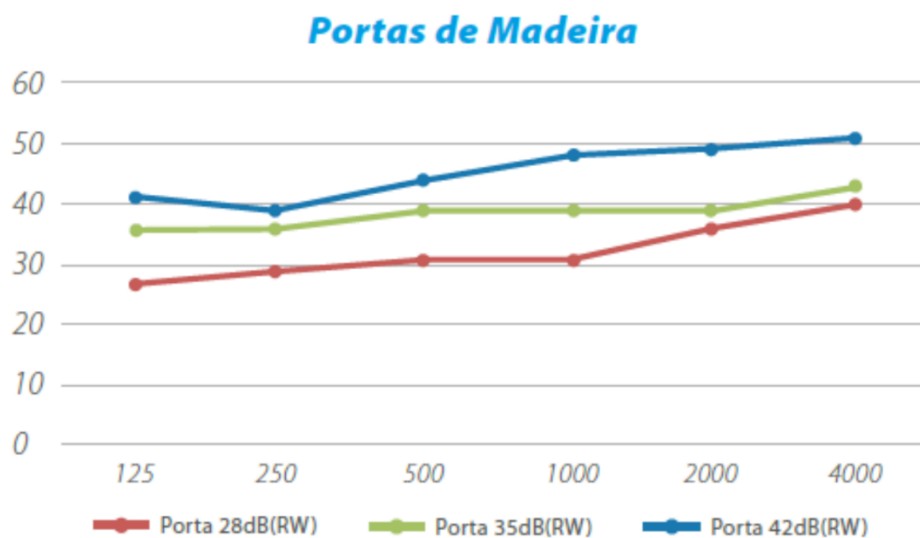
ZANNIN, P. H. T. et al. Comparação entre tempos de reverberação calculados e medidos. **Comparação entre tempos de reverberação calculados e medidos**, v. 5, n. 4, p. 69–79, 2008.

ZANNIN, P. H. T.; ZWIRTES, D. P. Z. Evaluation of the acoustic performance of classrooms in public schools. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 4, p. 626–635, 2009.



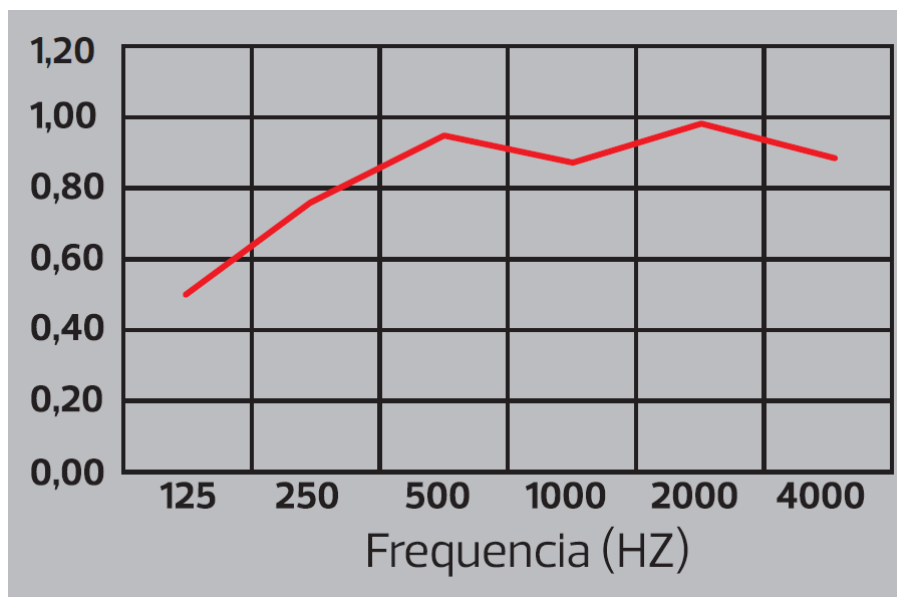
## ANEXO A – DADOS DO ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA DA PORTA DE MADEIRA ISD35 E DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DO FORRO PRISMA DECOR

Figura 1.A.A – Gráfico do índice de redução sonora de portas acústicas de diferentes modelos em função da frequência.



Fonte: <https://www.isar.com.br/isolamento-acustico/porta-acustica-madeira>

Figura 2.A.A – Ensaio de absorção do forro Prisma Decor 15mm.



Fonte: Catálogo Prisma Decor. Disponível em: <<https://www.isover.com.br/construcao-civil/forros-para-teto/prisma-decor-termico-acustico>>

**APÊNDICE A – DADOS UTILIZADOS NOS CÁLCULOS DOS TEMPOS DE REVERBERAÇÃO DAS SALAS**

Tabela 1.A - Coeficientes de absorção das salas

	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Paredes	0,03	0,04	0,04	0,04
Piso	0,03	0,03	0,04	0,04
Janelas	0,04	0,03	0,02	0,02
Porta	0,06	0,085	0,085	0,1
Cadeiras	0,05	0,065	0,065	0,08

Tabela 2.A – Áreas das superfícies e número de cadeiras das salas

	Sala 21	Sala 22	Sala 23
Paredes ( $m^2$ )	87,02	90,98	79,12
Forro ( $m^2$ )	69,05	77,66	48,78
Piso ( $m^2$ )	69,05	77,66	48,78
Janelas ( $m^2$ )	23,85	27,31	10,41
Porta ( $m^2$ )	2,20	2,27	2,20
Cadeiras (unidades)	60	70	40

## APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CÁLCULOS DOS TEMPOS DE REVERBERAÇÃO

Para a determinação dos tempos de reverberação das salas após o tratamento acústico com o forro Prisma Decor, foi utilizado um procedimento de cálculo. Um exemplo desse procedimento é demonstrado no cálculo do tempo de reverberação da sala 21, para a frequência de 500 Hz, após a aplicação do forro acústico proposto. Os coeficientes de absorção sonora das superfícies e das cadeiras presentes na sala, assim como as áreas das superfícies e o número de cadeiras utilizados nos cálculos foram retirados das tabelas apresentadas no Apêndice A.

Inicialmente foi calculado o volume das salas. Como a sala 21 possui uma área de  $69,05 \text{ m}^2$  e pé-direito de  $3,4 \text{ m}$ , o volume,  $V$ , foi calculado como mostrado:

$$V = 69,05 * 3,4 = 234,77 \text{ m}^3 \quad (1)$$

Utilizando os coeficientes de absorção para a frequência de 500 Hz, foi calculado o somatório das absorções sonoras individuais de cada superfície e das cadeiras presentes na sala, calculadas a partir da Equação 1, como demonstrado a seguir:

$$\sum A = [(0,04 * 87,02) + (0,95 * 69,05) + (0,03 * 69,05) + (0,03 * 23,85) + (0,085 * 2,2) + (0,03 * 60)] = 73,85 \text{ m}^2 \text{ (Sabine)} \quad (2)$$

Substituindo os resultados de (1) e (2) na Equação 2, foi calculado o tempo de reverberação da sala 21 para a frequência de 500 Hz,  $T_{(500\text{Hz})}$ , após aplicação do forro acústico sugerido:

$$T_{(500\text{Hz})} = \frac{0,161 * V}{\sum A} = \frac{0,161 * (234,77)}{73,85} = 0,51118 \text{ s} \quad (3)$$

Estas etapas foram realizadas para todas as salas analisadas nas frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz.