



FERNANDA CAETANO DE PAULA

**CONDICIONAMENTO ACÚSTICO EM ESTÚDIOS DE
GRAVAÇÃO: AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DA EFICÁCIA
DE DIFERENTES MATERIAIS**

**LAVRAS - MG
2021**

FERNANDA CAETANO DE PAULA

**CONDICIONAMENTO ACÚSTICO EM ESTÚDIOS DE
GRAVAÇÃO: AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DA EFICÁCIA
DE DIFERENTES MATERIAIS**

Monografia apresentada à Universidade
Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Civil,
para a obtenção do título de Bacharel.

Prof (a). Dr (a). Priscilla Abreu Pereira Ribeiro
Orientadora

**LAVRAS - MG
2021**

FERNANDA CAETANO DE PAULA

**CONDICIONAMENTO ACÚSTICO EM ESTÚDIOS DE
GRAVAÇÃO: AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DA EFICÁCIA
DE DIFERENTES MATERIAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 21 de maio de 2021
Prof (a). Dr (a). Priscilla Abreu Pereira Ribeiro UFLA
Prof. Dr. Lucas Henrique Pedrozo Abreu UFLA
Prof. Me. Giovani Salomão Teixeira UFLA



Prof (a). Dr (a). Priscilla Abreu Pereira Ribeiro
Orientadora

**LAVRAS – MG
2021**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, por todo o apoio e luta durante todos os anos de graduação. Aos meus pais, Fernando e Karla, por darem tudo de si para que eu pudesse ter uma educação superior, ao meu irmão, Caio, por me ajudar a manter a calma em momentos difíceis, ao meu tio João e a minha madrinha Vera, por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem. Aos meus amigos, agradeço por tornarem essa caminhada mais leve e memorável.

Também, agradeço à Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia pelas oportunidades acadêmicas, e a minha orientadora, Priscilla Abreu Pereira Ribeiro, pela ajuda e orientação na realização deste trabalho.

RESUMO

Em estúdios de gravação, o condicionamento acústico é imprescindível para que se obtenha uma acústica adequada e, assim, gravações de qualidade. Neste trabalho, buscou-se analisar o comportamento da espuma de poliuretano, da lã de rocha e da lã de PET ao tratamento acústico nestes ambientes, e verificar qual dos materiais é o mais eficaz nas condições propostas. Frente a isso, utilizou-se a equação de Sabine para o cálculo dos tempos de reverberação em diferentes testes, e os valores encontrados foram comparados aos tempos ótimos de reverberação estabelecidos pela norma brasileira. O material cujo comportamento mais aproximou-se do ideal foi a espuma de poliuretano, porém a lã de rocha teve resultados bastante parecidos e pôde ser considerada como adequada para fins acústicos. Por outro lado, foi necessário empregar-se maior quantidade de lã de PET, para que ela obtivesse resultados satisfatórios. Em todos os testes, o desempenho nas frequências graves foi insatisfatório, devido às limitações destes materiais. Assim, concluiu-se que a espuma de poliuretano tem a maior eficácia, entretanto, sua utilização, bem como o uso das lãs, deve estar associada à implementação de *bass traps*, de forma a gerar um condicionamento acústico mais eficaz.

Palavras-chave: Espuma de poliuretano. Lã de rocha. Lã de PET. Condicionamento acústico. Tempo de reverberação.

ABSTRACT

In recording studios, acoustic conditioning is essential for obtaining adequate acoustics and, thus, quality recordings. This study sought to analyze the behavior of polyurethane foam, rockwool and PET wool towards the acoustic treatment in these environments and to verify which of these materials is the most effective under the proposed conditions. Therefore, the Sabine equation was used to calculate the reverberation times in different tests and the values found were compared to the optimum reverberation times established by the Brazilian norm. The material, whose behavior was closest to the ideal was polyurethane foam, however rockwool had very similar results and was considered to be suitable for acoustic purposes. On another hand, it was necessary to use more PET wool, so that its results were satisfactory. The performance at low frequencies was unsatisfactory in every test, due to the limitations of these materials. Thus, it was concluded that the polyurethane foam has the greatest effectiveness, however, its use, as well as the wools's, must be associated with the implementation of bass traps, in order to generate a more effective acoustic conditioning.

Keywords: Polyurethane foam. Rockwool. PET wool. Acoustic conditioning. Reverberation time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da absorção em função da frequência de um material absorvente com diferentes graus de porosidade.....	16
Figura 2 - Representação do som direto e primeiras reflexões.....	19
Figura 3 - Ecograma, som direto e reflexões.....	19
Figura 4 - Armadilhas de graves.....	22
Figura 5 - Modos acústicos por banda de frequência.....	25
Figura 6 - Planta baixa da sala de gravação sem materiais variáveis.....	26
Figura 7 - Cortes AA e BB da sala de gravação sem materiais variáveis.....	27
Figura 8 - Cortes CC e DD da sala de gravação sem materiais variáveis.....	28
Figura 9 - Disposição das placas de espuma de poliuretano.....	29
Figura 10 - Cortes CC e DD da sala de gravação com placas de espuma de poliuretano.....	29
Figura 11 - Disposição das placas de lã de rocha e de lã de PET.....	30
Figura 12 - Cortes CC e DD da sala de gravação com placas de lã de rocha ou lã de PET.....	30
Figura 13 - Tempo ótimo de reverberação a 500 Hz, em diferentes ambientes.....	33
Figura 14 - Tempo ótimo de reverberação a 500 Hz para estúdio de rádio para música de até 90 m ³	35
Figura 15 - TR x TRo - Sem materiais variáveis.....	36
Figura 16 - TR x TRo - Espuma de poliuretano.....	37
Figura 17 - Coeficientes de absorção para espuma de poliuretano D30 E30.....	38
Figura 18 - TR x TRo - Lã de rocha.....	38
Figura 19 - Coeficientes de absorção da lã de rocha de 64 kg/m ³	39
Figura 20 - TR x TRo - Lã de PET.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de absorção acústica dos materiais invariáveis em diferentes frequências.	27
Tabela 2 - Coeficientes de absorção acústica dos materiais variáveis em diferentes frequências.	28
Tabela 3 - Coeficientes médios de absorção a 500 Hz.	34
Tabela 4 - Fatores de correção para diferentes frequências.	35
Tabela 5 - Tempos de reverberação nas situações de teste e tempos de reverberação ótimos.	35
Tabela 6 - Cálculo do coeficiente médio de absorção a 500 Hz sem uso de materiais variáveis.	46
Tabela 7 - Cálculo do coeficiente médio de absorção a 500 Hz, usando espuma de poliuretano.	46
Tabela 8 - Cálculo do coeficiente médio de absorção a 500 Hz, usando lã de rocha.	47
Tabela 9 - Cálculo do coeficiente médio de absorção a 500 Hz, usando lã de PET.	47
Tabela 10 - Informações sobre materiais utilizados no primeiro caso, sem uso de materiais variáveis.	48
Tabela 11 - Tempo de reverberação para seis diferentes frequências sem uso de materiais variáveis.	48
Tabela 12 - Informações sobre materiais utilizados no segundo caso, com espuma de poliuretano.	49
Tabela 13 - Tempo de reverberação para seis diferentes frequências no segundo caso, com espuma de poliuretano.	49
Tabela 14 - Informações sobre materiais utilizados no terceiro caso, com lã de rocha.	50
Tabela 15 - Tempo de reverberação para seis diferentes frequências no terceiro caso, com lã de rocha.	50
Tabela 16 - Informações sobre materiais utilizados no quarto caso, com lã de PET.	51
Tabela 17 - Tempo de reverberação para seis diferentes frequências no quarto caso, com lã de PET.	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	12
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1	Terminologia	13
3.1.1	Som.....	13
3.1.2	Ruído	13
3.1.3	Tempo de Reverberação.....	14
3.1.4	Tempo Ótimo de Reverberação	14
3.1.5	Coefficiente de absorção sonora.....	15
3.2	Tratamento acústico	16
3.2.1	Condicionamento acústico.....	16
3.2.2	Isolamento acústico	18
3.3	Estudo geométrico-acústico.....	18
3.3.1	Materiais de absorção sonora	20
3.3.1.1	Características da espuma de poliuretano.....	20
3.3.1.2	Características da lã de rocha.....	21
3.3.1.3	Características da lã de PET.....	21
3.3.1.4	Armadilhas de graves.....	21
3.3.2	Modos da sala e Critérios de Bonello	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Dimensões	24
4.2	Materiais invariáveis	26
4.3	Materiais variáveis.....	28
4.4	Cálculo do coeficiente médio de absorção (α_m)	31
4.5	Cálculo do Tempo de Reverberação (TR)	31
4.6	Comparação entre TR e TRo e aceitação	32

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1	Coefficientes médios de absorção (α_m)	34
5.2	Tempo Ótimo de Reverberação e fatores de correção	34
5.3	Tempos de Reverberação	35
5.4	Aceitação	40
5.5	Determinação do material mais eficaz	41
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICE A - Cálculo dos coeficientes médios de absorção a 500Hz	46
	APÊNDICE B – Cálculo dos tempos de reverberação	48

1 INTRODUÇÃO

A construção civil está em constante evolução, buscando formas de proporcionar melhor desempenho e mais conforto às diversas edificações e apresentar soluções a problemas existentes. Segundo a *World Health Organization* (2003, citado por LACERDA et al., 2005), a poluição sonora é o terceiro maior problema ambiental, sendo antecedida apenas pela poluição da água e do ar, e assim, constitui um dos maiores desafios da atualidade.

Em grandes centros urbanos, os níveis de ruído encontram-se acima do que as normas brasileiras sugerem e como consequência, é possível observar uma série de danos à saúde, como insônia, estresse e disfunções cardiovasculares. Devido à forma como a qualidade de vida da população é afetada, a busca por conforto acústico é uma das principais exigências atuais.

O isolamento e o condicionamento são formas de tratamentos acústicos e vêm sendo apontados como saída para esta problemática, seja em ambientes residenciais, industriais ou de entretenimento, como teatros e cinemas.

Em estúdios de gravação, por exemplo, condições que permitam boa qualidade do som são indispensáveis. O condicionamento acústico busca meios de garantir tais resultados de forma econômica e eficiente, ao trabalhar materiais de absorção sonora.

Atualmente, alguns dos materiais mais utilizados para este fim são a espuma de poliuretano, a lã de rocha e a lã de PET, que se diferenciam por sua origem, preços, formas sob as quais estão disponíveis no mercado e, principalmente, eficácia.

Frente a isso, o presente trabalho busca analisar qual produto é o mais eficaz, por comparação entre o tempo de reverberação de cada um deles, calculado por meio de equações, com aquele que é previsto pela norma brasileira. Para tanto, será estudada uma sala fictícia com dimensões adequadas, na qual alguns dos materiais, que farão parte de suas superfícies, serão testados.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a eficácia da espuma de poliuretano, da lã de rocha e da lã de PET ao condicionamento acústico, em estúdios de gravação, e fazer uma comparação para verificar qual material é mais eficaz para a situação proposta.

Os objetivos específicos para cada etapa são:

- Conceituar e diferenciar tratamento, condicionamento e isolamento acústico;
- Apresentar as características da espuma de poliuretano, da lã de PET e da lã de rocha;
- Determinar dimensões ideais para uma sala de gravação, segundo os Critérios de Bonello;
- Determinar os materiais das superfícies da sala que serão invariáveis e suas áreas, bem como número de pessoas e instrumentos que estarão presentes no ambiente;
- Determinar as áreas dos materiais que serão variáveis (espuma de poliuretano, lã de PET e lã de rocha);
- Realizar o cálculo dos tempos de reverberação, por meio das equações de Sabine e Eyring para seis bandas de frequência (125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz), alternando o uso dos materiais variáveis;
- Comparar o tempo de reverberação de cada material a 500 Hz com o tempo ótimo de reverberação para estúdios de gravação, conforme a norma brasileira NBR 12179 (ABNT, 1992).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Terminologia

Neste item, serão apresentadas algumas terminologias fundamentais à compreensão do presente trabalho.

3.1.1 Som

Segundo a NBR 12179 (ABNT, 1992), o som pode ser definido como uma vibração ou onda mecânica propagada através de um meio, com forças internas, e capaz de gerar sensação auditiva ao ouvido humano.

Para que essa onda seja produzida, é necessário que uma superfície receba um estímulo mecânico, saia do repouso e vibre, tornando-se uma fonte sonora. Por meio do ar, a vibração é transmitida sob a forma de ondas esféricas e uma pequena variação periódica da pressão atmosférica é gerada. Assim, ocorre a propagação do som, que é influenciada por características como frequência, velocidade e comprimento de onda (SIMÕES, 2011).

3.1.2 Ruído

O ruído é um conjunto de sons com frequências aleatórias, cuja diferença entre si possui valores imperceptíveis ao homem, sendo não harmonioso e indesejável, conforme afirma a NBR 12179 (ABNT, 1992). É dividido em dois tipos: ruído aéreo, que se propaga pelo ar, e ruído estrutural, propagado pela estrutura de edificações (SIMÕES, 2011).

Ele pode ser ainda classificado como ruído ambiente ou ruído de fundo. A primeira classificação refere-se aos sons provenientes de um conjunto de fontes sonoras em diversas direções, próximas ou distantes, incluindo as fontes de interesse em um ambiente. Já a segunda envolve o ruído de todas as fontes sonoras que não são interessantes, em determinado recinto (HARRIS, 1998).

As fontes desses ruídos podem ser internas ou externas. Internamente, as principais causas são conversação, instalações elétricas e hidráulicas, passos e instrumentos musicais. Externamente, algumas fontes são o tráfego rodado e aéreo, animais, trens e serviços. Como consequência, distúrbios do sono, comportamentais, neurológicos, cardiovasculares, circulatórios e outros são observados (MEDEIROS, 1999).

Em estúdios de gravação, estes sons não harmoniosos também são indesejáveis, uma vez que geram interferência nas gravações e comprometem sua qualidade (RODRIGUES,

2010). Como solução a isso, tratamentos acústicos, como condicionamento e isolamento, são apresentados, de forma a reduzir o impacto causado por ruídos (SIMÕES, 2011).

3.1.3 Tempo de reverberação

Entende-se como tempo de reverberação (TR) o tempo, em segundos, para que, tendo sido extinta a fonte sonora, um som deixe de ser ouvido. Pode ainda ser definido como o tempo para que haja um declínio de 60 dB na intensidade do som, conforme afirma a NBR 12179 (ABNT, 1992).

É um indicador do comportamento acústico de um ambiente, uma vez que a reverberação é o resultado da falta de absorção sonora no local. Assim, seu valor depende dos coeficientes de absorção sonora dos materiais em suas superfícies e dos equipamentos presentes nele, das áreas (m²) dos elementos citados e do volume do recinto (m³) (SIMÕES, 2011; GONÇALVES, 2008).

O tempo de reverberação é considerado uma das características acústicas mais importantes, uma vez que interfere inversamente sobre a inteligibilidade das palavras, clareza e qualidade musical, ou seja, quanto maior o seu valor, menores são tais características. Aspectos como, vivacidade, envolvimento, qualidade do timbre, equilíbrio tímbrico, e outros são também influenciados por tal parâmetro (RODRIGUES, 2010; PERLES; BERTOLI, 2008).

Além disso, quando uma elevada reverberação, ligada ao excesso de TR, é associada a altos níveis de ruído, a compreensão das palavras é também prejudicada, como demonstrado por Golçalves, Silva, e Coutinho (2009) em seu estudo sobre a influência do ruído na inteligibilidade da fala de professores.

Assim, para o estudo do condicionamento acústico, o tempo de reverberação é calculado em seis bandas de frequência: 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz, estabelecidas por norma internacional (ISO 3382-1:2009, 2009), uma vez que a absorção sonora varia conforme a frequência (SIMÕES, 2011).

3.1.4 Tempo ótimo de reverberação

O tempo de reverberação considerado ideal não consiste em um número fixo. Ele é dado em função da finalidade e do volume de um ambiente (LONG, 2006). Surge, então, o conceito de tempo ótimo de reverberação.

Segundo a NBR 12179 (ABNT, 1992), ele é um valor considerado ótimo de acordo com os aspectos citados, sendo dado em segundos e encontrado por meio de tabelas, que associam tais parâmetros. A mais aceita é aquela encontrada na NBR 12179 (ABNT, 1992), que determina os tempos ótimos de reverberação a 500 Hz.

Para fins de análise, podem, também, ser observados tempos ótimos de reverberação em outras frequências. Estes são encontrados por meio da curva de correção dos tempos de reverberação, que estabelece um fator de correção entre o tempo ideal em diversas frequências e a 500 Hz (MARCO, 1982).

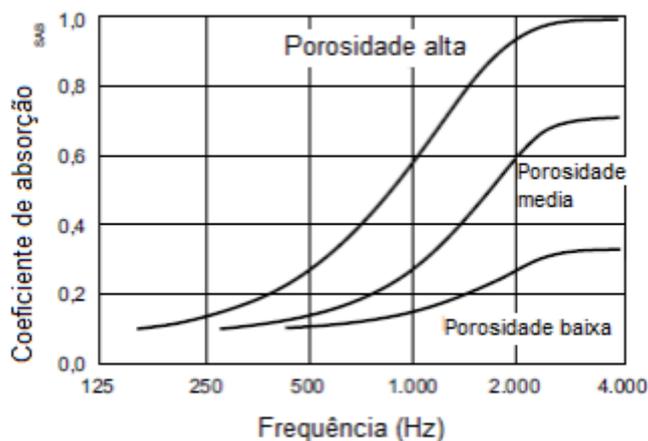
A distinção das finalidades dos recintos é feita, visto que diferentes tempos de reverberação provocam efeitos diversos, cuja necessidade é determinada pelo uso ao qual o local é destinado (SIMÕES, 2011; RODRIGUES, 2010).

3.1.5 Coeficiente de absorção sonora

Coeficiente de absorção sonora (α) é a proporção da energia sonora dissipada por materiais absorventes (BORGES; RODRIGUES, 2017). Varia de 0,00 a 1,00, sendo que coeficientes iguais a zero indicam absorção de 0% da energia do raio sonoro e devolução de 100% para o ambiente e coeficientes iguais a 1,00 correspondem a uma absorção de 100% da energia do raio sonoro e devolução de 0% para o ambiente. Isso ocorre com janelas abertas (SIMÕES, 2011).

Varia conforme as características de um material, como porosidade, rigidez e sua forma de instalação. A frequência do som é também um fator de influência, sendo que as mais altas sofrem maior absorção em materiais mais porosos, enquanto as médias e baixas têm sua absorção influenciada pela espessura do material (SIMÕES, 2011), como é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Variação da absorção em função da frequência de um material absorvente com diferentes graus de porosidade.



Fonte: ISBERT (1998).

3.2 Tratamento acústico

Segundo a NBR 12179 (ABNT, 1992), o tratamento acústico consiste em um processo no qual, conforme a finalidade de um ambiente, buscam-se condições para que as pessoas nele presentes possam ter uma audição de qualidade. Este envolve tanto o isolamento, como o condicionamento acústico.

Pode ser aplicado em diversos ambientes como auditórios, teatros, salas de aula, estúdios de gravação e outros. Para cada tipo de recinto, busca-se uma finalidade acústica diferente. Em salas de teatro, por exemplo, a inteligibilidade das palavras pronunciadas por um orador é indispensável. Assim, os projetos acústicos devem ser executados de forma específica, conforme o objetivo ao qual destinam-se (SIMÕES, 2011).

Além disso, o conforto acústico, proporcionado por esse tipo de tratamento, é cada vez mais demandado em edificações voltadas para moradia. Isto porque a poluição sonora é considerada a terceira maior poluição ambiental, em grandes centros urbanos, e tem uma série de consequências indesejáveis à saúde humana (SIMÕES, 2011; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2003 citado por LACERDA et al., p. 85, 2005).

3.2.1 Condicionamento acústico

O condicionamento acústico trata-se de um método, cujo objetivo é garantir o tempo de reverberação ótimo em um espaço fechado e uma adequada distribuição do som, de acordo com a NBR 12179 (ABNT, 1992). Assim, devem ser consideradas algumas características das

matérias primas a serem empregadas, devido ao comportamento das ondas sonoras (SIMÕES, 2011).

Ao entrar em contato com as superfícies de um recinto, a energia incidente faz com que as mesmas vibrem e, assim, parte da energia seja absorvida e dissipada como calor, parte seja refletida para o ambiente e ainda outra parte seja transmitida para o outro lado, propagando-se por meio do ar (SIMÕES, 2011).

Associada à fração que sofre reflexão, encontra-se a reverberação. Esta ocorre quando, o som que é refletido retorna a sua fonte em menos de 0,1 segundo, considerando-se a velocidade de propagação do som no ar como 343 m/s. Um reforço do efeito sonoro é, então, percebido (BORGES; RODRIGUES, 2017).

Entretanto, em salas de gravação, este reforço é desejado somente até certo nível, uma vez que seu excesso dificulta a inteligibilidade, havendo má compreensão das notas e da fala e perdendo-se informações (LONG, 2006).

Para evitar que isso ocorra, utilizam-se materiais absorventes, porosos e elásticos (SIMÕES, 2011). Isto porque, neles, a incidência do som ocasiona vibração do ar nos poros e, assim, energia é dissipada sob a forma de calor de forma mais acentuada por meio da interação das duas fases desses materiais: sólida (estrutura) e fluida (fluido presente no interior dos poros) (BORGES; RODRIGUES, 2017; FAHY, 2000).

Essa dissipação pode ser viscosa (associada às camadas de contorno viscosas provenientes do cisalhamento do fluido, nas regiões próximas à superfície do material), térmica (decorrente das camadas de contorno térmicas, geradas por fluxos de calor irreversíveis entre fluido e sólido) ou ainda estrutural (relacionada ao movimento da estrutura do material, que gera dissipações mecânicas irreversíveis) (FAHY, 2000).

Tal processo permite que a porção de energia incidente que é refletida diminua e a porção absorvida e dissipada aumente. Assim, o condicionamento está relacionado ao fenômeno da absorção e nele, fonte e receptor encontram-se no mesmo ambiente. (SIMÕES, 2011)

3.2.2 Isolamento acústico

O isolamento acústico, de acordo com a NBR 12179 (ABNT, 1992), trata-se de uma das formas de tratamento acústico e tem como objetivo bloquear a entrada e saída de sons e ruídos de um local fechado.

Requer materiais com elevada massa, como o concreto. Isto porque, como parte da energia advinda do som é transmitida ao outro lado da parede, é necessário que ela seja dissipada por materiais que não vibrem juntamente à onda sonora, segundo a Lei de Massa. Nela, o isolamento passa por acréscimo de 4 a 5 dB, quando a massa de uma parede é duplicada (SIMÕES, 2011).

Outra solução é a adição de uma parede dupla com uma câmara de ar em seu interior segundo a Lei de Massa-Mola-Massa. Nestes casos, recomenda-se que a cavidade seja preenchida por matérias com propriedades de absorção acústica, eliminando ressonâncias, além de se adotar espessuras e materiais diferentes para as paredes, a fim de que elas não sejam excitadas de forma simultânea (SIMÕES, 2011).

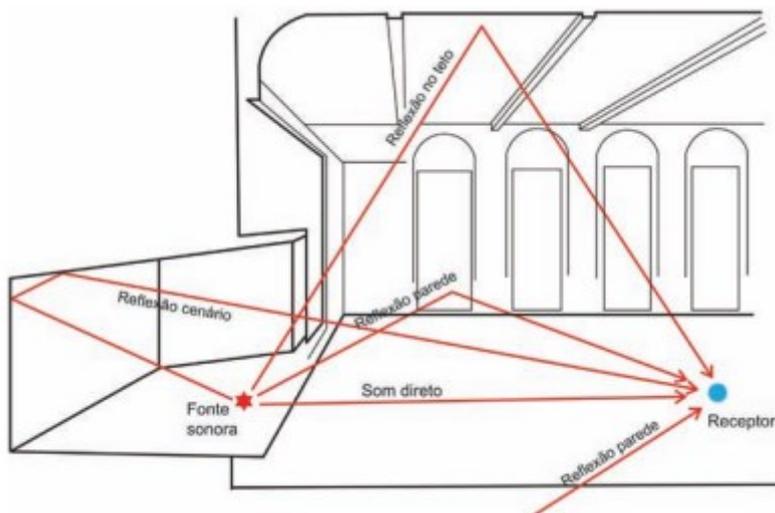
O isolamento relaciona-se com o fenômeno de transmissão e nele, fonte e receptor encontram-se em ambientes diferentes (SIMÕES, 2011).

3.3 Estudo geométrico-acústico

Na concepção de ambientes em que a acústica é indispensável, deve ser feito o estudo geométrico-acústico. Ele envolve a análise das plantas, cortes e materiais, que compõem o recinto, verificando a distribuição de sons diretos e refletidos e garantindo boa audibilidade, como afirma a NBR 12179 (ABNT, 1992).

Definindo-se a localização da fonte e do receptor, é possível observar o percurso feito pelos raios sonoros e onde refletem, como é mostrado na Figura 2. Detecta-se, então, a possibilidade de eco (grande problema à inteligibilidade) e locam-se os materiais acústicos de forma mais adequada por meio de ecogramas, que indicam o tempo e a intensidade de cada raio refletido quanto ao raio direto (SIMÕES, 2011).

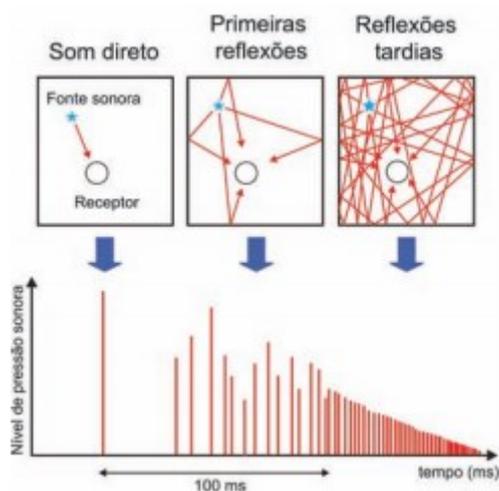
Figura 2 - Representação do som direto e primeiras reflexões.



Fonte: SIMÕES (2011).

Um ecograma consiste em um tipo de gráfico, no qual cada raio sonoro é representado por uma barra vertical e seus eixos representam o tempo (eixo horizontal) e a intensidade (eixo vertical). Um exemplo de ecograma, associado a um receptor com indicação do som direto, das primeiras reflexões e das reflexões tardias ou atrasadas é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Ecograma, som direto e reflexões.



Fonte: SIMÕES (2011).

Se por um lado o eco é algo indesejável, por outro, as reflexões curtas, que chegam à orelha dentro do intervalo de 50 milissegundos, são necessárias a uma maior inteligibilidade das palavras e devem ser buscadas em um projeto arquitetônico, sendo as reflexões laterais as mais adequadas (SIMÕES, 2011).

3.3.1 Materiais de absorção sonora

Materiais de absorção sonora são materiais porosos que absorvem energia sonora, convertendo-a em calor por meio de movimentos de propagação em seu interior e podem ser dos tipos celular, fibroso ou granular (MAREZE, 2013).

Os materiais de estrutura celular envolvem materiais poliméricos e metálicos, sendo os últimos muito aplicados na engenharia, por serem absorventes com alta rigidez, boa capacidade de absorção de energia de impacto e elevada resistência térmica. Os materiais fibrosos encontram-se em forma de placas e elementos pré-fabricados, como fibras minerais, de vidro e orgânicas, lãs têxteis e feltros, sendo mais utilizados em filtros acústicos automotivos e em dutos de ventilação, por apresentarem menor resistência mecânica. Já os materiais granulares têm aplicações residenciais e industriais, por possuírem uma boa resistência mecânica e baixo custo de fabricação, como grãos de plástico e cerâmicas (MAREZE, 2013; COX; D'ANTONIO, 2009; FAHY, 2000).

Atualmente, alguns dos materiais utilizados, no tratamento acústico de edifícios, são lã de vidro, lã de rocha, espuma de melamina e de poliuretano (SIMÕES, 2011).

3.3.1.1 Características da espuma de poliuretano

A espuma de poliuretano provém do material que a intitula, o poliuretano, um polímero formado pela poliadição de um isocianato (di ou polifuncional), um polioli e outros reagentes, como agentes de cura ou extensores de cadeia. Possui como propriedades a resistência à abrasão, tenacidade, resiliência, alta resistência a corte e rasgo e alta capacidade de carga. Além disso, é de bom custo benefício, devido a seu alto desempenho (PLASTIPRENE, 2020).

Outros aspectos importantes são seu menor peso, resistência à corrosão e a óleo, memória elastomérica, grande variedade de durezas, segurança contra incêndios (tratada com retardante a chama), não ser um produto quebradiço, não marcar e não manchar e ser protegida contra mofo, fungos e bactérias. Entretanto, a espuma não deve ser submetida a ambientes que sejam úmidos ou químicos e a elevadas temperaturas (PLASTIPRENE, 2020).

Destina-se ao tratamento acústico em ambientes, como salas de som e de treinamento, escritórios e auditórios, podendo ser obtida como placas, cujas espessuras e dimensões variam (VIBRASOM, 2020).

3.3.1.2 Características da lã de rocha

A lã de rocha consiste em um material altamente fibroso, com propriedades de absorção acústica e resistência térmica, composto por fibras, originadas do basalto aglomerado com resina sintética, sendo marcada por sua leveza e por ser relativamente flexível. Entre várias de suas características, a lã é incomburente (ISO 1182: incombustível; ASTM E 84 / UL 723: *Flame 0* e *Smoke 0*), com favorável custo benefício, pH neutro, anti-parasita, não corrosiva, imputrescível, não poluente, não cancerígena e não nociva à saúde. No entanto, seu manuseio deve ser feito com adequado vestuário e luvas (CATAI; PENTEADO; DALBELLO, 2006; ROCKFIBRAS, 2020; VIBRASOM, 2020).

Na indústria e na construção civil, destina-se ao tratamento termo-acústico, sendo aplicada em revestimentos de forros e coberturas, miolos de divisórias e alvenaria, dutos de ar condicionados e tubulações com temperaturas que variam de 50°C a 750°C, entre outras (CATAI; PENTEADO; DALBELLO, 2006; ROCKFIBRAS, 2020).

Este produto pode ser encontrado no mercado sob diversas formas e densidades, sendo uma delas os painéis PSE-64 (painéis de lã de rocha com densidade de 64 kg/m³). Possui um melhor desempenho a temperaturas máximas entre 250 e 300°C. Além disso, apresenta como vantagem o fato de poder ser disposto de formas diversas e fixado com pinos, grampos ou adesivos especiais (ROCKFIBRAS, 2020).

Suas propriedades consistem em absorção de ruídos, baixa condutividade térmica, resiliência, resistência à água (por meio de aditivos) e inércia química (ROCKFIBRAS, 2020).

3.3.1.3 Características da lã de PET

A lã de PET é produzida a partir da reciclagem de garrafas PET (polietileno tereftalato) e embalagens plásticas, sendo um material reciclado e reciclável. Isto lhe confere o diferencial de ser uma opção ecologicamente correta, podendo ser utilizada em projetos de edificações sustentáveis, conforme os critérios de certificação ambiental LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) (VIBRASOM, 2020; ARANHA, 2019).

Possui propriedades termo-acústicas (como elevada absorção acústica e ótimo isolamento térmico), não sofre adição de resinas ou aglomerantes, suporta temperaturas até 80°C, possui segurança ao fogo (atende à IT-10 do Corpo de Bombeiros do Estado de SP na classificação II-A), apresenta alta capacidade de compactação e resiliência, é um produto atóxico, antialérgico e sem riscos à saúde, não sendo necessário o uso de EPIs específicos, é

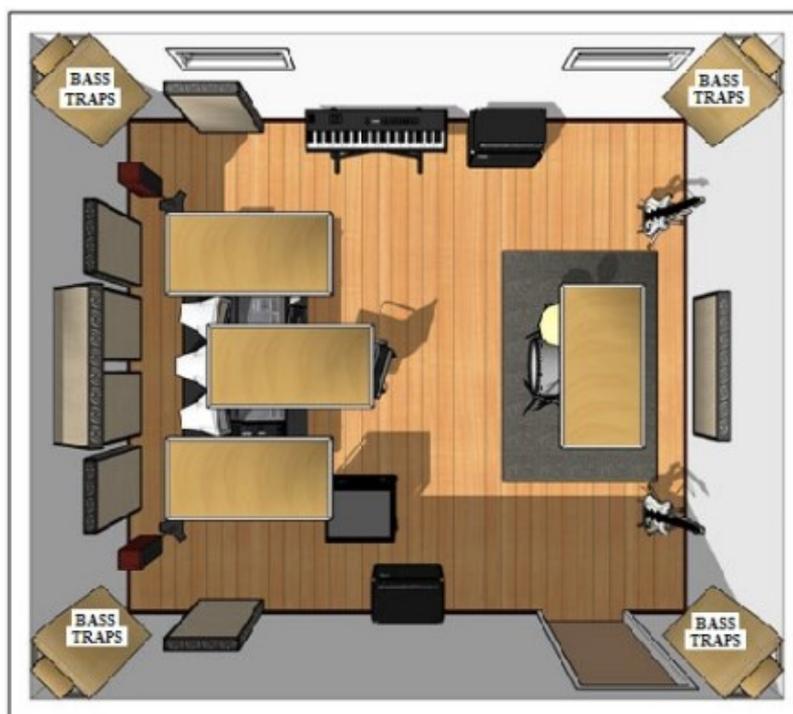
anti-fungos e anti-micro-organismos, é resistente à umidade e não sofre deformação ou deterioração ao longo do tempo. Ademais, apresenta densidade menor que a lã de rocha, sendo mais leve (VIBRASOM, 2020; ARANHA, 2019).

Assim como os demais materiais, encontra-se disponível no mercado em diversas formas, dimensões e densidades diferentes, sendo de fácil e rápida instalação.

3.3.1.4 Armadilhas de graves

Armadilhas de graves, ou *bass traps*, são equipamentos voltados para condicionamento acústico e que permitem a absorção sonora em frequências mais graves, atenuando-as. Assim, obtém-se um maior equilíbrio tímbrico (RODRIGUES, 2010). Um exemplo de armadilha de grave e como ela é empregada encontra-se na Figura 4.

Figura 4 - Armadilhas de graves.



Fonte: RODRIGUES (2010).

3.3.2 Modos da sala e Critérios de Bonello

Em um recinto fechado e pequeno, uma onda sonora é considerada grande se comparada às dimensões deste local, sendo possível que o comprimento de onda para baixas frequências (abaixo de 300 Hz) torne-se um múltiplo da altura, largura ou comprimento. Além disso, devido ao processo de reflexão em diversas direções, que a onda incidente sofre, podem ser formadas

zonas de soma e cancelamento em cada faixa de frequência, uma problemática a salas de gravação (VALLE, 2009).

Cada ponto da sala tem um comportamento em relação a isso, que é chamado de modos acústicos da sala, podendo ser axiais (quando ocorrem entre duas paredes paralelas da sala), tangenciais (quando há reflexão entre três ou mais paredes) ou oblíquos (quando compreendido entre todas as dimensões) (VALLE, 2009; EVEREST, 2001).

Para solucionar este problema e se obter uma acústica equilibrada, devem ser satisfeitos os Critérios de Bonello, que determinam a relação entre os modos da sala. O primeiro deles afirma que, com o aumento da frequência, o número de modos por banda deve aumentar e, na pior das hipóteses, pode haver constância nesse valor. No entanto, não deve ocorrer diminuição. De acordo com o segundo critério, em caso de existirem dois modos coincidentes para uma mesma banda, no mínimo mais três modos, nesta faixa de frequência, não devem coincidir. Por fim, são inaceitáveis três ou mais modos coincidentes em uma mesma banda (VALLE, 2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar qual material entre a espuma de poliuretano, a lã de rocha e a lã de PET é o mais eficaz ao condicionamento acústico em um estúdio de gravação, é necessário realizar o cálculo do tempo de reverberação, ao usar cada um deles intercaladamente.

Para tanto, podem ser utilizados *softwares* diversos ou ser feitos cálculos por meio das equações de Sabine e de Eyring. Como a geometria da sala é relativamente simples, não será necessário o uso de programas computacionais e, assim, as equações serão empregadas.

Além disso, nas superfícies não ocupadas pelos objetos de teste, outros materiais serão usados de forma invariável em todos os três casos.

4.1 Dimensões

Para determinar as dimensões necessárias a uma boa qualidade acústica em um ambiente, é feito o cálculo dos modos acústicos da sala até 300 Hz (VALLE, 2009), por meio da Equação 1 (JONES, 2002), a seguir:

$$f_{\text{modos}} = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{m}{x} \right)^2 + \left(\frac{n}{y} \right)^2 + \left(\frac{p}{z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Sendo:

c = velocidade do som no ar (m/s);

m, n, p = inteiros não negativos (0, 1, 2, 3 ...), representando os parciais harmônicos dos modos em que as vibrações axial, tangencial e oblíqua ocorrem, respectivamente;

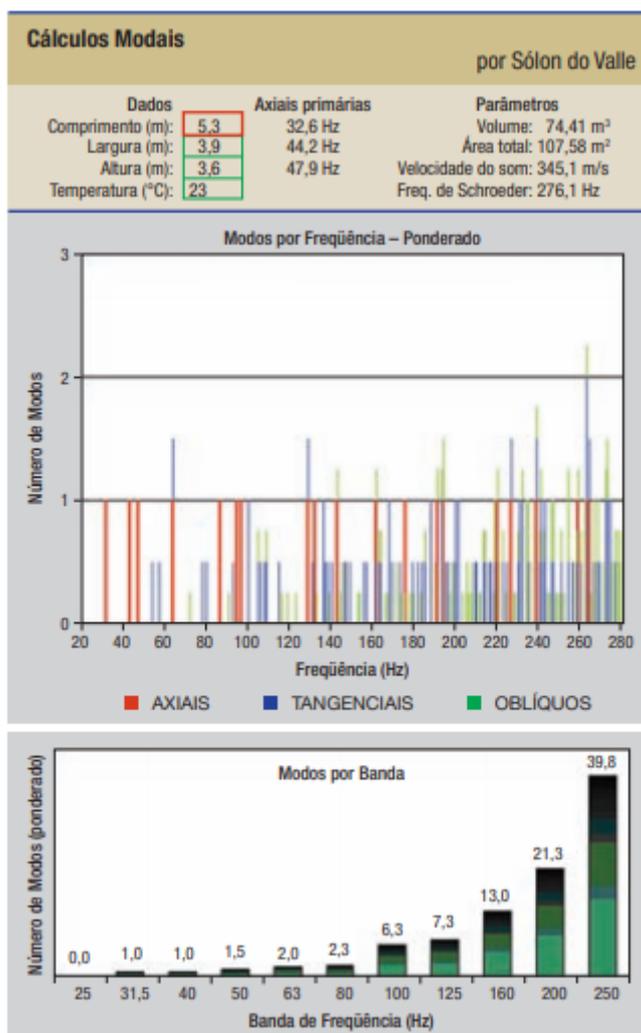
x, y, z = dimensões da sala (m).

As frequências, então, são dispostas em ordem crescente, em lista ou gráfico, indicando a posição dos modos e possíveis coincidências entre eles, ou seja, uma diferença inferior a 1 Hz (JONES, 2002). Por fim, é construído um gráfico do número de modos por banda de frequência, para que se analisem os Critérios de Bonello (VALLE, 2009).

Neste trabalho, entretanto, serão utilizadas as dimensões estudadas e concluídas como adequadas por Oliveira Filho e Zannin (2012) ao avaliar ambientes ideais para gravação musical. O volume da sala de gravação será de 74,41 m³ e ela contará com 5,3 m de comprimento, 3,9 m de largura e 3,6 m de altura. A área total das superfícies será de 107,58 m².

Na Figura 5, são apresentados os modos acústicos por banda de frequência, para as dimensões adotadas.

Figura 5 - Modos acústicos por banda de frequência.

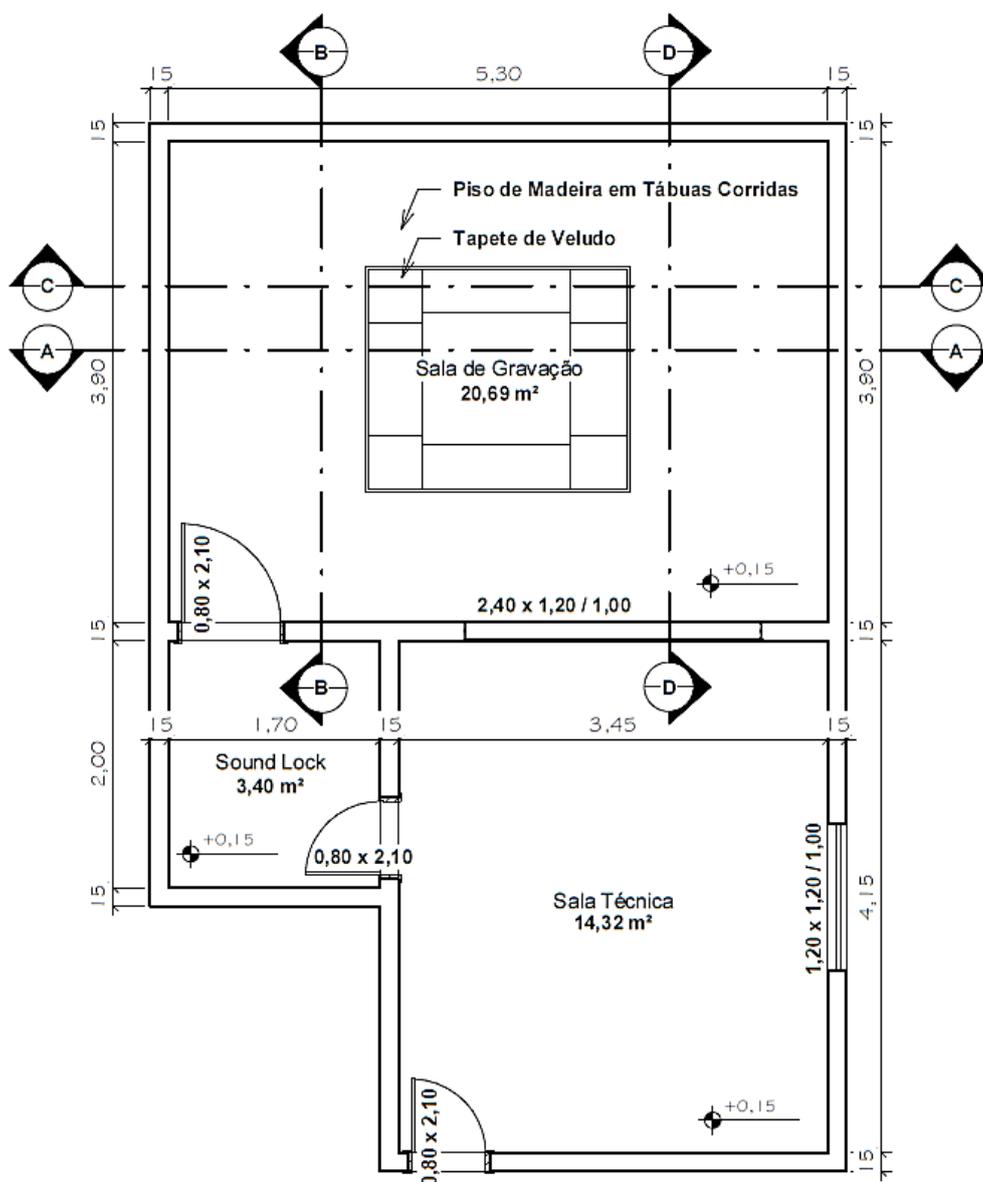


Fonte: OLIVEIRA FILHO, ZANNIN (2012).

Como pode-se observar pela Figura 5, os sons começam a ser reproduzidos na sala a partir 31,5 Hz. Isso é ideal para estúdios de gravação, considerando que as notas musicais mais graves, geralmente emitidas por contrabaixos, estão em torno de 40 Hz e, assim, podem ser reproduzidas (OLIVEIRA FILHO, ZANNIN, 2012).

As dimensões da sala de gravação são apresentadas na Figura 6, que corresponde à planta baixa do estúdio sem materiais variáveis.

Figura 6 - Planta baixa da sala de gravação sem materiais variáveis.



Fonte: Do autor (2021).

4.2 Materiais invariáveis

Os materiais, cujo uso será constante em todos os testes, assim como pessoas e instrumentos, e as áreas de suas superfícies influenciáveis pelos coeficientes de absorção são:

- Vidraça de janela (2,88 m²), permitindo visualização entre a sala de gravação e a sala técnica;
- Porta de madeira de núcleo vazio (2,04 m²);
- Gesso acartonado, nas regiões das paredes não revestidas pelos materiais de teste (50,79 m²) e no teto (20,67 m²);

- Piso de madeira em tábuas corridas (16,77 m²);
- Tapete de veludo (3,90 m²);
- Até 3 pessoas de pé.

Os coeficientes de absorção para cada um destes materiais em seis diferentes faixas de frequência são apresentados na Tabela 1.

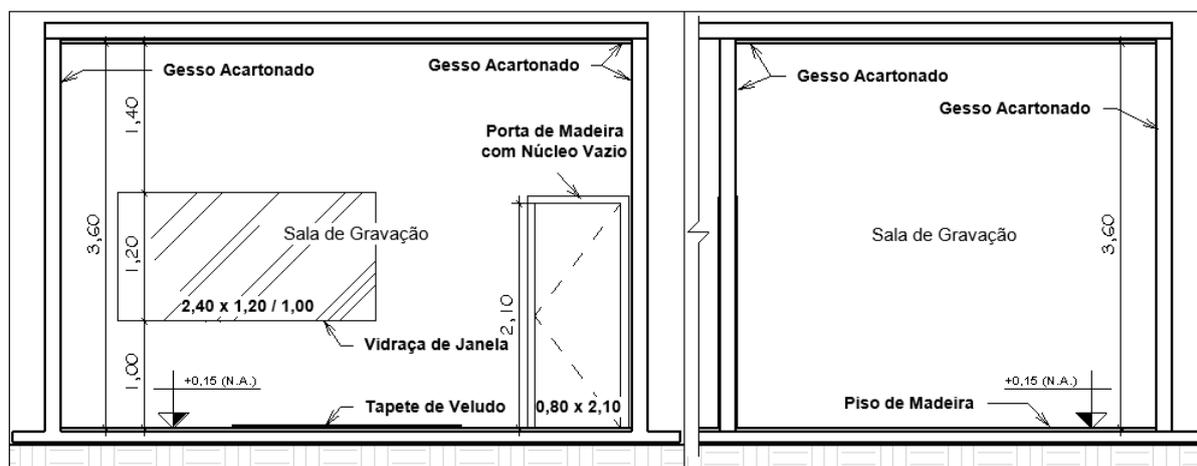
Tabela 1 - Coeficientes de absorção acústica dos materiais invariáveis em diferentes frequências.

Materiais	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Vidraça de Janela	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,07
Gesso Acartonado	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
Piso de Madeira em Tábuas Corridas	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Tapete de Veludo	0,05	0,06	0,10	0,24	0,42	0,60
Pessoas em Pé (por pessoa)	0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45

Fontes: MICHALSKI (2018), NBR 12179 (ABNT, 1992).

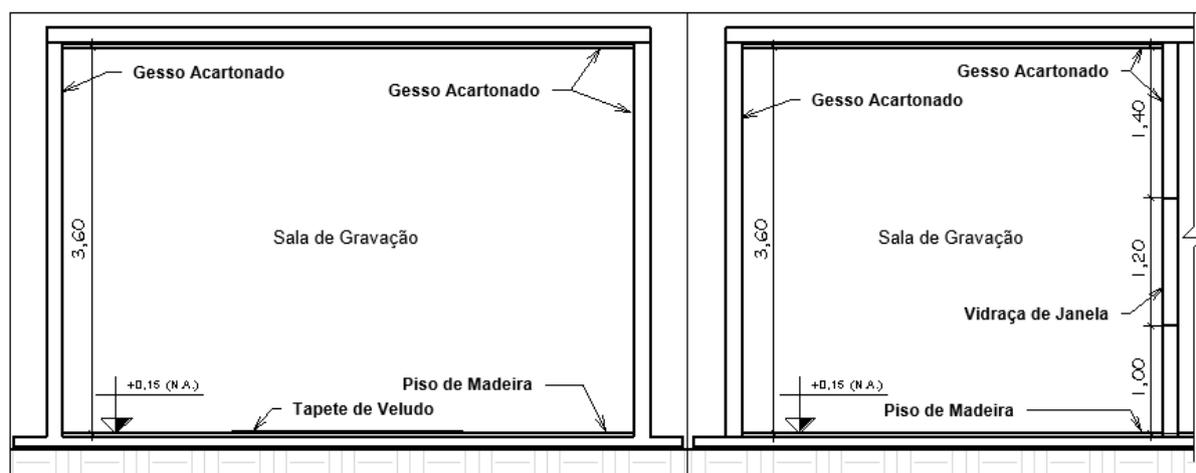
Os materiais serão dispostos conforme é mostrado na Figura 7 e na Figura 8.

Figura 7 - Cortes AA e BB da sala de gravação sem materiais variáveis.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 8 - Cortes CC e DD da sala de gravação sem materiais variáveis.



Fonte: Do autor (2021).

4.3 Materiais variáveis

Os materiais cujo uso será intercalado em três testes diferentes são a espuma de poliuretano, a lã de rocha e a lã de PET e ocuparão 10,53 m² das paredes do ambiente.

Serão utilizadas 27 placas planas de espuma de poliuretano de poliéter de 50 mm de espessura, dimensões de 62,5 cm x 62,5 cm e 30 kg/m³ de densidade em um dos testes; 14 placas de 120 cm x 60 cm e uma placa de 75 cm x 60 cm de lã de rocha de 51 mm de espessura e 64 kg/m³ de densidade em outro; e no último teste, 14 placas de 120 cm x 60 cm e uma placa de 75 cm x 60 cm de lã de PET, de 50 mm e densidade 30 kg/m³. Tais quantidades e áreas são dadas de forma que a área total de cada material seja igual a 10,53 m².

Na Tabela 2, são apresentados os coeficientes de absorção em cada banda de frequência para os mesmos.

Tabela 2 - Coeficientes de absorção acústica dos materiais variáveis em diferentes frequências.

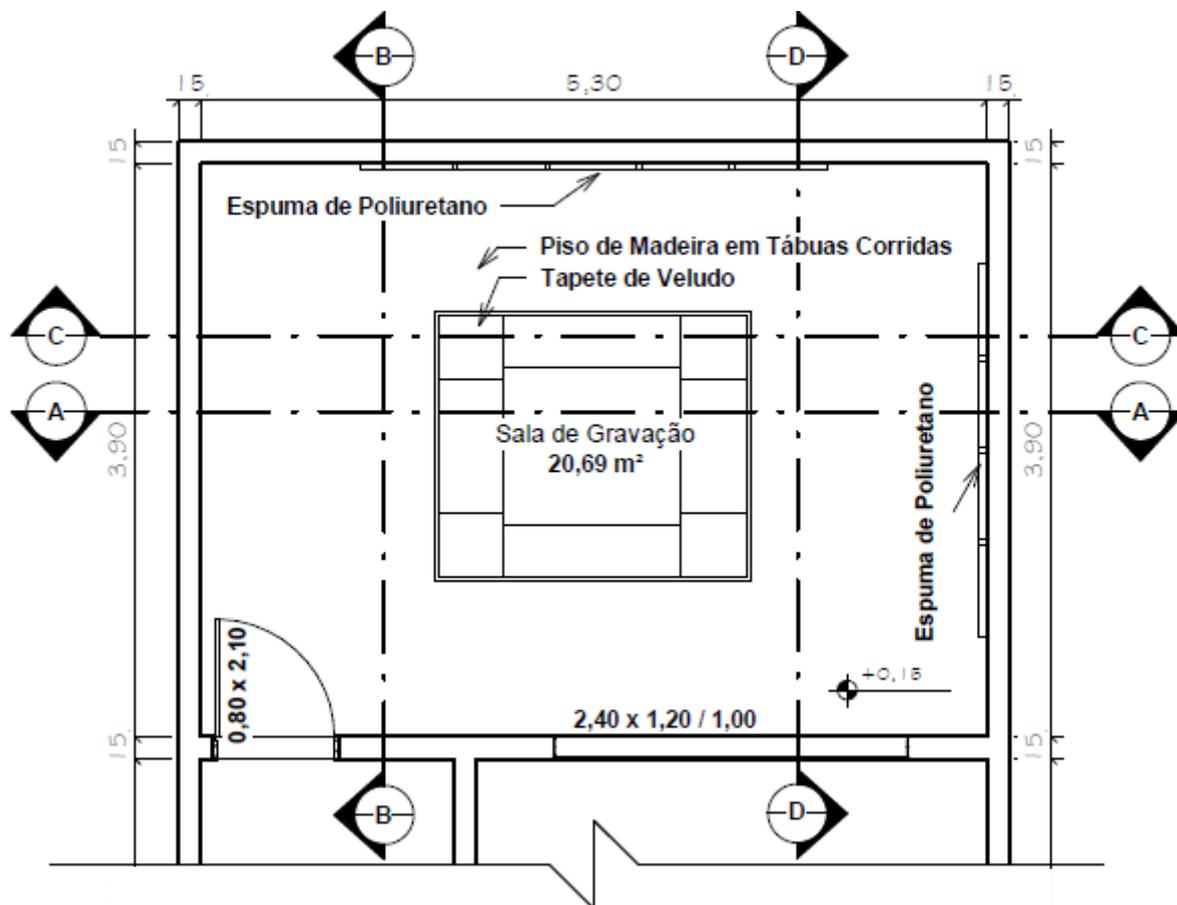
Materiais	Modelo	Espessura (mm)	Frequência (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Espuma de poliuretano	50 C	50	0,19	0,42	1,07	1,09	1,08	1,08
Lã de rocha	PSE-64	51	0,16	0,66	1,00	1,05	1,02	1,04
Lã de PET	50/30	50	0,25	0,47	0,76	0,81	0,82	0,89

Fontes: VIBRASOM (2020), ROCKFIBRAS (2020).

Para efeito de projeto, todos os coeficientes maiores que 1,00 serão considerados iguais a esse valor na realização dos cálculos (ROCKFIBRAS, 2020).

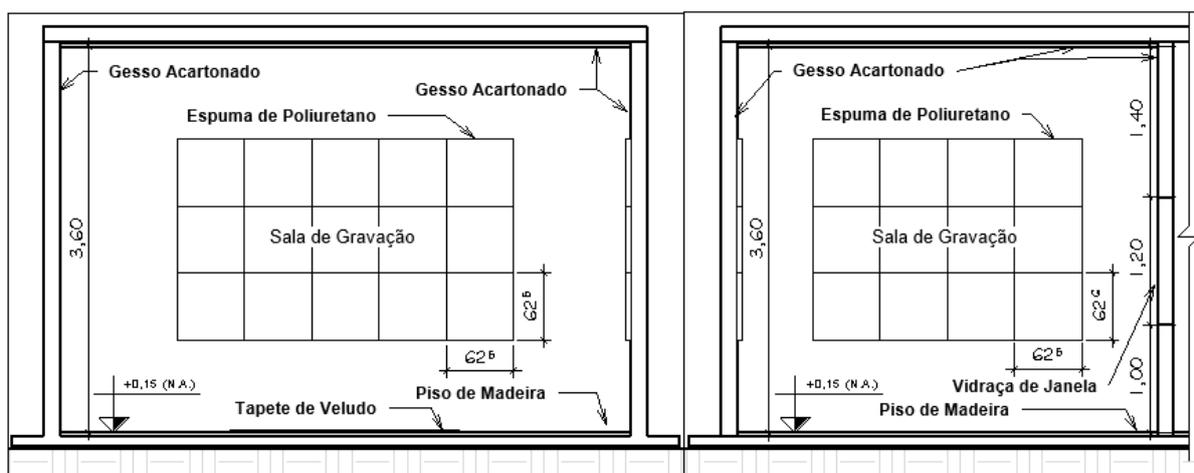
As placas de espuma de poliuretano serão dispostas como é mostrado na Figura 9 e na Figura 10.

Figura 9 - Disposição das placas de espuma de poliuretano.



Fonte: Do autor (2021).

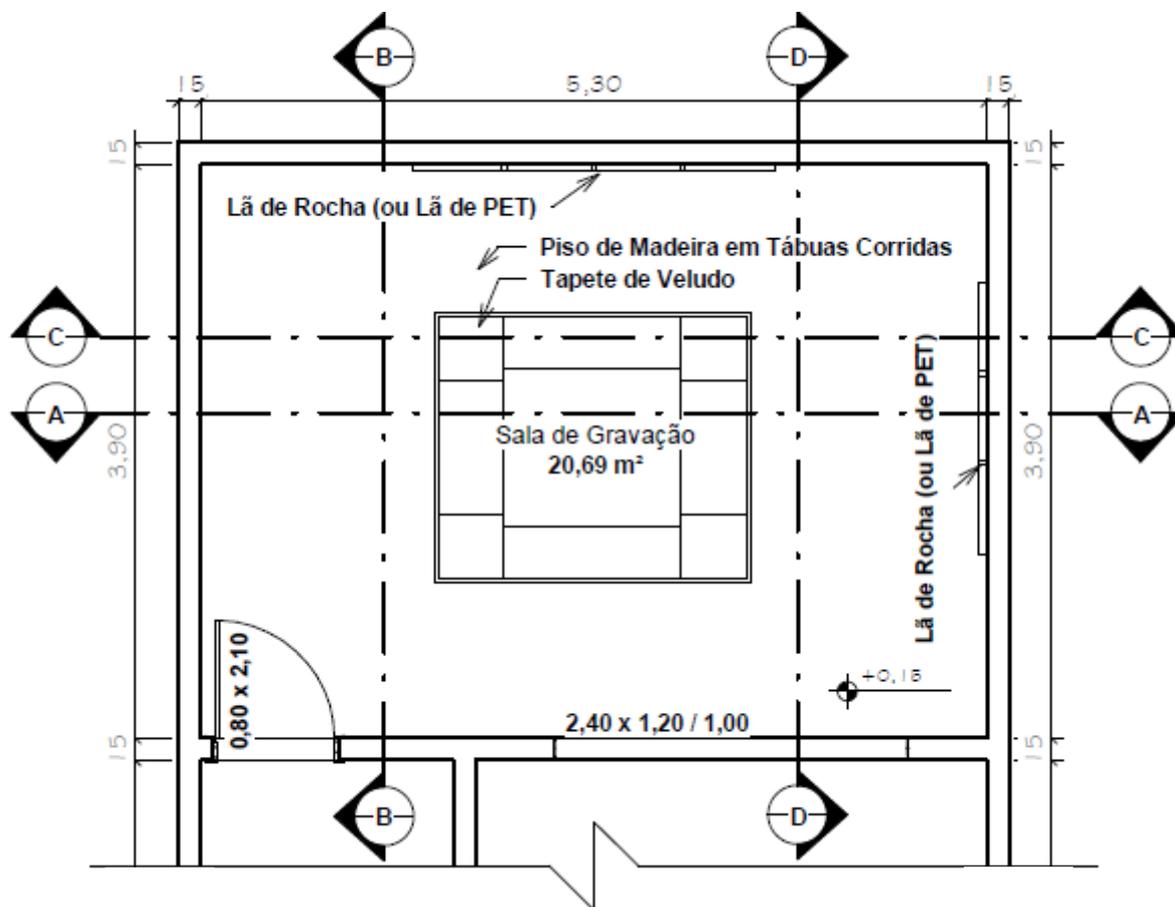
Figura 10 - Cortes CC e DD da sala de gravação com placas de espuma de poliuretano.



Fonte: Do autor (2021).

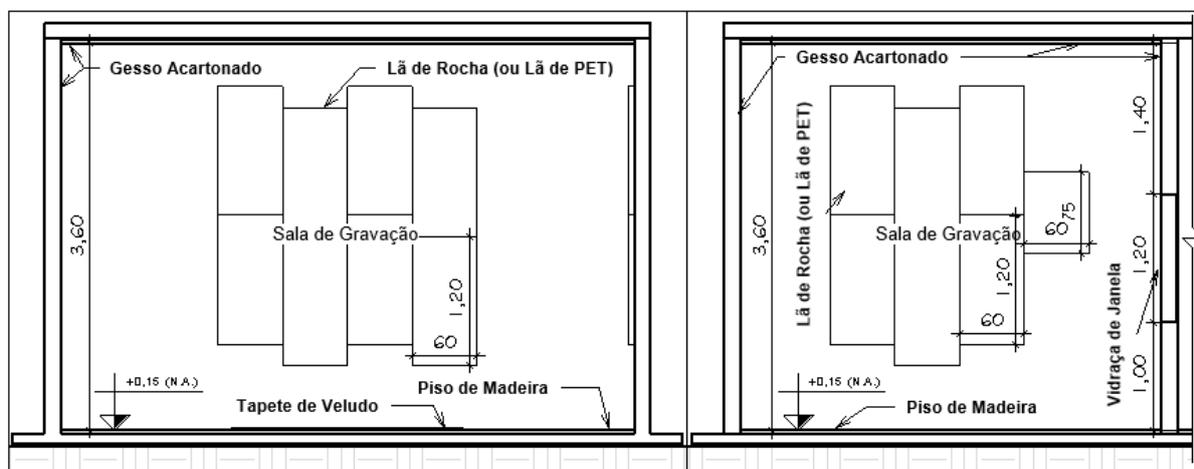
As placas de lã de rocha terão disposição da forma como é demonstrado em Figura 11 e Figura 12. As placas de lã de PET serão distribuídas da mesma forma, já que apresentam as mesmas dimensões e quantidade.

Figura 11 - Disposição das placas de lã de rocha e de lã de PET.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 12 - Cortes CC e DD da sala de gravação com placas de lã de rocha ou lã de PET.



Fonte: Do autor (2021).

4.4 Cálculo do coeficiente médio de absorção (α_m)

Para se escolher a Equação de Sabine ou a Equação de Eyring, para o cálculo do Tempo de Reverberação, primeiramente, será calculado o coeficiente médio de absorção (α_m), dado pela Equação 2 (MARROS, 2011), que segue:

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_i \cdot S_i}{S_{total}} \quad (2)$$

Sendo:

α_i = coeficiente de absorção sonora de cada material em cada banda de frequência;

S_i = área de cada superfície revestida por seu respectivo material (m^2);

S_{total} = área total das superfícies revestidas (m^2).

Deve-se observar que as unidades de absorção resultantes dos elementos absorventes sonoros do tipo cadeiras, mesas, espectadores e outros não alteram o valor da área S_{total} , como afirma a NBR 12179 (ABNT, 1992). Além disso, os coeficientes de absorção sonora (α_i) serão considerados apenas a 500 Hz, uma vez que a norma faz referência somente a esta frequência.

Conforme a NBR 12179 (ABNT, 1992), se α_m for menor ou igual a 0,30, é utilizada a Equação de Sabine. Caso contrário, a Equação de Eyring é empregada.

4.5 Cálculo do Tempo de Reverberação (TR)

Conforme a NBR 12179 (ABNT, 1992), o cálculo do tempo de reverberação será feito pela Equação de Sabine (Equação 3) ou pela Equação de Eyring (Equação 4), de acordo com o valor de α_m .

Equação de Sabine:

$$TR = \frac{0,161 \cdot V}{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots} \quad (3)$$

Sendo:

V = volume do recinto (m^3);

S_1, S_2, \dots, S_n = áreas das superfícies interiores do recinto (m^2), afetadas pelos coeficientes de absorção $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, respectivamente;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ = coeficientes de absorção sonora das várias superfícies interiores e demais elementos absorventes do recinto, do tipo espectadores, cadeiras, mesas e outras.

Equação de Eyring:

$$TR = \frac{0,161.V}{-2,3.S.\log(1 - \alpha_m)} \quad (4)$$

Sendo:

V = volume do recinto (m^3);

S = área total das superfícies interiores do recinto (m^2);

α_m = coeficiente médio ponderado de absorção sonora das várias superfícies interiores do recinto e demais elementos absorventes nele contidos, do tipo espectadores, cadeiras, mesas e outros.

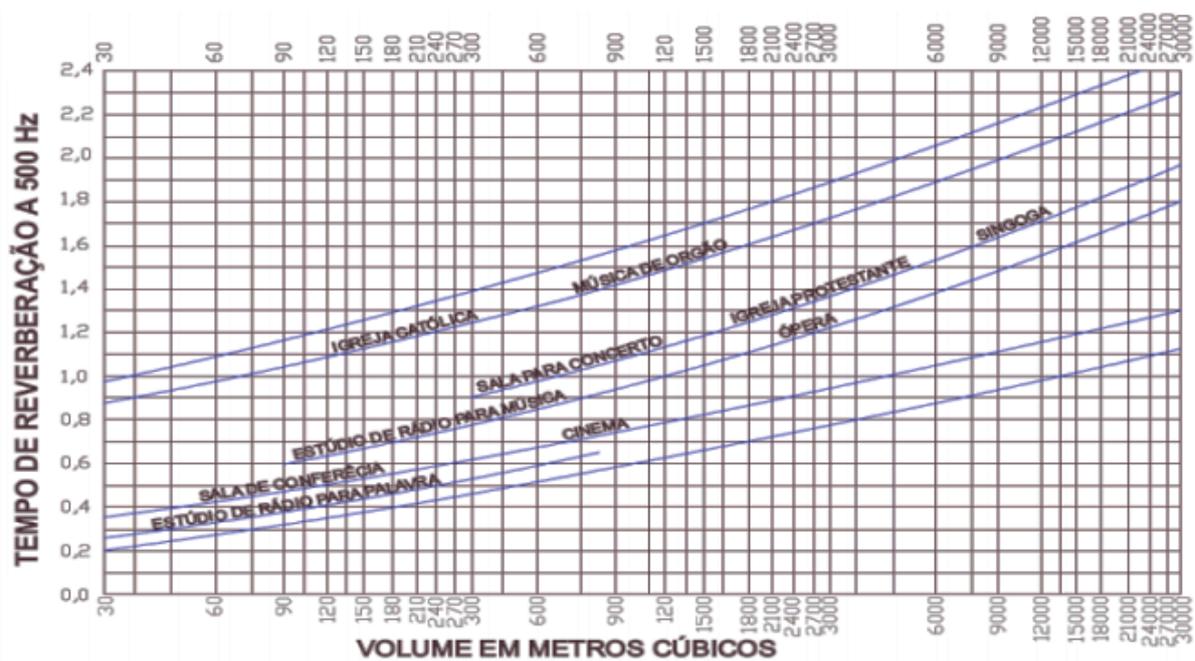
Para efeito de comparação, inicialmente, utilizando-se apenas os materiais invariáveis, será calculado o tempo de reverberação nas seis bandas de frequência, por meio da equação mais adequada. O mesmo processo será feito, novamente, intercalando o uso dos três materiais de teste.

4.6 Comparação entre TR e TRo e aceitação

Os três tempos de reverberação a 500 Hz, obtidos a partir do uso de cada um dos revestimentos separadamente, serão comparados ao tempo ótimo de reverberação em salas de estúdio, previsto pela NBR 12179 (ABNT, 1992), para avaliação da eficácia. Aquele que mais se aproximar deste será considerado o mais eficaz, conforme a NBR 12179 (ABNT, 1992).

Os tempos ótimos de reverberação, de acordo com o ambiente, são apresentados na Figura 133, extraída da NBR 12179 (ABNT, 1992).

Figura 13 - Tempo ótimo de reverberação a 500 Hz, em diferentes ambientes.



Fonte: NBR 12179 (ABNT, 1992).

Para analisar o desempenho dos materiais de uma forma mais complexa, além do que é determinado em norma, será feita uma análise de seus tempos de reverberação também nas frequências de 125, 250, 1000, 2000 e 4000 Hz, comparando-os com os tempos ótimos de reverberação em cada uma dessas frequências.

Estes últimos serão obtidos por meio da multiplicação do tempo ótimo de reverberação a 500 Hz por fatores de correção em cada banda de frequência (MICHALSKI, 2018).

Além disso, a NBR 12179 (ABNT, 1992) estabelece que, para que tratamentos acústicos sejam considerados satisfatórios, o tempo de reverberação a 500 Hz do ambiente esteja dentro de uma tolerância de até 10% do tempo de reverberação ótimo. Assim, será calculado um limite de tolerância entre 90% e 110% de T_{Ro} , ao qual os tempos de reverberação em cada um dos testes serão comparados e avaliados como sendo satisfatórios ou não.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados os resultados do cálculo dos coeficientes médios de absorção (α_m) e dos tempos de reverberação, considerando quatro situações de teste: sem o uso de materiais variáveis, com espuma de poliuretano, com lã de rocha e com de lã de PET. As dimensões da sala também serão analisadas.

5.1 Coeficientes médios de absorção (α_m)

Os coeficientes médios de absorção a 500 Hz, obtidos nas quatro situações, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes médios de absorção a 500 Hz.

Teste	Coeficiente de absorção médio (α_m)
Sem Materiais Variáveis	0,10
Espuma de Poliuretano	0,19
Lã de Rocha	0,19
Lã de PET	0,16

Fonte: Do autor (2021).

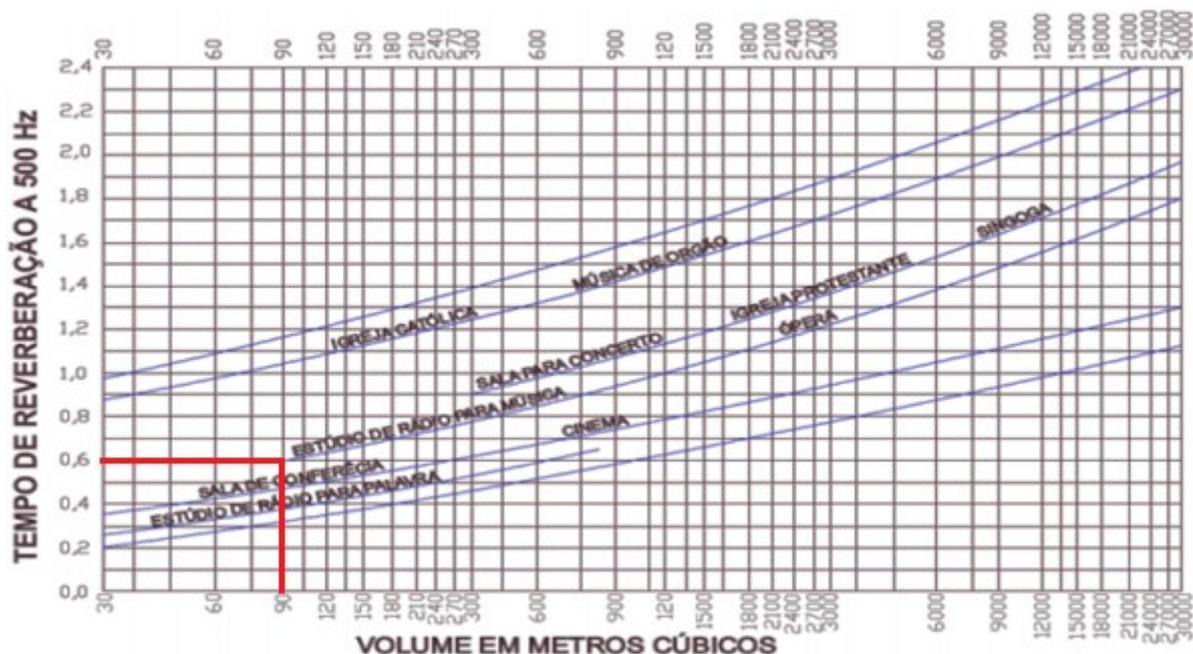
(Obs.: O cálculo dos coeficientes médios de absorção encontra-se de forma detalhada no APÊNDICE A.)

Como pode-se observar, os valores encontrados para os coeficientes médios a 500 Hz, em todas as situações, são inferiores a 0,30. Dessa forma, para o cálculo dos tempos de reverberação, foi considerada a Equação de Sabine.

5.2 Tempo Ótimo de Reverberação e fatores de correção

Considerando-se uma sala de gravação (estúdio de rádio para música) com 74,41 m³ e observando-se a Figura 14, percebe-se que o tempo de reverberação deve ser de 0,60 s para recintos com até, aproximadamente, 90 m³. Portanto, esse será o tempo ótimo de reverberação, considerado como parâmetro de comparação.

Figura 14 - Tempo ótimo de reverberação a 500 Hz para estúdio de rádio para música de até 90 m³.



Fonte: Adaptado da NBR 12179 (ABNT, 1992).

Os fatores de correção em diferentes frequências, utilizados por Michalski (2018), encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores de correção para diferentes frequências.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Fator de correção	1,50	1,18	1,00	0,96	0,95	0,90

Fonte: Do autor (2021).

5.3 Tempos de Reverberação

Os tempos de reverberação, encontrados para cada um dos testes em diferentes frequências, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tempos de reverberação nas situações de teste e tempos de reverberação ótimos.

Frequências (Hz)	Tempo de Reverberação (s)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Sem Materiais Variáveis	0,42	0,88	1,17	1,40	1,31	1,31
Espuma de Poliuretano	0,44	0,71	0,60	0,65	0,63	0,63
Lã de Rocha	0,44	0,62	0,60	0,65	0,63	0,63
Lã de PET	0,43	0,69	0,69	0,73	0,70	0,67
Tempo de reverberação ótimo (s)	0,90	0,71	0,60	0,58	0,57	0,54

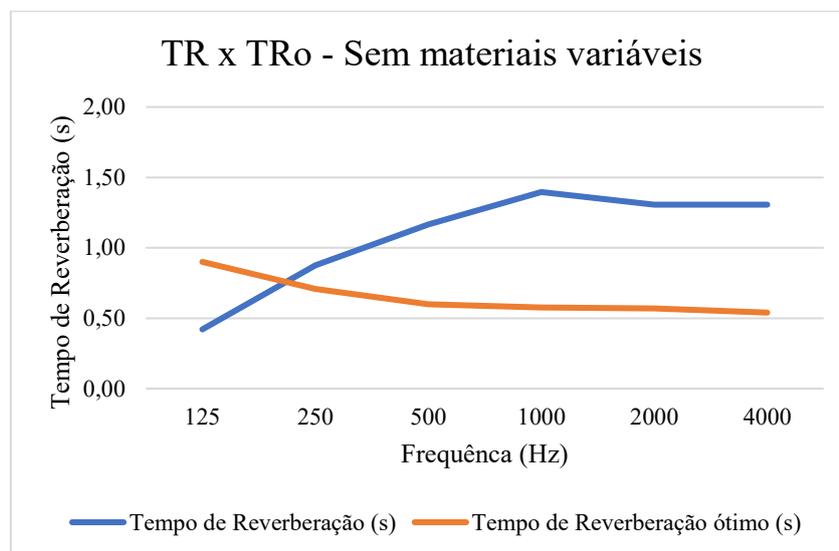
Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

(Obs.: Os cálculos dos tempos de reverberação são demonstrados detalhadamente no APÊNDICE B.)

Os resultados obtidos na Tabela 5, serão utilizados para as análises dos comportamentos dos materiais.

Para o primeiro teste, sem uso de materiais variáveis, os tempos de reverberação em diferentes frequências, assim como os tempos ótimos são representados na Figura 15.

Figura 15 - TR x TRo - Sem materiais variáveis.



Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Como pode-se observar, na Tabela 5, o tempo de reverberação encontrado para a frequência de 500 Hz é de 1,17 s, sendo muito superior ao valor de 0,60 s, prescrito pela NBR 12179 (ABNT 1992).

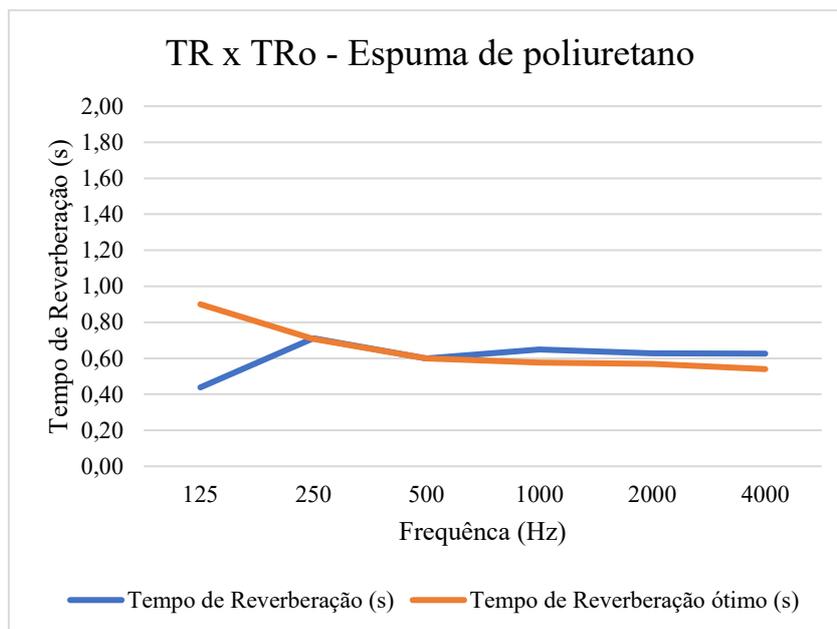
Analisando-se ainda a Figura 15 e a Tabela 5, percebe-se que os tempos de reverberação divergem do tempo ótimo de forma considerável, em todas as seis frequências, principalmente a 1000 Hz, em que TR é de 1,40 s e TRo é de 0,58 s.

Há falta de reverberação a 125 Hz (TR = 0,42 s e TRo = 0,90 s) e excesso entre 250 e 4000 Hz, sendo os valores de TR superiores aos de TRo. Na primeira situação, o som recebe menos reforço do que o necessário, podendo ter uma baixa amplitude, já na segunda, podem ocorrer problemas de inteligibilidade e perda de informações do som.

Por esses motivos, o uso de materiais com propriedades acústicas deve ser feito, de forma a aproximar os tempos e melhorar o desempenho do ambiente.

Os tempos de reverberação e tempos ótimos de reverberação obtidos em seis bandas de frequência no segundo teste, utilizando-se espuma de poliuretano, podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 - TR x TRo - Espuma de poliuretano.



Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

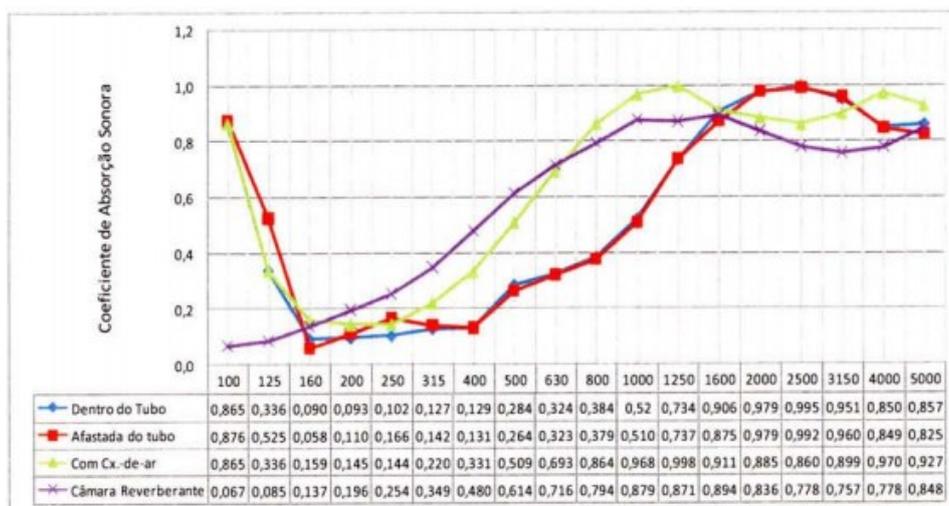
A partir da Tabela 5 e da Figura 16, observando-se o tempo de reverberação obtido para a frequência de 500 Hz, quando utilizada uma área de 10,53 m² de espuma de poliuretano, percebe-se que ele é igual ao tempo ótimo de 0,60 s, previsto pela NBR 12179 (ABNT 1992), podendo, assim, ser uma solução para a acústica da sala.

Também é possível notar por meio da Tabela 5 e da Figura 16, que de 250 a 500 Hz, os tempos de reverberação foram iguais aos tempos ideais (0,71 s e 0,60 s, respectivamente). Para as bandas de frequência de 1000, 2000 e 4000 Hz, os tempos de reverberação (0,65, 0,63 e 0,63 s, respectivamente) encontram-se muito próximos dos tempos ótimos (0,58, 0,57 e 0,54 s, respectivamente). Já a 125 Hz, há uma maior divergência entre os valores, sendo TR = 0,44 s e Tro = 0,90 s.

Assim, percebe-se que a espuma tem um melhor desempenho nas regiões médias e agudas, o que é comum, já que esses materiais tendem a ter maior absorção nessas frequências e menor em regiões mais graves, como é demonstrado por Gonçalves A. (2008), no estudo de caracterização acústica de espumas de poliuretano.

Isso pode ser observado na Figura 17, em que a curva “Câmara Reverberante” representa os coeficientes de absorção conforme a frequência, para espuma de poliuretano de densidade de 30 kg/m³ e 30 mm de espessura, em uma sala com paredes, teto e piso altamente refletores (GONÇALVES, 2008).

Figura 17 - Coeficientes de absorção para espuma de poliuretano D30 E30.

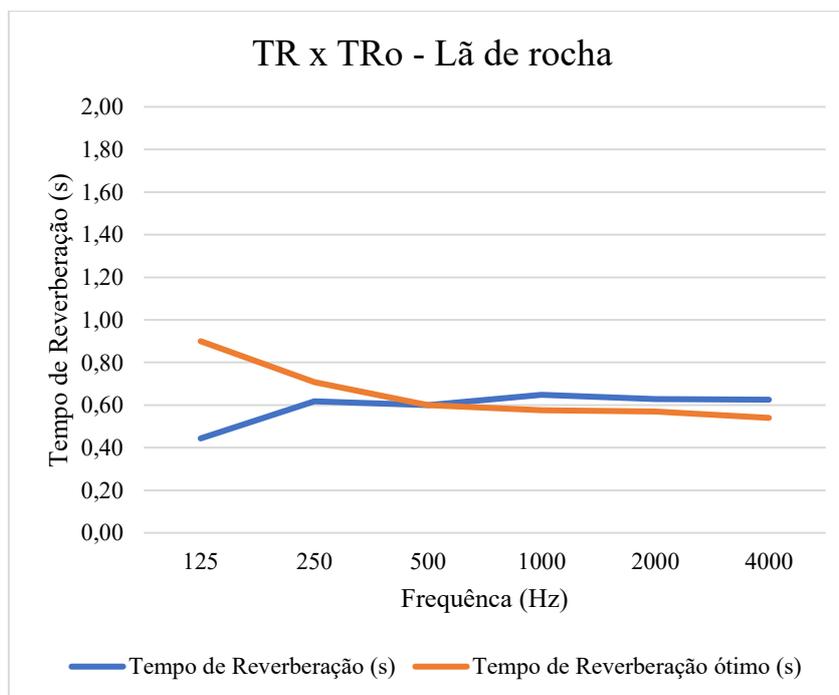


Fonte: Gonçalves (2008).

Na Figura 17, nota-se o crescimento do coeficiente de absorção juntamente ao aumento da frequência ao longo da curva “Câmara Reverberante”. Isso evidencia a maior absorção sonora nas faixas agudas, comportamento observado anteriormente no presente trabalho.

Para o terceiro teste, com uso de lã de rocha, os tempos de reverberação e tempos ótimos de reverberação, nas frequências de 125 a 4000 Hz, encontram-se na Figura 18.

Figura 18 - TR x TRo - Lã de rocha.

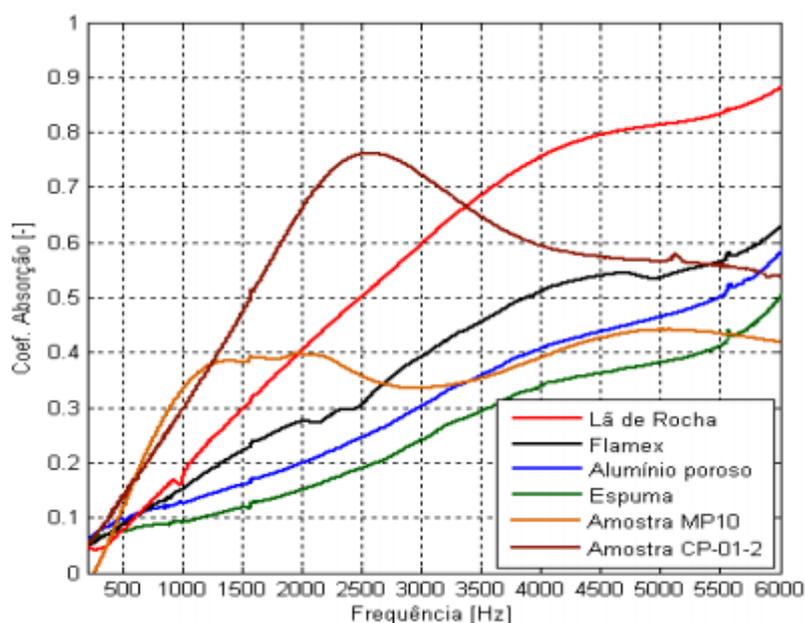


Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Neste caso, a partir da Tabela 5 e da Figura 18, também é possível perceber que, para uma área de 10,53 m² de lã de rocha, obtém-se um tempo de reverberação de 0,60 s a 500 Hz, assim como ao utilizar essa mesma área de espuma de poliuretano. Isso indica um desempenho similar dos dois materiais nessa frequência.

Conforme mostra a Tabela 5, ambos os materiais apresentam tempos de reverberação de 0,44, 0,65, 0,63 e 0,63 s a 125, 1000, 2000 e 4000 Hz, respectivamente e, assim, seus comportamentos são semelhantes nessas frequências, sendo que a lã também apresenta maior absorção em frequências altas e médias e menor em regiões baixas, como foi observado por Mareze (2013). Na Figura 19, a curva “Lã de Rocha” representa tal comportamento (MAREZE, 2013).

Figura 19 - Coeficientes de absorção da lã de rocha de 64 kg/m³.

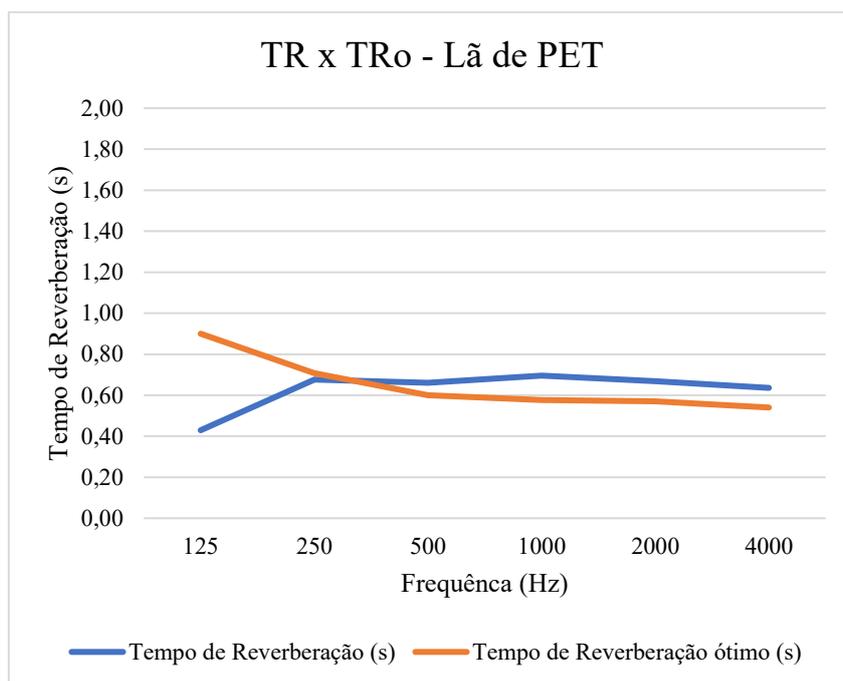


Fonte: Mareze (2013).

Por outro lado, observando-se a Figura 18, percebe-se que os tempos de reverberação da lã de rocha na região intermediária a 250 e 500 Hz (0,62 a 0,60 s), divergem um pouco dos tempos ótimos (0,71 a 0,60 s), o que não acontece com a espuma, indicando uma pequena vantagem da mesma sobre a lã. Apesar disso, de uma forma geral, a lã de rocha pode ser considerada como um bom material absorvente.

O último teste, feito utilizando-se lã de PET, tem seus tempos de reverberação e tempos ótimos de reverberação, nas seis principais bandas de frequência, representados na Figura 20.

Figura 20 - TR x TRo - Lã de PET.



Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Pode-se observar pela Tabela 5, que, diferentemente dos dois casos anteriores, a lã de PET apresenta tempo de reverberação de 0,69 s, afastando-se um pouco do valor de 0,60 s, considerado como ótimo.

Além disso, analisando Tabela 5 e a Figura 20, percebe-se uma divergência um pouco maior do que nos demais materiais entre os tempos de reverberação a 125, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz (0,43, 0,69, 0,73, 0,70 e 0,67 s, respectivamente) e os tempos estabelecidos pela norma (0,90, 0,60, 0,58, 0,57 e 0,54 s), havendo grande proximidade dos tempos apenas a 250 Hz, sendo TR = 0,69 s e TRo = 0,71 s.

Apesar de ter um desempenho inferior aos outros materiais, os tempos de reverberação obtidos com a lã de PET são mais próximos aos ideais do que os tempos calculados para uma sala sem materiais absorventes (0,42, 0,88, 1,17, 1,40, 1,31 e 1,31 s, de 125 a 4000 Hz), como pode ser observado comparando-se os valores presentes na Tabela 5.

Isso mostra que seu uso também seria indicado para reduzir parte do impacto gerado pelo excesso de reverberação, porém não seria o mais eficaz.

5.4 Aceitação

O limite de tolerância previsto pela NBR 12179 (ABNT, 1992) varia de 0,54 a 0,60 s. Assim, os tempos de reverberação com uso de espuma de poliuretano e de lã de rocha a 500

Hz (ambos 0,60 s) estão dentro desse intervalo. Entretanto, o valor de TR para o teste com lã de PET é de 0,69 s e excede o valor máximo, não sendo aceitável.

Dessa forma, seria necessário que 16 placas com dimensões de 120 cm x 60 cm fossem utilizadas, totalizando uma área de 11,52 m² e gerando um tempo de reverberação de 0,66 s a 500 Hz, que assim, seria considerado como aceitável.

No entanto, isso implicaria em maior gasto de material e maior custo financeiro, o que seria desfavorável.

5.5 Determinação do material mais eficaz

A partir das análises realizadas, percebe-se que o material mais eficaz é a espuma de poliuretano, pois além de possuir tempo de reverberação igual ao tempo ótimo de reverberação a 500 Hz, conforme solicita a NBR 12179 (ABNT, 1992), ela também apresenta maior proximidade em todas as outras bandas de frequências principais.

A divergência apresentada por essa espuma na frequência de 125 Hz, no entanto, pode gerar problemas na qualidade de gravações de sons graves. Dessa forma, seu uso deve ser feito em conjunto a *bass traps*, permitindo a absorção sonora em frequências mais graves.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que o material de maior eficácia ao condicionamento acústico em estúdios de gravação, entre todos os que foram estudados, é a espuma de poliuretano de poliéter na forma de placas planas, com 50 mm de espessura e dimensões de 62,5 cm x 62,5 cm. Entretanto, os outros dois materiais (lã de rocha e lã de PET) também possuem um bom desempenho.

Em todos os casos, o uso de outros mecanismos, como *bass trap*, é indispensável a uma melhor qualidade acústica, uma vez que os materiais absorventes possuem limitações, como pôde-se observar.

Isso faz com que a escolha entre usar espuma de poliuretano e lã de rocha também possa ser avaliada por meio do custo-benefício. Mesmo que a primeira seja um pouco melhor que a segunda, essa diferença poderia ser amenizada ou anulada por meio das armadilhas de graves. Assim, de forma a complementar os resultados obtidos neste estudo, sugere-se, para trabalhos futuros, uma análise do comportamento do ambiente com o uso de *bass traps*, que indicaria qual material traria melhores resultados, considerando-se a questão financeira.

Além disso, a lã de PET, associada a outros mecanismos, também poderia ser uma alternativa, caso houvesse a intenção de usar um material mais sustentável no condicionamento acústico. Entretanto, seria demandada uma maior quantidade deste material.

Por fim, percebeu-se que o estudo acústico geométrico é importante não somente para melhorar o desempenho de um ambiente conforme sua finalidade, mas também para garantir a otimização do uso dos materiais acústicos, evitando o superdimensionamento e gerando economia.

REFERÊNCIAS

AHNERT, W.; TENNHARDT, H. Acoustics for Auditoriums and Concert Halls. *In*: BALLOU, G. (ed.). **Handbook for Sound Engineers**. 4th ed. Boston: Focal Press, 2002. p. 145-200.

ARANHA, R. V. **Análise técnica via tubo de impedância e estudo sustentável da lã de PET como substituta de materiais comerciais em aplicações acústicas**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179**: Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.

BORGES, A.; RODRIGUES, C. **Introdução à Física Acústica**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017.

CATAI, R.E.; PENTEADO, A.P.; DALBELLO, P.F. Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, 2006, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos** [...]. Curitiba: [s.n.], 2006. p. 4205-4216. Disponível em: <<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17747/material/Engenharia%20de%20Produ%C3%A7%C3%A3o,%20Engenharia%20Civil,%20Mecatr%C3%B4nica.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2020.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application**. 2nd ed. [S.l.]: Spon Press, 2009.

EVEREST, F. A. **Master Handbook of Acoustics**. 4th ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2001.

FAHY, F. J. **Foundations of Engineering Acoustics**. 1st ed. [S.l.]: Academic Press, 2000.

OLIVEIRA FILHO, M. V. M. de., ZANNIN, P. H. T. Estudo e projeto acústico de um ambiente para gravação musical: estudo de caso. **Acústica**, Curitiba, V.43, no. 1-2, p. 13-19, abril, 2012.

GONÇALVES, A. S. **Caracterização acústica de espumas de poliuretano – Absorção sonora**. 2008. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

GOLÇALVES, V. S. B.; SILVA, L. B. da.; COUTINHO, A. S. Ruído como agente comprometedor da inteligibilidade de fala dos professores. **Production**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 466-476, 2009. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132009000300005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 abr. 2021.

HARRIS, C. M. **Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control**. 3rd ed. Nova Iorque: McGraw- Hill, 1998.

ISBERT, A. **Diseño acústico de espacios arquitectónicos**. 1. ed. Barcelona: Univ. Politèc. de Catalunya, 1998.

JONES, D. Acoustical Noise Control. *In*: BALLOU, G. (ed.). **Handbook for Sound Engineers**. 4th ed. Boston: Focal Press, 2002. p. 65-94.

LACERDA, A. B. M. de. et al. Ambiente urbano e percepção da poluição sonora. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 8, n. 2, p. 85-98, dez. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2005000200005>. Acesso em: 6 abr. 2021.

LONG, M. **Architectural acoustics**. 1st. ed. Oxforde: Elsevier, 2006.

MARCO, C. S. de. **Elementos de Acústica Arquitetônica**. 2 ed. São Paulo: Nobel, 1982.

MAREZE, P. H. **Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MARROS, F. **Caracterização acústica de salas para prática e ensino musical**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MEDEIROS, L. B. **Ruídos: Efeitos extra auditivos no corpo humano**. 1999. Monografia (Especialização em Audiologia Clínica) - Centro de Especialização em Fonoaudiologia Clínica e Audiologia Clínica, Porto Alegre, 1999.

MICHALSKI, R. L. X. N. **Planilha Absorção Sonora AUT0280 - 2018 - 01**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=65663>>. Acesso em: 28 out. 2020.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO. **ISO 3382-1:2009**: Acústica: Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 1: Salas de espetáculos. Geneva, 2009.

PERLES, K. C; BERTOLI, S. R. Tempo de reverberação de salas: análise comparativa entre métodos de medição. *In*: CONGRESSO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16, 2008, Campinas. **Pôsteres** [...]. Campinas: [s.n.], 2008. Disponível em: <<https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xvicongresso/paineis/044427.pdf>>. Acesso em: 1 abr. 2021.

PLASTIPRENE. **O Poliuretano**. Valinhos, 2020. Disponível em: <<https://www.plastiprene.com.br/o-poliuretano/>>. Acesso em: 16 nov. 2020.

ROCKFIBRAS. **Lã de Rocha THERMAX®**: Painéis: Painel PSE-64. Guararema, 2020. Disponível em: <<http://rockfibras.com.br/la-de-rocha-thermax-paineis-pse-64/>>. Acesso em: 16 nov. 2020.

RODRIGUES, C. M.C. **Avaliação Acústica de um Estúdio de Gravação Implantado numa Edificação Comercial**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SIMÕES, F. **Acústica arquitetônica**. 1 ed. Rio de Janeiro: Procel edifica, 2011.

VALLE, S. do. **Manual Prático de Acústica**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Música & Tecnologia, 2009.

VIBRASOM. **Espuma Acústica Antichamas Sonique**. São Bernardo do Campo, 2020. Disponível em: <<https://www.vibrasom.ind.br/produtos-acusticos/espuma-acustica.html>>. Acesso em 16 nov. 2020.

VIBRASOM. **Espuma Acústica Lisa Sonique Classic**. São Bernardo do Campo, 2020. Disponível em: <<https://www.vibrasom.ind.br/revestimento-acustico-sonique-classic.html>>. Acesso em 16 nov. 2020.

VIBRASOM. **Lã de PET Ecolã**: Isolamento Acústico. São Bernardo do Campo, 2020. Disponível em: <<https://www.vibrasom.ind.br/produtos-linha-ecologica/la-de-pet.html>>. Acesso em 16 nov. 2020.

APÊNDICE A - Cálculo dos coeficientes médios de absorção a 500Hz

Tabela 6 - Cálculo do coeficiente médio de absorção a 500 Hz sem uso de materiais variáveis.

Material / Objeto	Coeficiente de absorção sonora a 500 Hz (α_i)	Área superficial (m^2) / quantidade (Si)	Área de Absorção Sonora (m^2) (Si x α_i)
Vidraça de Janela	0,03	2,88	0,09
Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	0,15	2,04	0,31
Gesso Acartonado (Teto)	0,08	20,67	1,65
Gesso Acartonado (Paredes)	0,08	61,32	4,91
Piso de Madeira em Tábuas Corridas	0,1	16,77	1,68
Tapete de Veludo	0,1	3,90	0,39
Pessoas em Pé	0,42	3*	1,26
Total		107,58	10,28
Coeficiente de absorção médio (α_m)			0,10

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 7 - Cálculo do coeficiente médio de absorção a 500 Hz, usando espuma de poliuretano.

Material / Objeto	Coeficiente de absorção sonora a 500 Hz (α_i)	Área superficial (m^2) / quantidade (Si)	Área de Absorção Sonora (m^2) (Si x α_i)
Vidraça de Janela	0,03	2,88	0,09
Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	0,15	2,04	0,31
Gesso Acartonado (Teto)	0,08	20,67	1,65
Gesso Acartonado (Paredes)	0,08	50,79	4,06
Piso de Madeira em Tábuas Corridas	0,1	16,77	1,68
Tapete de Veludo	0,1	3,90	0,39
Espuma de Poliuretano	1,0	10,53	10,53
Pessoas em Pé	0,42	3*	1,26
Total		107,58	19,97
Coeficiente de absorção médio (α_m)			0,19

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 8 - Cálculo do coeficiente médio de absorção a 500 Hz, usando lã de rocha.

Material / Objeto	Coeficiente de absorção sonora a 500 Hz (α_i)	Área superficial (m²) / quantidade (Si)	Área de Absorção Sonora (m²) (Si x α_i)
Vidraça de Janela	0,03	2,88	0,09
Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	0,15	2,04	0,31
Gesso Acartonado (Teto)	0,08	20,67	1,65
Gesso Acartonado (Paredes)	0,08	50,79	4,06
Piso de Madeira em Tábuas Corridas	0,1	16,77	1,68
Tapete de Veludo	0,1	3,90	0,39
Lã de Rocha	1,0	10,53	10,53
Pessoas em Pé	0,42	3*	1,26
Total		107,58	19,97
Coeficiente de absorção médio (α_m)			0,19

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 9 - Cálculo do coeficiente médio de absorção a 500 Hz, usando lã de PET.

Material / Objeto	Coeficiente de absorção sonora a 500 Hz (α_i)	Área superficial (m²) / quantidade (Si)	Área de Absorção Sonora (m²) (Si x α_i)
Vidraça de Janela	0,03	2,88	0,09
Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	0,15	2,04	0,31
Gesso Acartonado (Teto)	0,08	20,67	1,65
Gesso Acartonado (Paredes)	0,08	50,79	4,06
Piso de Madeira em Tábuas Corridas	0,1	16,77	1,68
Tapete de Veludo	0,1	3,90	0,39
Lã de PET	0,76	10,53	8,00
Pessoas em Pé	0,42	3*	1,26
Total		107,58	17,44
Coeficiente de absorção médio (α_m)			0,16

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

(*A quantidade de pessoas não é incluída na soma das áreas superficiais que resulta na área superficial total, conforme afirma a NBR 12179 (ABNT, 1992).)

APÊNDICE B – Cálculo dos tempos de reverberação

Tabela 10 - Informações sobre materiais utilizados no primeiro caso, sem uso de materiais variáveis.

Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Volume (m ³)					
5,30	3,90	3,60	74,41					
Superfícies	Materiais	Áreas das superfícies (S - m ²)	Coeficientes de absorção sonora (α)					
			125	250	500	1000	2000	4000
1	Vidraça de Janela	2,88	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
2	Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	2,04	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,07
3	Gesso Acartonado (Teto)	20,67	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
4	Gesso Acartonado (Paredes)	61,32	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
5	Piso de Madeira em Tábuas Corridas	16,77	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
6	Tapete de Veludo	3,90	0,05	0,06	0,10	0,24	0,42	0,60
Objetos	Pessoas / Objetos	Quantidade						
1	Pessoas em Pé	3	0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 11 - Tempo de reverberação para seis diferentes frequências sem uso de materiais variáveis.

Áreas de Absorção Sonora (S x α)						
Frequências (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Superfície 1	0,1152	0,1152	0,0864	0,0576	0,0576	0,0576
Superfície 2	0,6120	0,5100	0,3060	0,2040	0,2040	0,1428
Superfície 3	6,2010	2,4804	1,6536	1,2402	1,2402	1,0335
Superfície 4	18,3960	7,3584	4,9056	3,6792	3,6792	3,0660
Superfície 5	2,5155	1,8447	1,6770	1,1739	1,0062	1,1739
Superfície 6	0,1950	0,2340	0,3900	0,9360	1,6380	2,3400
Objeto 1	0,4500	1,1400	1,2600	1,2900	1,3500	1,3500
Áreas de Absorção Sonora Equivalente ($\Sigma Sx\alpha$)	28,48	13,68	10,28	8,58	9,18	9,16
Tempo de Reverberação (s)	0,42	0,88	1,17	1,40	1,31	1,31

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 12 - Informações sobre materiais utilizados no segundo caso, com espuma de poliuretano.

Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Volume (m ³)					
5,30	3,90	3,60	74,41					
Superfícies	Materiais	Áreas das superfícies (S - m ²)	Coeficientes de absorção sonora (α)					
			125	250	500	1000	2000	4000
1	Vidraça de Janela	2,88	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
2	Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	2,04	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,07
3	Gesso Acartonado (Teto)	20,67	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
4	Gesso Acartonado (Paredes)	50,79	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
5	Piso de Madeira em Tábuas Corridas	16,77	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
6	Tapete de Veludo	3,90	0,05	0,06	0,10	0,24	0,42	0,60
7	Espuma de Poliuretano	10,53	0,19	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00
Objetos	Pessoas / Objetos	Quantidade						
1	Pessoas em Pé	3	0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 13 - Tempo de reverberação para seis diferentes frequências no segundo caso, com espuma de poliuretano.

Frequências (Hz)	Áreas de Absorção Sonora (S x α)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Superfície 1	0,1152	0,1152	0,0864	0,0576	0,0576	0,0576
Superfície 2	0,6120	0,5100	0,3060	0,2040	0,2040	0,1428
Superfície 3	6,2010	2,4804	1,6536	1,2402	1,2402	1,0335
Superfície 4	15,2370	6,0948	4,0632	3,0474	3,0474	2,5395
Superfície 5	2,5155	1,8447	1,6770	1,1739	1,0062	1,1739
Superfície 6	0,1950	0,2340	0,3900	0,9360	1,6380	2,3400
Superfície 7	2,0007	4,4226	10,5300	10,5300	10,5300	10,5300
Objeto 1	0,4500	1,1400	1,2600	1,2900	1,3500	1,3500
Áreas de Absorção Sonora Equivalente ($\Sigma Sx\alpha$)	27,33	16,84	19,97	18,48	19,07	19,17
Tempo de Reverberação (s)	0,44	0,71	0,60	0,65	0,63	0,63

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 14 - Informações sobre materiais utilizados no terceiro caso, com lã de rocha.

Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Volume (m ³)					
5,30	3,90	3,60	74,41					
Superfícies	Materiais	Áreas das superfícies (S - m ²)	Coeficientes de absorção sonora (α)					
			125	250	500	1000	2000	4000
1	Vidraça de Janela	2,88	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
2	Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	2,04	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,07
3	Gesso Acartonado (Teto)	20,67	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
4	Gesso Acartonado (Paredes)	50,79	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
5	Piso de Madeira em Tábuas Corridas	16,77	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
6	Tapete de Veludo	3,90	0,05	0,06	0,10	0,24	0,42	0,60
7	Lã de Rocha	10,53	0,16	0,66	1,0	1,0	1,0	1,0
Objetos	Pessoas / Objetos	Quantidade						
1	Pessoas em Pé	3	0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 15 - Tempo de reverberação para seis diferentes frequências no terceiro caso, com lã de rocha.

Áreas de Absorção Sonora (S x α)						
Frequências (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Superfície 1	0,1152	0,1152	0,0864	0,0576	0,0576	0,0576
Superfície 2	0,6120	0,5100	0,3060	0,2040	0,2040	0,1428
Superfície 3	6,2010	2,4804	1,6536	1,2402	1,2402	1,0335
Superfície 4	15,2370	6,0948	4,0632	3,0474	3,0474	2,5395
Superfície 5	2,5155	1,8447	1,6770	1,1739	1,0062	1,1739
Superfície 6	0,1950	0,2340	0,3900	0,9360	1,6380	2,3400
Superfície 7	1,6848	6,9498	10,5300	10,5300	10,5300	10,5300
Objeto 1	0,4500	1,1400	1,2600	1,2900	1,3500	1,3500
Áreas de Absorção Sonora Equivalente ($\Sigma Sx\alpha$)	27,01	19,37	19,97	18,48	19,07	19,17
Tempo de Reverberação (s)	0,44	0,62	0,60	0,65	0,63	0,63

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 16 - Informações sobre materiais utilizados no quarto caso, com lã de PET.

Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Volume (m ³)					
5,30	3,90	3,60	74,41					
Superfícies	Materiais	Áreas das superfícies (S - m ²)	Coeficientes de absorção sonora (α)					
			125	250	500	1000	2000	4000
1	Vidraça de Janela	2,88	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
2	Porta de Madeira (Núcleo Vazio)	2,04	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,07
3	Gesso Acartonado (Teto)	20,67	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
4	Gesso Acartonado (Paredes)	50,79	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
5	Piso de Madeira em Tábuas Corridas	16,77	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
6	Tapete de Veludo	3,90	0,05	0,06	0,10	0,24	0,42	0,60
7	Lã de PET	10,53	0,25	0,47	0,76	0,81	0,82	0,89
Objetos	Pessoas / Objetos	Quantidade						
1	Pessoas em Pé	3	0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).

Tabela 17 - Tempo de reverberação para seis diferentes frequências no quarto caso, com lã de PET.

Áreas de Absorção Sonora (S x α)						
Frequências (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Superfície 1	0,1152	0,1152	0,0864	0,0576	0,0576	0,0576
Superfície 2	0,6120	0,5100	0,3060	0,2040	0,2040	0,1428
Superfície 3	6,2010	2,4804	1,6536	1,2402	1,2402	1,0335
Superfície 4	15,2370	6,0948	4,0632	3,0474	3,0474	2,5395
Superfície 5	2,5155	1,8447	1,6770	1,1739	1,0062	1,1739
Superfície 6	0,1950	0,2340	0,3900	0,9360	1,6380	2,3400
Superfície 7	2,6325	4,9491	8,0028	8,5293	8,6346	9,3717
Objeto 1	0,4500	1,1400	1,2600	1,2900	1,3500	1,3500
Áreas de Absorção Sonora Equivalente ($\Sigma Sx\alpha$)	27,96	17,37	17,44	16,48	17,18	18,01
Tempo de Reverberação (s)	0,43	0,69	0,69	0,73	0,70	0,67

Fonte: Adaptado de Michalski (2018).