

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Tiago de Almeida Martins

**ANÁLISE E TRATAMENTO ACÚSTICO PARA ESTÚDIOS
MUSICAIS**

São Paulo
2010

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Tiago de Almeida Martins

**ANÁLISE E TRATAMENTO ACÚSTICO PARA ESTÚDIOS
MUSICAIS**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
a obtenção do título de Graduação em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Sylvio Reynaldo Bistafa

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Martins, Tiago de Almeida
Isolamento e tratamento acústico para estúdios musicais /
T.A. Martins. – São Paulo, 2010.
40 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Isolamento acústico 2. Acústica (Tratamento; Metodologia)
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Mecânica II. t.

RESUMO

Esse trabalho tem como finalidade o estudo da adequação de ambientes para a prática de atividades e serviços relacionados ao ramo musical. Para isso, será feito um estudo detalhado do som, relacionando conceitos musicais e científicos. Posteriormente serão analisados conceitos do isolamento e da otimização acústica, assim como as variadas opções de isolamento e absorção presentes no mercado. Após a análise teórica, será introduzido métodos de medição, ilustrados com um projeto de otimização acústica real. Soluções para o problema proposto serão demonstradas, colocadas em prática e posteriormente analisadas.

Palavras-chave: Isolamento acústico, estúdio musical, otimização acústica.

Abstract

This work aims to study the suitability of environments for the practice of activities and services related to the music business. For this, a detailed study of sound will be done, linking scientific and musical concepts. Later, concepts of insulation and acoustic optimization will be analyzed, as well as various insulation and absorption options in the market. After the theoretical analysis, measurement methods will be introduced, illustrated with a real project to optimize sound. Solutions to this problem will be demonstrated and then analyzed.

Keywords: Acoustic insulation, musical studio, acoustic optimization.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	5
1.1 Introdução à engenharia acústica	5
1.2 Características do ambiente	5
CAPITULO 2 – PERCEPÇÃO DO SOM	7
2.1 Definições do som	7
2.2 Propriedades Subjetivas	8
2.2.1 Intensidade (<i>Loudness</i>).....	8
2.2.2 Altura (<i>Pitch</i>)	9
2.2.3 Timbre	10
2.3 Fundamentos do Som.....	10
2.3.1 Ondas	11
2.3.2 Harmônicos e Oitavas.....	12
CAPITULO 3 – ACÚSTICA DE SALAS.....	16
3.1 Parâmetros Acústicos	16
3.1.1 Tempo de Reverberação	16
3.1.2 Análise Modal	18
3.1.3 Difusão e Dispersão.....	21
3.1.4 Perda de Transmissão e Redução de Ruído.....	22
CAPITULO 4 – APLICAÇÃO PRÁTICA	28
4.1 Tempo de Reverberação	29
4.2 Análise de Transmissão de Ruídos.....	30
4.3 Modos de Ressonância.....	33
4.4 Dispersão	34
4.5 Seleção de Materiais	35
CAPITULO 5 – CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	40

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Introdução à engenharia acústica

A criação de um estúdio musical necessita uma análise muito rigorosa do ambiente a ser utilizado. A dificuldade de se obter espaços relativamente grandes limita muito as opções e escolha do melhor ambiente. Dessa forma, a área deixa de ser uma variável, e as escolhas passam a ser direcionadas à métodos de adequação da sala para a atividade desejada.

O som produzido em um ambiente por uma fonte se propaga no ar atingindo as superfícies. Ao atingi-las, parte do som é refletida e volta a se propagar. Uma pessoa que se encontra dentro da sala irá escutar uma combinação do som emitido diretamente da fonte com as ondas refletidas nas superfícies e objetos presentes. O tema central da engenharia acústica consiste em como manipular as reflexões que afetam o som interno e como controlar o som que pode ser enviado para o meio externo, ou seja, estudar a interface em que o som é transmitido de um meio para outro.

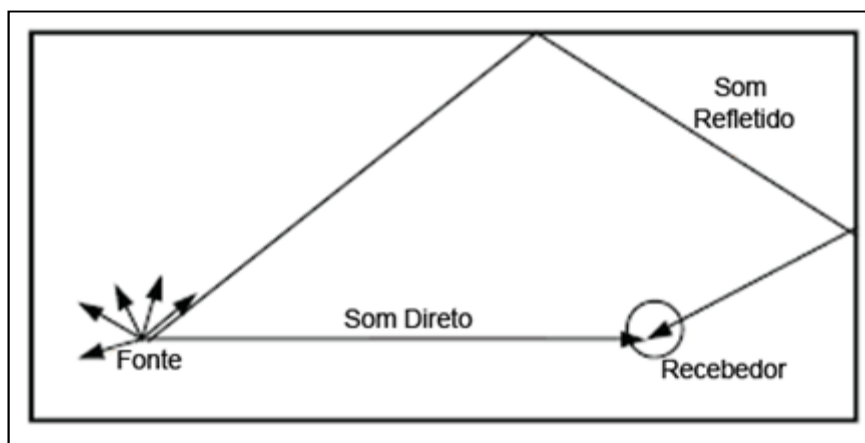


Figura 1 – “Combinação do som emitido” [2].

1.2 Características do ambiente

Ao atingir uma superfície, o som é refletido, absorvido e transmitido para outro meio. A reflexão pode ser redirecionada, basicamente agindo como um espelho, ou difusa,

espalhando em todas as direções o som refletido. O que caracteriza o tratamento acústico de cada ambiente é a ponderação entre essas propriedades, ou seja, a predominância entre reflexão difusa, reflexão pura ou absorção.

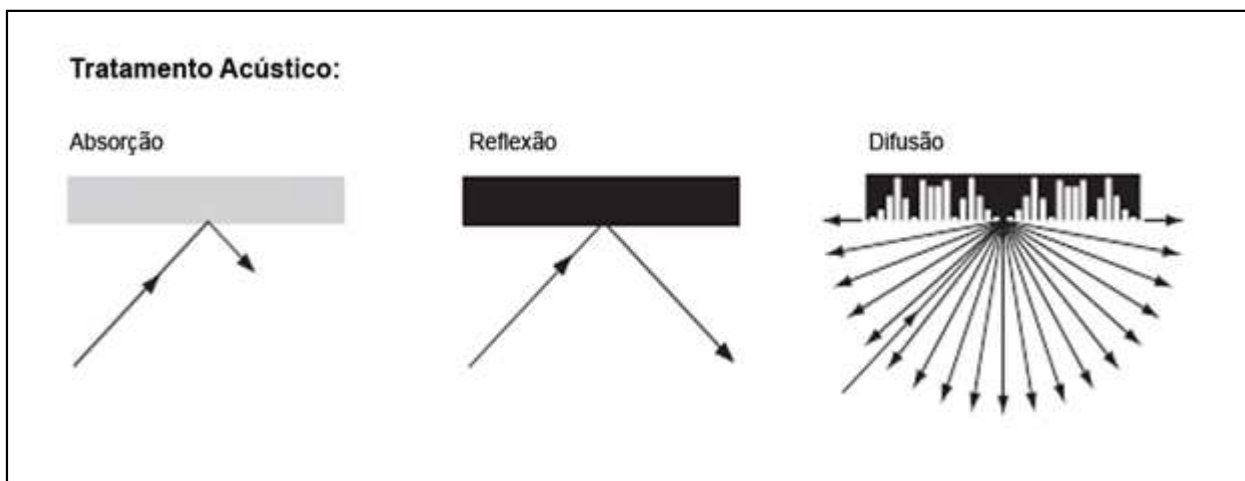


Figura 2 – “Propriedades acústicas de superfícies” [2]

Ambientes acusticamente tratados podem ser divididos basicamente em três categorias:

1. Produção de som;
2. Controle de ruído;
3. Reprodução de som.

O primeiro caracteriza espaços em que há produção de som centralizada e um receptor bem definido, como teatros, salas de concerto musical, salas de conferencia, auditório, entre outros. Neste caso, predomina a reflexão e a difusão, pois há a necessidade de distribuição e direcionamento do som.

O segundo caracteriza ambientes com muita produção de ruídos, como fábricas e ginásios de esportes, ou ambientes em que requerem absoluto silêncio, como bibliotecas, por exemplo. Nesse caso, predomina a absorção do som.

O terceiro é o caso que será aqui estudado, e é representado por estúdios de gravação musical, em que o som deve ser escutado como é produzido na fonte, sem interferências, e em todos os pontos do ambiente. Assim, a predominância é da absorção e da difusão.

CAPITULO 2 – PERCEPÇÃO DO SOM

2.1 Definições do som

O som pode ser definido utilizando duas abordagens diferentes. Na primeira, o som é visto como um estímulo físico, caracterizado como uma onda em um meio elástico. Na segunda é visto como uma sensação, ou seja, é a percepção do sistema auditivo humano. As duas definições serão tratadas neste trabalho e relacionadas, visto que o escopo aponta para a melhoria da qualidade do som para a audição, utilizando, para esse fim, ferramentas de engenharia.

Essa diferença de abordagem evidencia um caráter objetivo no primeiro caso, e subjetivo no segundo. Isso se deve ao fato de ser possível medir as características do som apenas quando tratado como uma onda. Porém, ambas possuem propriedades bem definidas, sendo possível relacioná-las mesmo que seja impraticável equacioná-las.

Fisicamente o som é distinguido pela variação no tempo da pressão em um ponto. Assim, a propagação do som é feita na forma de ondas, com partículas do ar migrando de regiões de maior para menor pressão, criando uma nova concentração de partículas e consequentemente o aumento de pressão em outra região, desenvolvendo um movimento no sentido da propagação em que a partícula se desloca e volta para o mesmo ponto de partida, como ilustrado na Figura 3.

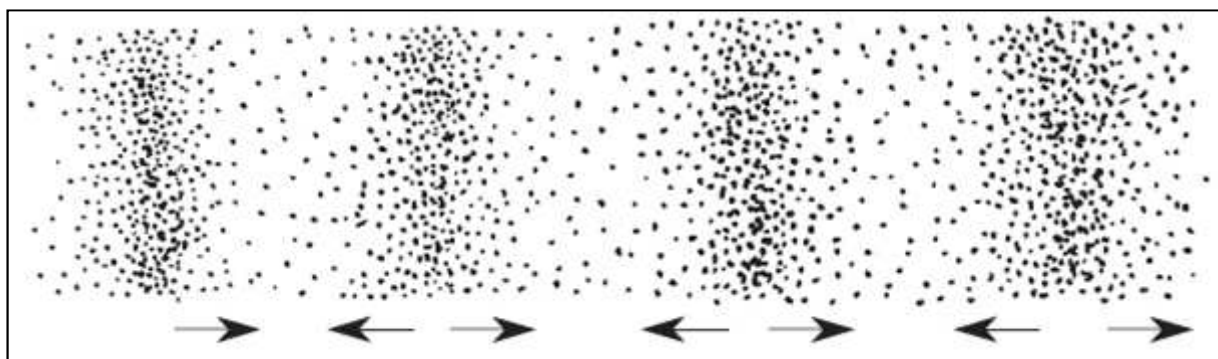


Figura 3 – “Direção das partículas em uma onda sonora” [3].

Em um meio elástico a propagação do som se desenvolve segundo uma onda senoidal, podendo ser determinada por três principais grandezas denominadas de

propriedades objetivas do som. São elas frequência, espectro e nível de pressão sonora. Essas grandezas são facilmente observadas através de um osciloscópio, e podem ser relacionadas com as propriedades subjetivas altura (*pitch*), timbre e intensidade (*loudness*).

2.2 Propriedades Subjetivas

Como citado anteriormente, os três principais atributos auditivos do som são altura, timbre e intensidade. Cada um desses atributos está vinculado com propriedades objetivas e analisam a percepção humana delas.

2.2.1 Intensidade (*Loudness*)

A intensidade mede a sensibilidade do ouvido humano por variações no volume do som produzido, ou seja, o quanto o nível de pressão sonora afeta a sensibilidade humana. Foi verificado que para frequências diferentes, o nível de pressão sonora deve variar para que fosse causada a mesma percepção de volume. A essa percepção de volume é dada o nome de intensidade. A intensidade possui a unidade phon, e é definida como o nível de pressão sonora a 1000 Hz, ou seja, um som de 1000 Hz a 100 dB possui 100 phons. Para a mesma intensidade de 100 phons, o nível de pressão sonora varia com a frequência como mostra a Figura 4.

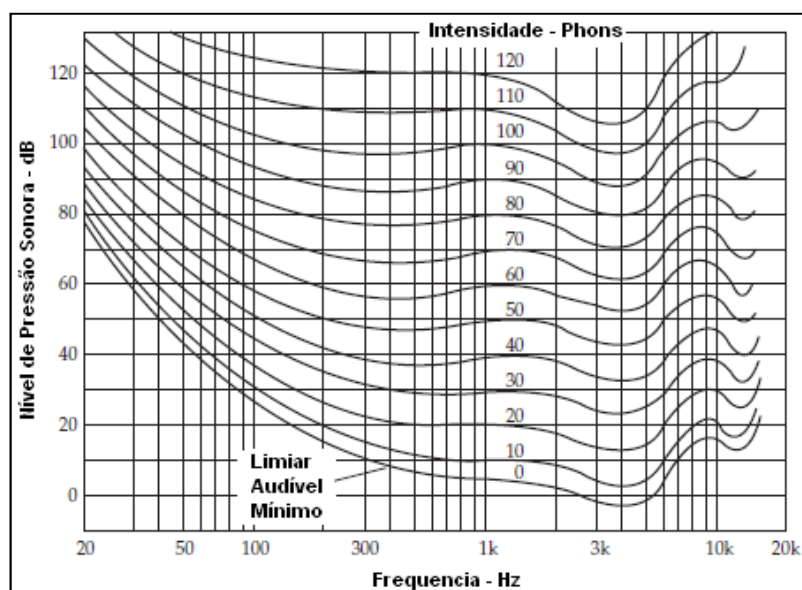


Figura 4 – “Linhas de Intensidade para tons puros” [3].

Por ser caracterizado a partir de grandezas físicas (nível de pressão sonora e frequência), o phon pode ser substituído pelo sone para avaliar melhor o comportamento do ouvido humano. O sone de referência é definido com a intensidade de 40 phons a 1 kHz. Estudos comprovaram que o ser humano avalia que a intensidade do som é dobrada quando é aumentado 10 dB no Nível de Pressão Sonora. O sone mede o quanto foi dobrada a intensidade de referência de 1 sone. Assim, com a soma de 10 dB no nível de pressão sonora, multiplica-se por 2 a intensidade em sone, ou seja, uma intensidade de 2 sones possui 50 dB a 1 kHz, 4 sones, 60 dB a 1 kHz e assim por diante.

2.2.2 Altura (*Pitch*)

Altura é o termo dado ao atributo auditivo que define a nota musical. O ouvido humano consegue distinguir uma diferença na frequência do som de forma não linear. Por isso foi proposta uma escala para que fosse possível relacionar a grandeza física com a percepção humana, semelhante à escala sone da intensidade. Essa escala possui a unidade subjetiva mel, e relaciona com a frequência a partir de um ponto de referência denominado de 1000 mels, equivalente ao som de nível de pressão sonora 60 dB e frequência 1000 Hz. Deve-se relacionar com o nível de pressão sonora, pois a altura também pode ser alterada de forma menos intensa por essa grandeza. O gráfico relacionando a frequência e a altura está representado na Figura 5.

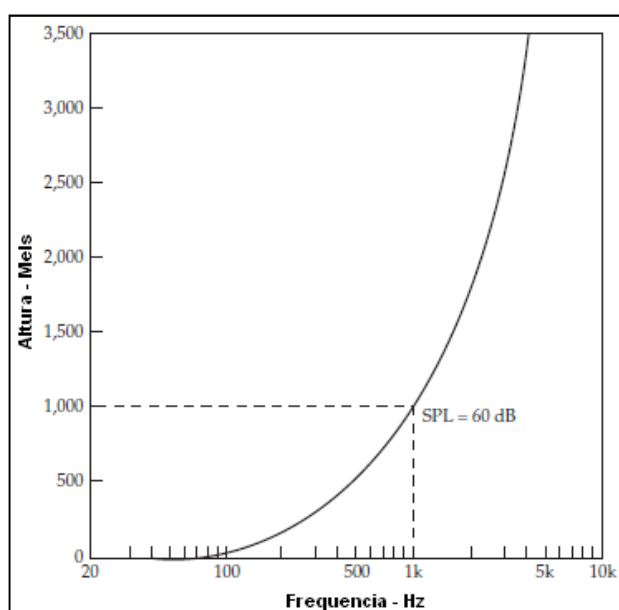


Figura 5 – “Gráfico de Pitch (mels x Hz)” [3].

A figura 5 ilustra que para um aumento no dobro da sensibilidade na altura, de 1000 mels para 1500 mels, a frequência variou de 1000 Hz para 1700 Hz.

2.2.3 Timbre

O Timbre é o atributo que permite distinguir dois instrumentos diferentes, mesmo que estejam produzindo um som de mesma intensidade e altura. Essa propriedade se relaciona com o espectro da onda sonora e será retomada quando essa característica for estudada.

2.3 Fundamentos do Som

O som pode ser visto como uma combinação de ondas senoidais.

Uma onda senoidal possui duas características fundamentais:

1. Comprimento de Onda (λ);
2. Amplitude (A).

Como o som se caracteriza como a variação da pressão no ar, cada onda produz uma variação de pressão bem definida e periódica.

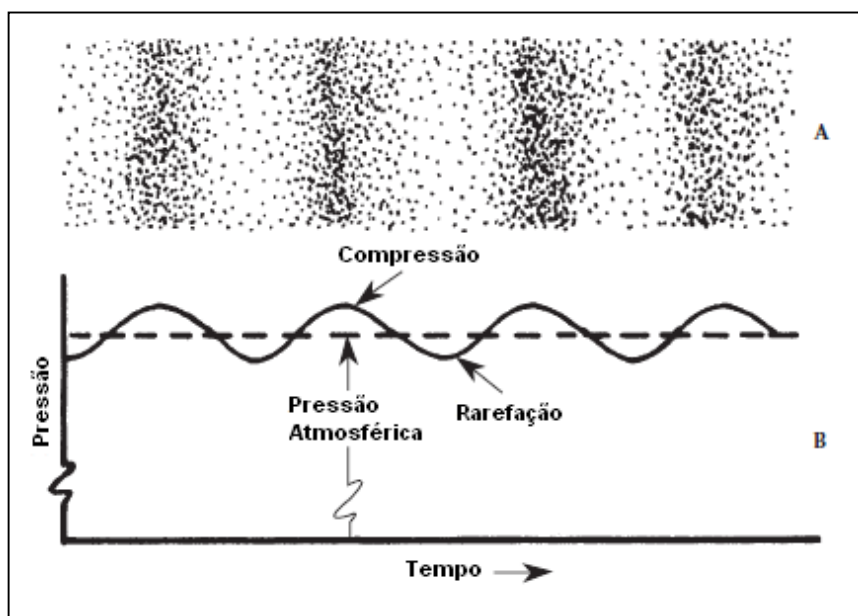


Figura 6 – “Variação de Pressão de Uma Onda” [3].

A velocidade de onda é definida como a velocidade com a qual uma perturbação é propagada. No caso do som, a velocidade com que um ponto de compressão ou um ponto de rarefação percorre no espaço. A equação resultante, considerando o ar como gás perfeito, está apresentada abaixo.

$$c = \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad (2.1)$$

Onde c é a velocidade do som, k e R são constantes do meio (ar) e T a temperatura.

A equação revela que em ambientes com pouca variação de temperatura, a velocidade do som é constante. Em condições normais de temperatura essa velocidade é $346 \frac{m}{s}$.

Com a velocidade do som definida, é possível determinar a frequência como sendo a quantidade de oscilações (ciclos completos por uma partícula) em um segundo. A equação resultante está a seguir.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

Uma onda é definida por sua frequência (f), amplitude (A) e fase (ϕ), onde fase é a defasagem temporal de uma onda. A diferenciação de ondas é definida pela variação dessas propriedades.

2.3.1 Ondas

Na prática, os sons emitidos por fontes quaisquer possuem formas extremamente complexas. A figura 7 representa o gráfico da captação de uma corda de violão sendo tocada.

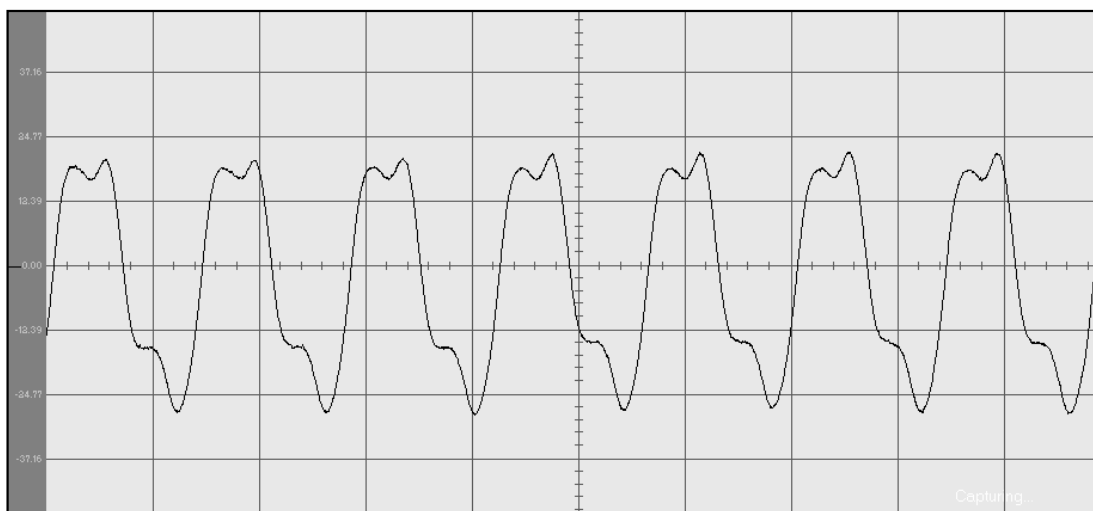


Figura 7 – “Nota LÁ Tocada em Violão”.

É flagrante a diferença da onda apresentada com uma onda senoidal. O formato da onda é resultado da combinação de varias ondas que, somadas, resultam na onda mostrada. Ondas de frequência, amplitude e fase diferentes podem ser mescladas formando uma onda com um perfil totalmente diferente, como mostrado na figura 8.

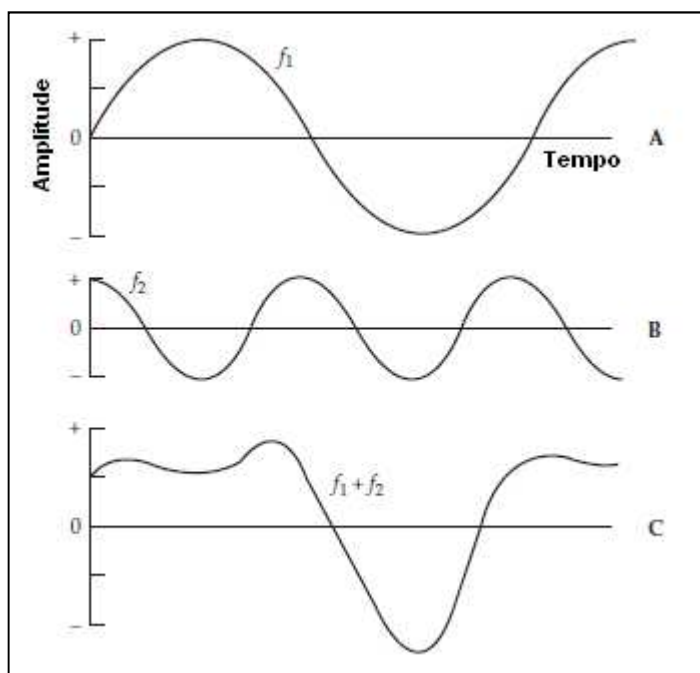


Figura 8 – “Somatória de Ondas” [3].

2.3.2 Harmônicos e Oitavas

Alguns casos particulares de soma de ondas provocam uma onda resultante padronizada bem definida, com segmentos curtos, como mostrados na figura 7. Isso

ocorre quando são somadas ondas que possuem um encontro padronizado dos nós ou ventres de uma onda com os nós ou ventres de outra onda, provocando interferências construtivas e destrutivas com frequência fixada. Esse encontro ocorre quando se somam harmônicos, ou ondas de frequências múltiplas. A figura 9 ilustra uma onda de frequência f_1 e seus harmônicos $f_2 = 2 \cdot f_1$ e $f_3 = 3 \cdot f_1$. Dessa forma é possível definir uma escala de harmônicos a partir de uma frequência fundamental.

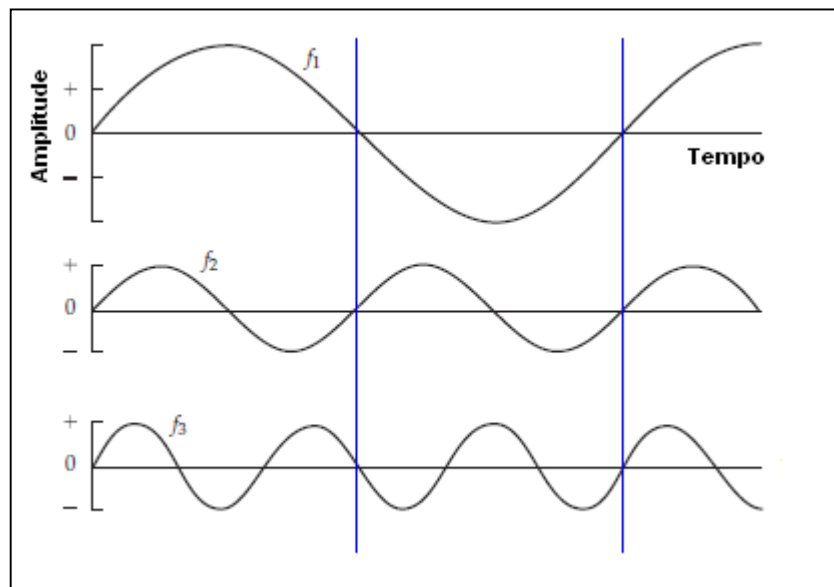


Figura 9 – “Harmônicos” [3].

É possível relacionar os harmônicos com uma escala paralela que estabelece uma conexão com a percepção do ouvido humano. Essa escala é composta de oitavas, ou seja, uma oitava é o dobro da frequência anterior (Figura 10). As oitavas determinam a escala musical, sendo duas oitavas os extremos de uma escala.

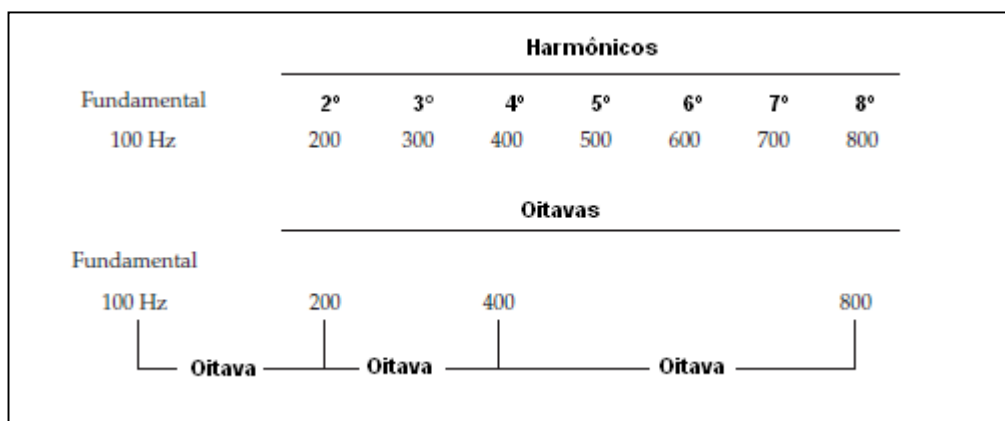


Figura 10 – “Harmônicos e Oitavas” [3].

A padronização de curtos segmentos pode ocorrer com soma de ondas não múltiplas como é mostrado na Figura 11 onde $f_2 = \frac{3}{2} \cdot f_1$ e $f_3 = \frac{5}{4} \cdot f_1$.

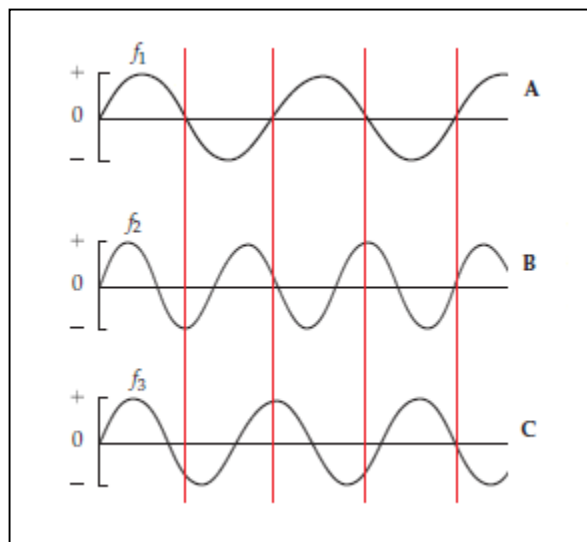


Figura 11 – “Terça e Quinta”.

Essas razões, como é o caso das oitavas, também definem escalas denominadas terça ($\frac{5}{4}$) e quinta ($\frac{3}{2}$). A escala musical é então apresentada na figura 12, possuindo duas oitavas nos extremos e notas intermediárias determinadas pelas razões apresentadas.

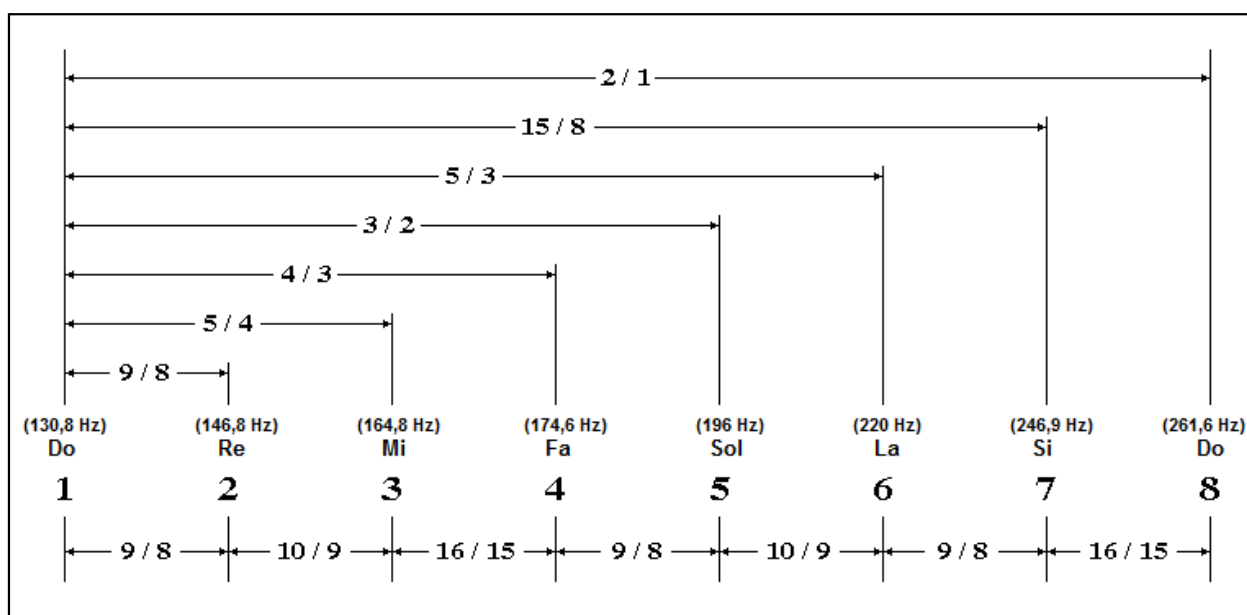


Figura 12 – “Escala Musical”.

Outras frequências podem interferir no perfil da onda. A somatória de todas as ondas senoidais presentes no meio alteram o espectro da onda, mesmo que a frequência dominante permaneça. Essa diferenciação no espectro da onda diferencia o timbre de notas iguais produzidas por instrumentos diferentes. Voltando ao sinal da Figura 7, abaixo segue o espectro das frequências da nota lá (110 Hz) produzida no violão. Percebe-se a presença do 2º, 3º e 4º harmônicos no espectro da onda.

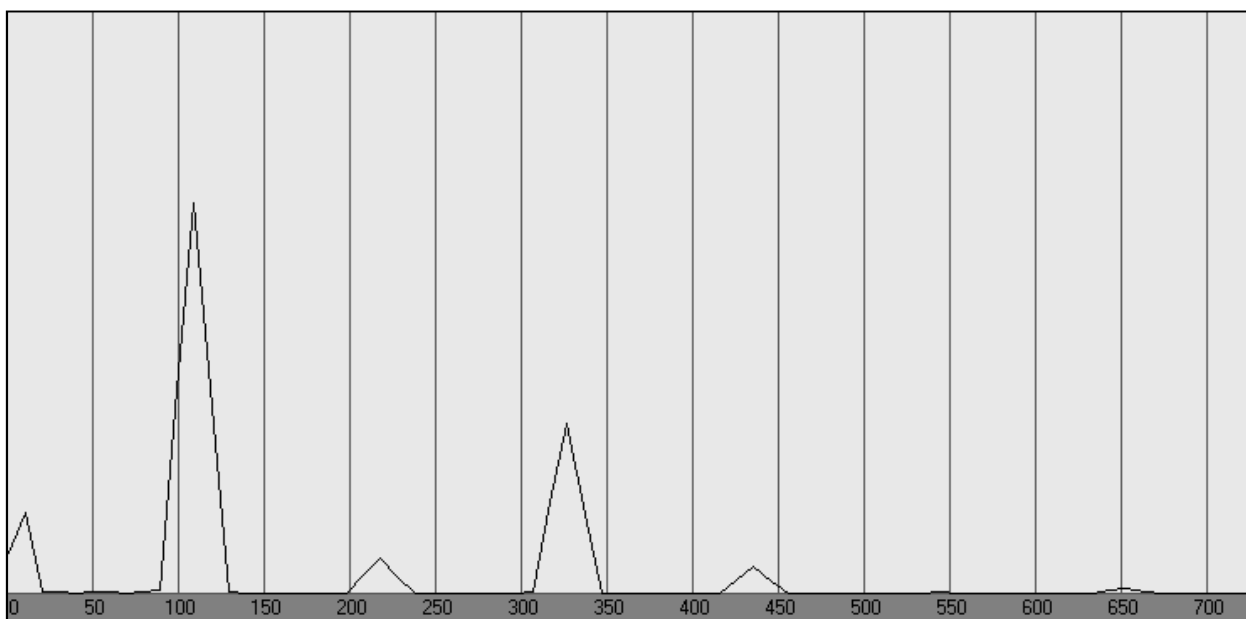


Figura 13 – “Espectro de Frequências da Nota Lá (110 Hz)”.

CAPITULO 3 – ACÚSTICA DE SALAS

Ambientes onde o som é produzido e enclausurado podem sofrer diversos fenômenos causados pela reflexão e reincidência das ondas no interior do meio. A problemática se estende em salas com necessidade de homogeneizar o som produzido por fontes pontuais para diversos pontos, como é o caso de estúdios musicais.

Salas com tratamento acústico também devem blindar qualquer interferência externa, isolando totalmente o ambiente tratado. Dessa forma, para o caso apresentado, é conveniente que nenhum som seja também enviado para o meio.

Primeiramente serão apresentados e definidos os parâmetros acústicos relacionados com a teoria para interiores. Posteriormente serão tratadas formas construtivas de isolamento acústico e então a adequação do ambiente, assim como posicionamento de fontes sonoras.

O estudo será teorizado com base em um ambiente real fornecido por uma escola de música para o tratamento acústico. A escola almeja a criação de uma nova sala de aula e estúdio de gravação. Dessa forma, o capítulo 3 será tratado paralelamente com o próximo capítulo, onde a teoria será aplicada e estudada.

3.1 Parâmetros Acústicos

A qualidade acústica de ambientes pode ser analisada primeiramente pelas características construtivas da sala. Essa primeira abordagem recorre ao estudo de dois fenômenos acústicos, o tempo de reverberação e a análise modal, que resultarão em parâmetros de absorção.

3.1.1 Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação é um parâmetro que analisa a reflexão e absorção do som em ambientes. A figura 14 representa como a percepção do som em um determinado ponto é alterada no tempo conforme todas as reflexões de um determinado emissor

alcançam o receptor assim que o som é emitido (B). A figura também mostra o decaimento do som assim que o emissor para de emitir (C).

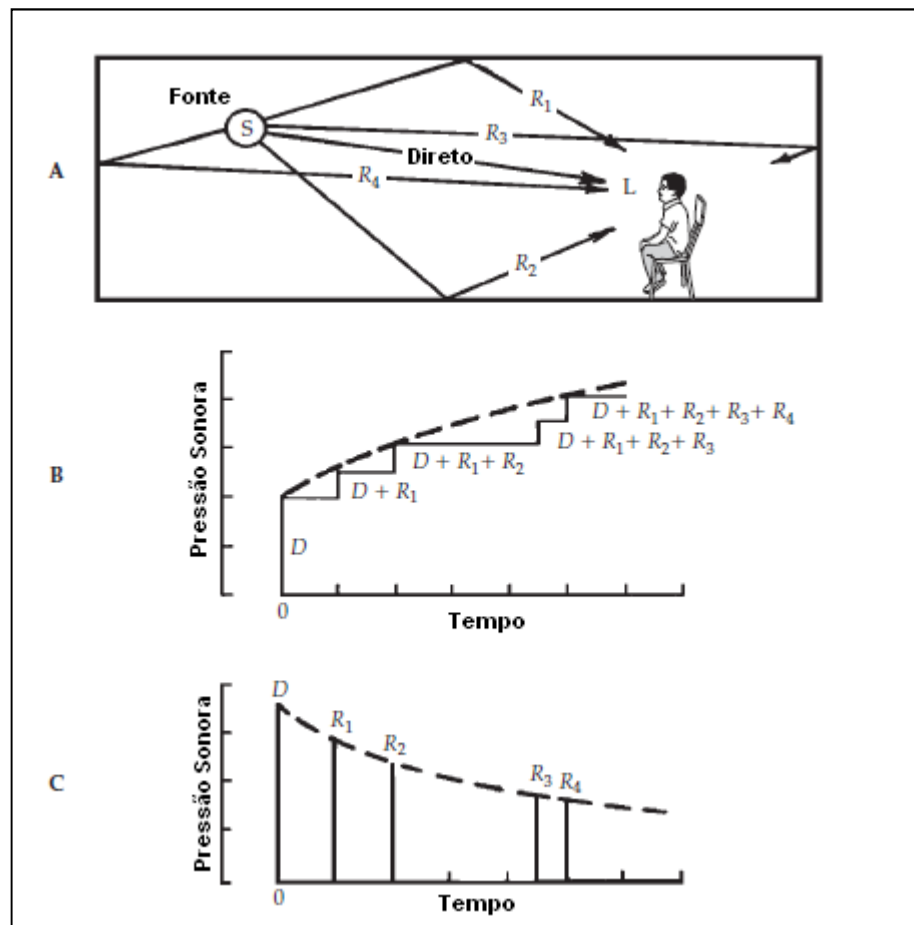


Figura 14 – “Crescimento (B) e Decaimento (C) do Som” [3].

O tempo de reverberação é definido como o tempo que a ambiente leva para absorver o som e decaí-lo em 60 dB do som original depois que o emissor parou de emitir.

Portanto, o tempo de reverberação é função da absorção das paredes. Duas formulações foram propostas para coeficientes de absorção médio de 0 a 0,25 e 0,25 a 1, onde o coeficiente de absorção médio está apresentado abaixo.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum (S_i \cdot \alpha_i)}{\sum S_i} \quad (3.1)$$

Onde:

S_i : Área da superfície i [m^2]

α_i : Coeficiente de absorção da superfície i [Sabin]

As formulações para o tempo de reverberação seguem abaixo.

Para $0 \leq \bar{\alpha} \leq 0,25$

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad (3.2)$$

Onde:

V : Volume da sala [m^3]

RT_{60} : Tempo de Reverberação [s]

A : Absorção total da sala

$$A = \sum (S_i \cdot \alpha_i) \quad (3.3)$$

Para $0,25 \leq \bar{\alpha} \leq 1$

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln (1 - \bar{\alpha})} \quad (3.4)$$

Onde:

S : Área total da sala [m^2]

Como o coeficiente de absorção varia com a frequência do som, é necessário calcular o tempo de reverberação em diferentes faixas de frequência para adequar o ambiente.

3.1.2 Análise Modal

Como já discutido no capítulo 2, ondas sonoras podem sofrer interferências construtivas e destrutivas quando em contato com outras ondas. Em determinadas frequências, o som presente em um ambiente fechado sofre interferência com a própria reflexão, criando um fenômeno denominado ressonância. A figura 15 ilustra esse fenômeno para duas paredes paralelas.

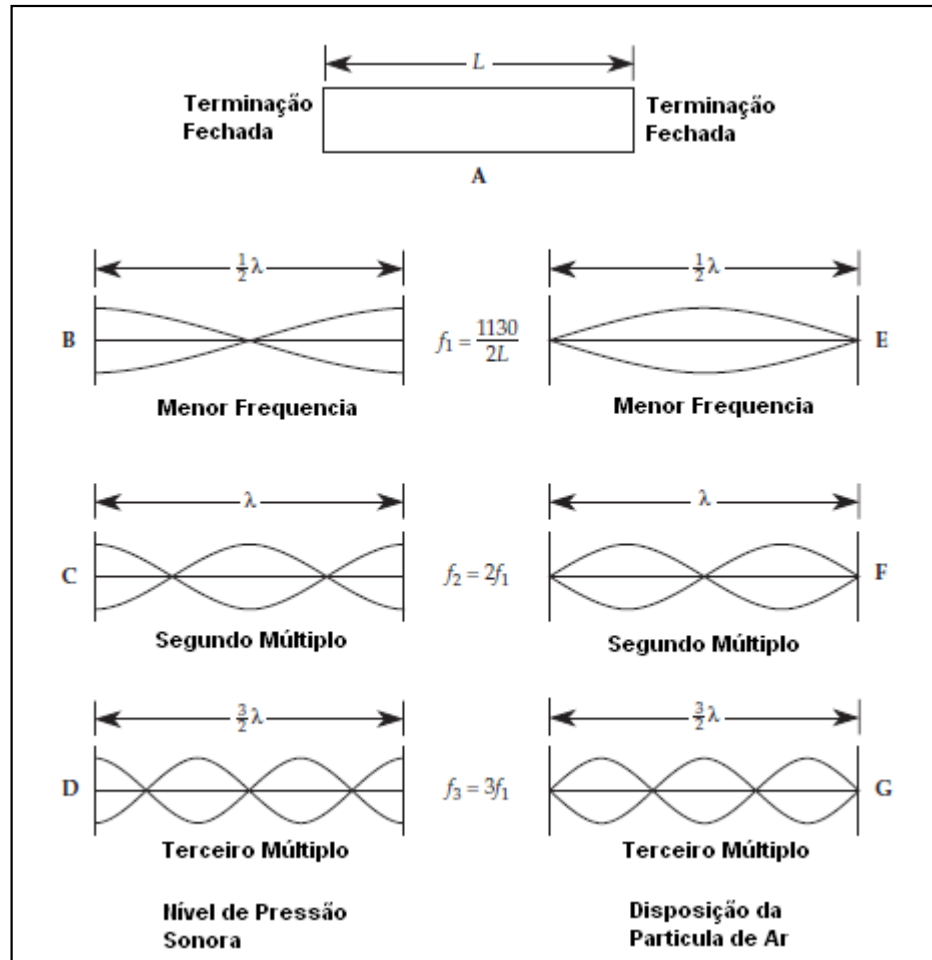


Figura 15 – “Modos de Ressonância” [3].

A distância das duas paredes define as frequências de ressonância quando múltipla da metade dos comprimentos de onda. Para uma sala retangular, as ressonâncias podem ocorrer na combinação dos três pares de paredes paralelas, resultando na formulação abaixo para frequências modais.

$$f = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}} \quad (3.5)$$

Onde:

p, q, r : Números naturais que definem o modo de vibração.

L, W, H : Comprimento, largura e altura da sala respectivamente. [m]

f : Frequencia modal. [Hz]

É possível observar que a quantidade de modos de vibração é elevada conforme a frequência aumenta. Portanto deve-se pensar em dois casos diferentes. O primeiro

deve-se a grande proximidade de frequência em modos de vibração diferentes, o que acarretaria em uma excitação elevada e o aparecimento de picos na resposta em frequência da sala. O segundo caso deve-se a distancia elevada de frequências ressonantes, ocasionando o aparecimento de vales elevados na resposta da sala. Os dois casos correspondem a anomalias causadas pela baixa densidade de modos, ou seja, para baixas frequências (abaixo de 300 Hz). A ausência de modos adjacentes para manter a linearização da resposta em frequência ocasiona as grandes oscilações, e são esses modos que devem ser estudados.

Os modos possuem uma curva de ressonância variando em uma faixa de frequência denominada largura de banda. A largura de banda pode auxiliar na avaliação da distância de modos adjacentes, como mostra a figura 16, e é calculada conforme apresentada abaixo.

$$\Delta f = \frac{2,2}{RT_{60}} \quad (3.6)$$

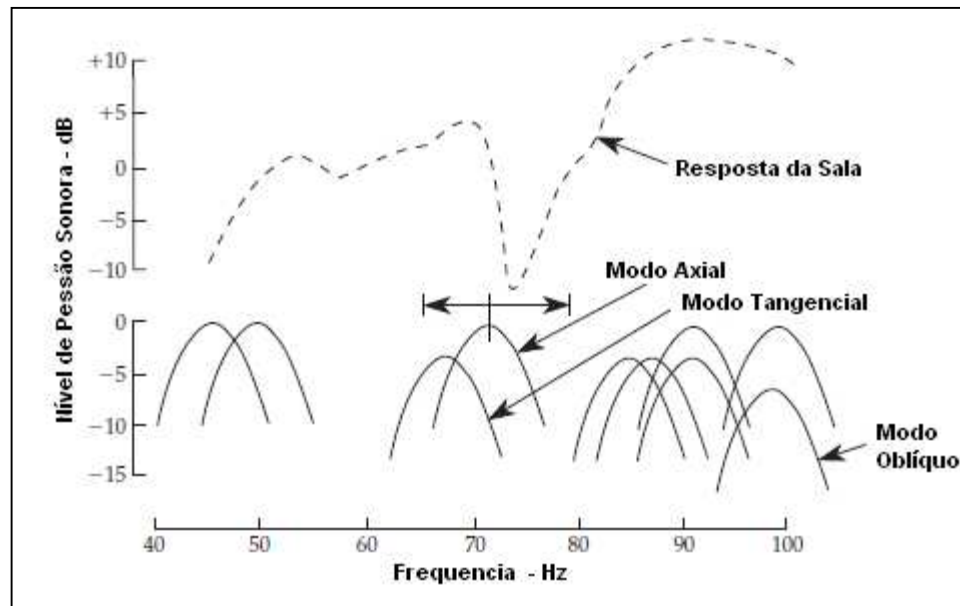


Figura 16 – “Modos de Ressonância e resposta da sala” [3].

Na figura o modo axial possui uma margem de erro devido às dimensões da sala não serem retangulares, porém percebe-se que o pico do modo está perto de 60 Hz ao invés de 70 como mostrado na figura.

3.1.3 Difusão e Dispersão

A qualidade do som presente no ambiente pode ser distinguida também por sua homogeneidade e distribuição uniforme por toda a sala. Essa função esta a cargo dos difusores que são avaliados segundo os coeficientes de difusão e de dispersão.

O coeficiente de difusão avalia a uniformidade do som refletido em todas as direções em certa frequência. A figura 17 ilustra um difusor com os coeficientes de difusão em diversas frequências e as respostas após a reflexão.

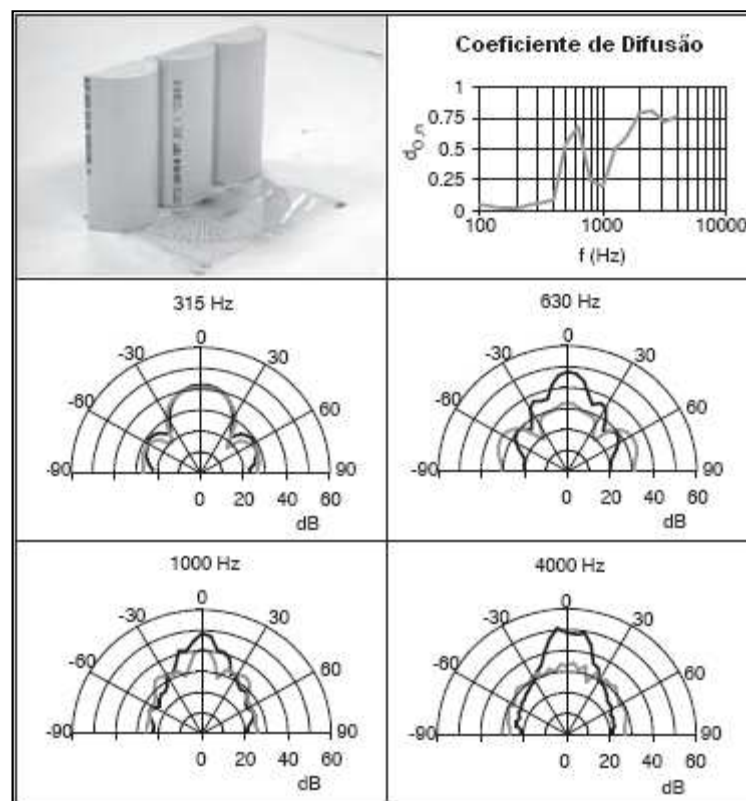


Figura 17 – “Respostas de Coeficientes de Difusão” [2].

Em baixas frequências o coeficiente de difusão é próximo de zero resultando em uma baixa atuação do difusor, semelhante a uma placa plana.

O Coeficiente de dispersão é a fração do som refletido propagado de forma não Linear, como é representado na figura 18.

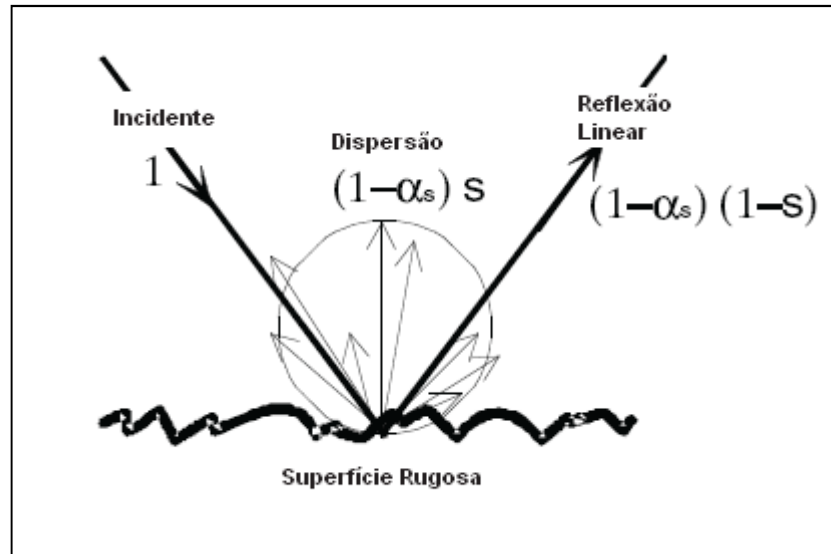


Figura 18 – “Coeficiente de Dispersão” [2].

O uso de difusores é de extrema importância tanto na distribuição do som quanto no auxílio da absorção e na destruição de modos. Os valores de coeficientes são tabelados e adquiridos com fornecedores, e serão demonstrados na aplicação prática do capítulo 4.

3.1.4 Perda de Transmissão e Redução de Ruído

A análise acústica apresentada até o item 3.1.2 refere-se ao tratamento interno de ambientes. Porém, deve-se garantir que não ocorram interferências com o meio externo, tanto para fora quanto para dentro da sala.

Portanto serão consideradas as definições abaixo para mensurar o isolamento acústico onde o som é transmitido do ambiente 1 para o ambiente 2.

NR (Redução de Ruído) [dB]: Diferença do nível de pressão sonora, medida em decibéis, dos dois lados da parede.

$$NR = SPL_1 - SPL_2 \quad (3.7)$$

TL (Perda de Transmissão) [dB]: Decaimento da energia ao ultrapassar uma barreira.

$$TL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (3.8)$$

τ (Coeficiente de transmissão): Relação da energia incidente na parede de um lado com a energia transmitida para o outro lado da parede.

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad (3.9)$$

A Redução de Ruídos pode ser definida como função da Perda de Transmissão através da equação abaixo.

$$NR = TL - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{S_w}{R_2} \right) \quad (3.10)$$

Onde:

S_w : Área da parede. [m²]

R_2 : Constante do segundo ambiente.

$$R_2 = \frac{S_2 \cdot \bar{\alpha}_2}{1 - \bar{\alpha}_2} \quad (3.11)$$

Considerando várias paredes com coeficientes diferentes, o TL deve ser calculado como mostrado abaixo.

$$TL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \tau_i} \right) \quad (3.12)$$

Os valores da Perda de Transmissão podem ser mensurados e, portanto, são pontos de partida para a análise do isolamento acústico. Os métodos de teste para mensurar a Perda de Transmissão em estruturas são padronizados pela norma ASTM E90.

O estudo é dividido em dois grupos, parede única e parede composta. Paredes Únicas possuem a particularidade de se comportarem linearmente com a frequência e a densidade superficial. A figura 19 representa a curva da perda de transmissão para paredes amortecidas. Paredes amortecidas são apuradas como não ressoantes ao

sofrerem impacto. Para obter a perda de transmissão média, utiliza-se a figura 17 assumindo a frequência de 500 Hz.

Verifica-se um aumento de 5 dB quando a frequência ou a densidade superficial é dobrada. Para paredes não amortecidas, a perda por transmissão média pode ser obtida como sendo 5 db inferior ao valor amortecido.

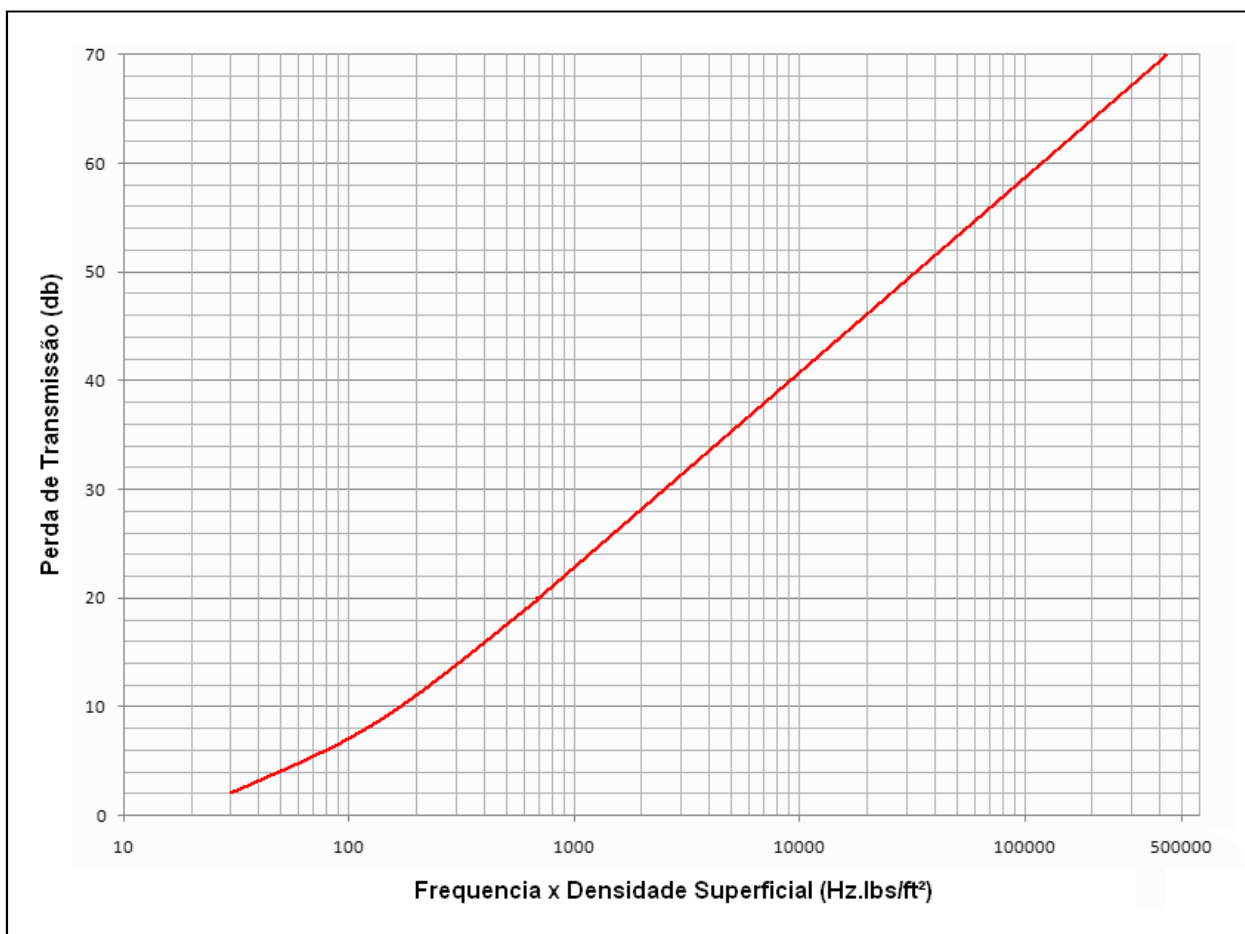


Figura 19 – “Perda de Transmissão para Incidência Aleatória” [7].

A tabela 1 exibe o valor da densidade superficial para alguns materiais com uma polegada de espessura. Portanto, o dobro da espessura resulta no dobro da densidade superficial, pois a massa é dobrada. O comprimento não interfere diretamente no cálculo da perda de transmissão.

Material	Densidade Superficial (lb/ft ²)
Tijolo	10-12
Concreto (Blocos)	8
Concreto	12
Madeira	2-4
Vidro	12,5-14,5
Chumbo	65
Alumínio	14
Aço	40
Gesso	5

Tabela 1 – “Densidade Superficial de Materiais” [7].

O uso de paredes compostas é julgado necessário para reduções de transmissão acima de 40 db. Os valores das perdas de transmissão para paredes compostas são medidos nas frequências de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz, de acordo com a norma ASTM E90. A perda de transmissão média é a média aritmética dos valores sendo denominada Classe de Transmissão Sonora (STC). Os materiais encontrados no mercado utilizam essa denominação para diferenciação. A figura 20 apresenta a perda de transmissão para algumas arranjos montados em paredes de tijolos e concreto com 6” de espessura.

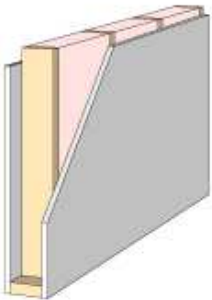
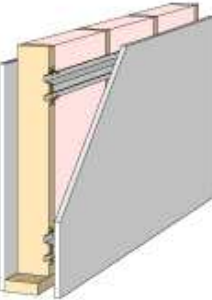
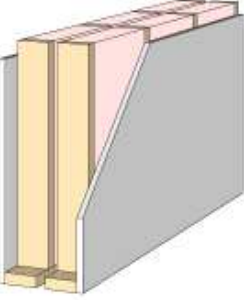
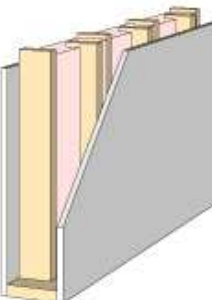
Montagem	Figura	Construção	Profundidade	STC
Montagem Padrão		Drywall RF 5/8" Caibros de Madeira 2"x4" Isolamento de Fibra de Vidro Drywall RF 5/8"	5,25"	Tijolo 57 Concreto 54
Montagem Padrão com QuietClip		Drywall RF 5/8" Caibros de Madeira 2"x4" Isolamento de Fibra de Vidro Quietclips - 7/8" Drywall RF 5/8"	6,125"	Tijolo 65 Concreto 62
Montagem Dupla		Drywall RF 5/8" Caibros de Madeira 2"x4" Isolamento de Fibra de Vidro Espaço de ar 1" Isolamento de Fibra de Vidro Caibros de Madeira 2"x4" Drywall RF 5/8"	10,25"	Tijolo 65 Concreto 62
Montagem Escalonada		Drywall RF 5/8" Caibros de Madeira 2"x4" Isolamento de Fibra de Vidro Caibros de Madeira 2"x4" Drywall RF 5/8"	6,58"	Tijolo 59 Concreto 56

Figura 20 – “Soluções Acústicas para paredes” [8].

Em portas utiliza-se uma montagem semelhante a paredes, porém, por possuir espessura inferior, são colocadas duas portas, uma interna e outra externa.

Em janelas, duas laminas de vidro de 0,5" separadas por um vão de 6" possuem um STC de 59 db. O tratamento nesses casos deve ser concentrado nas junções, utilizando materiais para vedação em todos os cantos e juntas.

CAPITULO 4 – APLICAÇÃO PRÁTICA

Para a aplicação prática foram escolhidas duas salas de uma escola de música, uma destinada a um estúdio de bateria e outra para um aquário de gravação em um estúdio existente.



Figura 22 – “(esquerda) Estúdio de Bateria; (direita) Aquário de Gravação”.

As salas possuem formato adequado para a aplicação da teoria (paralelepípedo) e possuem as dimensões abaixo.

Estúdio:

L (Comprimento) – 5,195 m

W (Largura) – 2,960 m

H (Altura) – 2,675 m

A (Área) – 74,384 m²

V (Volume) – 41,134 m³

Aquário:

L (Comprimento) – 3,230 m

W (Largura) – 1,900 m

H (Altura) – 2,790 m

A (Área) – 40,899 m²

V (Volume) – 17,122 m³

4.1 Tempo de Reverberação

As primeiras análises a serem feitas estão apresentadas na seção 3.1. Primeiramente será definido o tempo de reverberação da sala para a estimativa da absorção total a ser aplicada.

Os ambientes possuem paredes em alvenaria e são somente pintados com tinta comum. O piso do estúdio é composto de carpete de madeira, já o aquário, de azulejo. Abaixo seguem os coeficientes de absorção e os resultados parciais utilizados no cálculo do tempo de reverberação das salas.

Estúdio													
Material	Area	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
	m²	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção
Alvenaria	59,01	0,05	2,95	0,04	2,36	0,02	1,18	0,04	2,36	0,05	2,95	0,05	2,95
Carpete de Madeira	15,38	0,04	0,62	0,04	0,62	0,03	0,46	0,03	0,46	0,03	0,46	0,02	0,31
Total	74,38	3,57		2,98		1,64		2,82		3,41		3,26	
Coefficiente Médio		0,05		0,04		0,02		0,04		0,05		0,04	
Tempo de Reverberação (s)		1,86		2,23		4,03		2,35		1,94		2,03	
												RT60 m (s)	2,41

Tabela 2 – “Tempo de Reverberação do Estúdio”.

Aquário													
Material	Area	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
	m²	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção
Alvenaria	34,76	0,05	1,74	0,04	1,39	0,02	0,70	0,04	1,39	0,05	1,74	0,05	1,74
Azulejo	6,14	0,02	0,12	0,03	0,18	0,03	0,18	0,03	0,18	0,03	0,18	0,02	0,12
Total	40,90	1,86		1,57		0,88		1,57		1,92		1,86	
Coefficiente Médio		0,05		0,04		0,02		0,04		0,05		0,05	
Tempo de Reverberação (s)		1,48		1,75		3,13		1,75		1,43		1,48	
												RT60 m (s)	1,84

Tabela 3 – “Tempo de Reverberação do Aquário”.

Fontes recomendam um tempo de reverberação de 0,3 segundos para estúdios musicais.

Embora ocorram variações nas dimensões internas das salas após o tratamento de ruídos, as diferenças são insignificantes se comparadas com o tamanho da sala, sendo possível calcular a absorção necessária para que seja atingido o tempo de reverberação desejado.

Estúdio:

Desenvolvendo a equação para a absorção média obtém-se a seguinte equação.

$$\bar{\alpha} = 1 - e^{-\frac{0,161 \cdot V}{S \cdot RT_{60}}}$$

$$\bar{\alpha} = 0,257; A = 19,101$$

Aquário:

$$A = \frac{0,161 \cdot V}{RT_{60}}$$

$$\bar{\alpha} = 0,225; A = 9,189$$

As salas devem possuir a absorção total apresentada em todas as frequências para que possuam o tempo de reverberação indicado para seu uso.

4.2 Análise de Transmissão de Ruídos

A Perda de transmissão recomendada para estúdios musicais deve exceder os 60 dB.

Tanto o estúdio quanto o aquário têm paredes compostas basicamente de tijolos de 6" de espessura e 0,5" de massa corrida. Esse arranjo possui STC 50. Ambos têm também pisos e tetos de concreto de 6" com STC 47.

A análise que será feita para o aquário difere da análise do estúdio de bateria, pois não será um emissor de níveis elevados de pressão sonora. Dessa forma, as paredes devem evitar a transmissão de ruído para dentro da sala no caso do aquário, e para fora no estúdio.

O Aquário possui apenas uma parede separando o ambiente interno à um ambiente emissor de níveis elevados de pressão sonora. As demais paredes separam a sala ao ar livre. O estúdio se encontra no térreo, com uma das paredes ligadas à casa vizinha. As demais paredes separam o ambiente e outras salas de aula.

Todas as paredes receberão o mesmo tratamento em relação à transmissão de ruídos, sendo necessária apenas a análise mais crítica de cada sala, ou seja, a transmissão

para a casa vizinha no estúdio, e a transmissão proveniente do estúdio de ensaio no aquário.

Para o cálculo da transmissão de ruído será considerado que a casa vizinha possui pouca absorção, similar à condição do próprio estúdio sem o tratamento acústico, incluindo as dimensões.

A redução de ruído é calculada da seguinte maneira.

$$NR = TL - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{S_w}{R_2} \right)$$

Estúdio: (Cálculo da parede mais crítica):

Sem tratamento:

$$TL = 50$$

$$S_w = 5,195 \cdot 2,675 = 13,897$$

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{\sum \bar{\alpha}_f}{6} = \left(\frac{0,05+0,04+0,02+0,04+0,05+0,04}{6} \right) = 0,04$$

$$R_2 = \frac{S_2 \cdot \bar{\alpha}_2}{1 - \bar{\alpha}_2} = \frac{74,38 \cdot 0,04}{1 - 0,04} = 3,1$$

$$NR = 50 - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{13,897}{3,1} \right) = 43,25 \text{ dB}$$

Com tratamento:

O arranjo utilizado será a montagem padrão com quietclip (STC 65).

Será considerado também que a casa vizinha permanece com absorção baixa.

$$TL = 65$$

$$S_w = 5,195 \cdot 2,675 = 13,897$$

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{\sum \bar{\alpha}_f}{6} = \left(\frac{0,05+0,04+0,02+0,04+0,05+0,04}{6} \right) = 0,04$$

$$R_2 = \frac{S_2 \cdot \bar{\alpha}_2}{1 - \bar{\alpha}_2} = \frac{74,38 \cdot 0,04}{1 - 0,04} = 3,1$$

$$NR = 65 - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{13,897}{3,1} \right) = 58,25 \text{ dB}$$

Aquário: (Cálculo da parede mais crítica):

A parede crítica possui uma janela de vidro de 0,25" de espessura com as seguintes dimensões:

L (Comprimento) – 2 m

H (Altura) – 1 m

STC – 30 dB

Sem tratamento:

$$\tau_{parede} = \frac{1}{10^{\frac{TL}{10}}} = \frac{1}{10^{\frac{50}{10}}} = 0,00001$$

$$\tau_{janela} = \frac{1}{10^{\frac{TL}{10}}} = \frac{1}{10^{\frac{30}{10}}} = 0,001$$

$$TL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \tau_i} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{3,230 \cdot 2,790}{2 \cdot 0,001 + 7,02 \cdot 0,00001} \right) = 36,39 \text{ dB}$$

$$S_w = 3,230 \cdot 2,790 = 9,012$$

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{\sum \bar{\alpha}_f}{6} = \left(\frac{0,05 + 0,04 + 0,02 + 0,04 + 0,05 + 0,05}{6} \right) = 0,042;$$

$$R_2 = \frac{S_2 \cdot \bar{\alpha}_2}{1 - \bar{\alpha}_2} = \frac{40,9 \cdot 0,042}{1 - 0,042} = 1,793$$

$$NR = 36,39 - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{9,012}{1,793} \right) = 29,17 \text{ dB}$$

Com tratamento:

A janela deve ser substituída por uma janela de vidro duplo de 0,5" com um vão de ar de 6", obtendo STC de 59 dB

O arranjo utilizado será a montagem padrão com quietclip (STC 65)

$$\tau_{parede} = \frac{1}{10^{\frac{TL}{10}}} = \frac{1}{10^{\frac{65}{10}}} = 3,16 \cdot 10^{-7}$$

$$\tau_{janela} = \frac{1}{10^{\frac{TL}{10}}} = \frac{1}{10^{\frac{59}{10}}} = 1,26 \cdot 10^{-6}$$

$$TL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \tau_i} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{3,230 \cdot 2,790}{2 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} + 7,02 \cdot 3,16 \cdot 10^{-7}} \right) = 62,80 \text{ dB}$$

$$S_w = 3,230 \cdot 2,790 = 9,012$$

$$\bar{\alpha}_2 = 0,225$$

$$R_2 = \frac{S_2 \cdot \bar{\alpha}_2}{1 - \bar{\alpha}_2} = \frac{40,9 \cdot 0,225}{1 - 0,225} = 11,87$$

$$NR = 62,8 - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{9,012}{11,87} \right) = 62,76 \text{ dB}$$

4.3 Modos de Ressonância

Para a análise dos modos de ressonância das salas foram produzidas as tabelas que seguem abaixo, utilizando a teoria apresentada na seção 3.1. Apenas os modos axiais foram considerados por serem mais relevantes, pois sofrem menos reflexão e, portanto, são menos atenuados

Estúdio:

p	q	r	Frequencia (Hz)	Axial (L)	Axial (W)	Axial (H)	Distância
1	0	0	33,30	x			
0	1	0	58,45		x		25,14
0	0	1	64,67			x	6,23
2	0	0	66,60	x			1,93
3	0	0	99,90	x			33,30
0	2	0	116,89		x		16,99
0	0	2	129,35			x	12,45
4	0	0	133,21	x			3,86
5	0	0	166,51	x			33,30
0	3	0	175,34		x		8,83
0	0	3	194,02			x	18,68
6	0	0	199,81	x			5,79
7	0	0	233,11	x			33,30
0	4	0	233,78		x		0,68
0	0	4	258,69			x	24,91
8	0	0	266,41	x			7,72
0	5	0	292,23		x		25,82
9	0	0	299,71	x			7,48

Tabela 4 – “Frequências Modais Axiais do Estúdio”.

Aquário:

p	q	r	Frequencia (Hz)	Axial (L)	Axial (W)	Axial (H)	Distância
1	0	0	53,56	x			
0	0	1	62,01			x	8,45
0	1	0	91,05		x		29,05
2	0	0	107,12	x			16,07
0	0	2	124,01			x	16,89
3	0	0	160,68	x			36,67
0	2	0	182,11		x		21,42
0	0	3	186,02			x	3,92
4	0	0	214,24	x			28,22
0	0	4	248,03			x	33,79
5	0	0	267,80	x			19,77
0	3	0	273,16		x		5,36

Tabela 5 – “Frequências Modais Axiais do Aquário”.

A largura de banda das salas, para o tempo de reverberação apresentado é 7,3 Hz, indicando que a distância das frequências dos modos mais efetivos (axiais) não deve apresentar grandes variações em torno desse número. As tabelas mostram que a distância máxima não é observada em ambas as salas, sendo necessário o tratamento das frequências críticas. A partir das tabelas também se observa a presença de poucos modos iguais ou muito próximos, o que não acarretaria em frequências com muitos problemas de ressonância.

4.4 Dispersão

O uso de difusores é julgado necessário quando a energia do som deve ser preservada, ou seja, a eliminação dos ecos e reverberações elevadas não se dá com a destruição da energia das ondas sonoras. O objetivo final deve ser a homogeneidade do som em todo o ambiente dada uma fonte pontual. Portanto não serão utilizados difusores no aquário, mas somente no estúdio de bateria, auxiliando também a redução de alguns modos axiais longitudinais, pois o tratamento será feito em apenas uma das paredes de menor área (eixo que possui maior quantidade de modos, totalizando cinco).

Os métodos construtivos de difusores podem variar bastante, interferindo na reposta em frequência e eficiência da difusão. Em muitos casos são calculadas as dimensões do difusor para uma determinada resposta, porém é possível encontrar tabelas dos

valores para diferentes construções e frequências. Deve ser considerado que todo difusor também contribui com a absorção da sala, sendo necessária a contabilização na tabela final de absorção.

A largura da sala é de 2,96 m e, portanto, será utilizado um difusor semi-cilíndrico de quatro períodos, com raio de 0,3 m e 1 cm separando cada período. Será utilizada madeira compensada de 1 cm de espessura. Para auxiliar a absorção o difusor será preenchido com lã de vidro, produzindo respostas como apresentado abaixo.

Difusor Semi-Cilindrico de 4 Períodos (0,3 m)						
Frequencia	125	250	500	1000	2000	4000
Coef. Absorção	0,3	0,42	0,35	0,23	0,19	0,2
Coef. Difusão	0,05	0,09	0,19	0,34	0,49	0,61
Coef. Dispersão	0,22	0,3	0,93	0,87	0,88	0,94
Reflexão Linear	55%	41%	5%	10%	10%	5%

Tabela 6 – “Repostas em Frequência de um Difusor Semi-Cilíndrico”.

A solução selecionada produz uma dispersão de no mínimo 45% do som em baixas frequências para a primeira reflexão. O resultado obtido é um ambiente acusticamente mais distribuído. As demais paredes serão preenchidas com materiais absorvedores de som para que o tempo de reverberação estimado seja atingido.

4.5 Seleção de Materiais

A seleção dos materiais é estimada de acordo com fornecedores, sendo possível a obtenção das tabelas a seguir, baseadas na teoria apresentada no capítulo 3.

Estúdio													
Material	Area	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
	m²	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção
Superfície L1	7,92												
Difusor	6,53	0,30	1,96	0,42	2,74	0,35	2,28	0,23	1,50	0,19	1,24	0,20	1,31
Drywall	1,39	0,10	0,14	0,08	0,11	0,05	0,07	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04
Superfície L2	7,92												
(Sonex) T16; 12; 2,5 cm LR; 0,625 x 0,625	4,69	0,22	1,03	0,50	2,34	0,73	3,42	0,75	3,52	0,45	2,11	0,38	1,78
(Sonex) Illtech Plano; 4; 3,5 cm; 0,625 x 0,625	1,56	0,14	0,22	0,21	0,33	0,61	0,95	0,80	1,25	0,89	1,39	0,92	1,44
Drywall	1,67	0,10	0,17	0,08	0,13	0,05	0,08	0,03	0,05	0,03	0,05	0,03	0,05
Superfície W1	13,90												
(Sonex) Illtech Plano; 16; 3,5 cm; 0,625 x 0,625	6,25	0,14	0,88	0,21	1,31	0,61	3,81	0,80	5,00	0,89	5,56	0,92	5,75
(Sonex) T16; 12; 2,5 cm LR; 0,625 x 0,625	4,69	0,22	1,03	0,50	2,34	0,73	3,42	0,75	3,52	0,45	2,11	0,38	1,78
Drywall	2,96	0,10	0,30	0,08	0,24	0,05	0,15	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09
Superfície W2	13,90												
Porta (madeira); 1 x 2,2	2,20	0,14	0,31	0,10	0,22	0,06	0,13	0,08	0,18	0,10	0,22	0,10	0,22
(Sonex) T16; 8; 2,5 cm LR; 0,625 x 0,625	3,13	0,22	0,69	0,50	1,56	0,73	2,28	0,75	2,34	0,45	1,41	0,38	1,19
(Sonex) Illtech Plano; 12; 3,5 cm; 0,625 x 0,625	7,50	0,14	1,05	0,21	1,58	0,61	4,58	0,80	6,00	0,89	6,68	0,92	6,90
Drywall	1,07	0,10	0,11	0,08	0,09	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Superfície H1	15,38												
(Sonex) Roc; 12; 4,5 cm; 0,625 x 0,625	4,69	0,15	0,70	0,70	3,28	1,00	4,69	0,85	3,98	0,91	4,27	0,90	4,22
(Sonex) Illtech Plano; 12; 3,5 cm; 0,625 x 0,625	4,69	0,14	0,66	0,21	0,98	0,61	2,86	0,80	3,75	0,89	4,17	0,92	4,31
Drywall	6,00	0,10	0,60	0,08	0,48	0,05	0,30	0,03	0,18	0,03	0,18	0,03	0,18
Superfície H2	15,38												
Piso Elevado	15,38	0,40	6,15	0,30	4,61	0,20	3,08	0,17	2,61	0,15	2,31	0,10	1,54
Total	74,38		15,98		22,35		32,16		34,04		31,85		30,82
Coefficiente Médio			0,21		0,30		0,43		0,46		0,43		0,41
Tempo de Reverberação (s)			0,37		0,25		0,16		0,15		0,16		0,17
RT60 m (s)													0,21

Tabela 7 – “Tempo de Reverberação do Estúdio (Acusticamente Tratado)”.

Aquário													
Material	Area	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
	m²	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção	Coef. Abs.	Absorção
Superfície L1	5,30												
(Sonex) T16; 4; 2,5 cm LR; 0,625 x 0,625	1,56	0,22	0,34	0,50	0,78	0,73	1,14	0,75	1,17	0,45	0,70	0,38	0,59
(Sonex) Illtech Plano; 4; 3,5 cm; 0,625 x 0,625	1,56	0,14	0,22	0,21	0,33	0,61	0,95	0,80	1,25	0,89	1,39	0,92	1,44
Drywall	2,18	0,10	0,22	0,08	0,17	0,05	0,11	0,03	0,07	0,03	0,07	0,03	0,07
Superfície L2	5,30												
(Sonex) T16; 4; 2,5 cm LR; 0,625 x 0,625	1,56	0,22	0,34	0,50	0,78	0,73	1,14	0,75	1,17	0,45	0,70	0,38	0,59
Porta (madeira); 1 x 2,2	2,20	0,14	0,31	0,10	0,22	0,06	0,13	0,08	0,18	0,10	0,22	0,10	0,22
Drywall	1,54	0,10	0,15	0,08	0,12	0,05	0,08	0,03	0,05	0,03	0,05	0,03	0,05
Superfície W1	9,01												
(Sonex) Illtech Plano; 4; 3,5 cm; 0,625 x 0,625	1,56	0,14	0,22	0,21	0,33	0,61	0,95	0,80	1,25	0,89	1,39	0,92	1,44
(Sonex) T16; 12; 2,5 cm LR; 0,625 x 0,625	4,69	0,22	1,03	0,50	2,34	0,73	3,42	0,75	3,52	0,45	2,11	0,38	1,78
Drywall	2,76	0,10	0,28	0,08	0,22	0,05	0,14	0,03	0,08	0,03	0,08	0,03	0,08
Superfície W2	9,01												
Janela de Vidro Duplo; 0,5"; 6" Gap; 2 x 1	2,00	0,15	0,30	0,05	0,10	0,03	0,06	0,03	0,06	0,02	0,04	0,02	0,04
(Sonex) Illtech Plano; 8; 3,5 cm; 0,625 x 0,625	3,13	0,14	0,44	0,21	0,66	0,61	1,91	0,80	2,50	0,89	2,78	0,92	2,88
Drywall	3,89	0,10	0,39	0,08	0,31	0,05	0,19	0,03	0,12	0,03	0,12	0,03	0,12
Superfície H1	6,14												
(Sonex) Roc; 8; 4,5 cm; 0,625 x 0,625	3,13	0,15	0,47	0,70	2,19	1,00	3,13	0,85	2,66	0,91	2,84	0,90	2,81
Drywall	3,01	0,10	0,30	0,08	0,24	0,05	0,15	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09
Superfície H2	6,14												
Piso Elevado	6,14	0,40	2,45	0,30	1,84	0,20	1,23	0,17	1,04	0,15	0,92	0,10	0,61
Total	40,90		7,46		10,64		14,73		15,20		13,50		12,81
Coefficiente Médio			0,18		0,26		0,36		0,37		0,33		0,31
Tempo de Reverberação (s)			0,33		0,22		0,15		0,15		0,17		0,18
RT60 m (s)													0,20

Tabela 8 – “Tempo de Reverberação do Aquário (Acusticamente Tratado)”.

De acordo com as tabelas obtidas, os arranjos dos materiais são determinados conforme figuras 23 e 24.

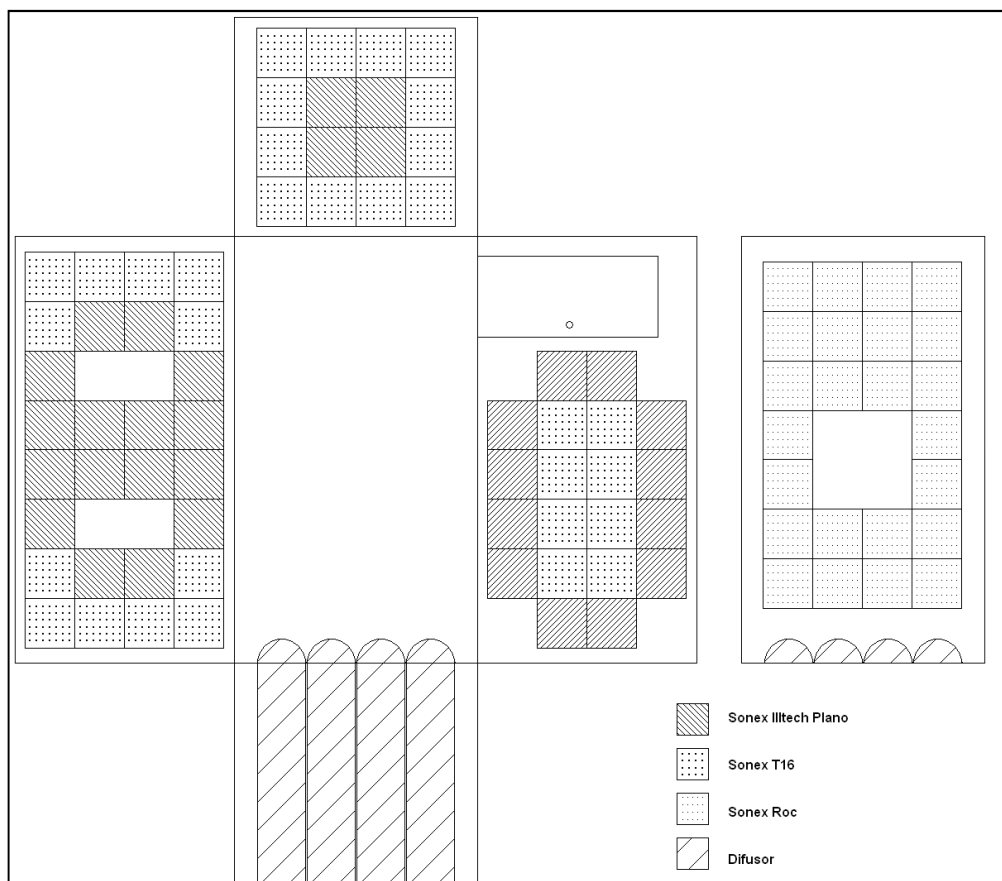


Figura 23 – “Arranjo Acústico do Estúdio”.

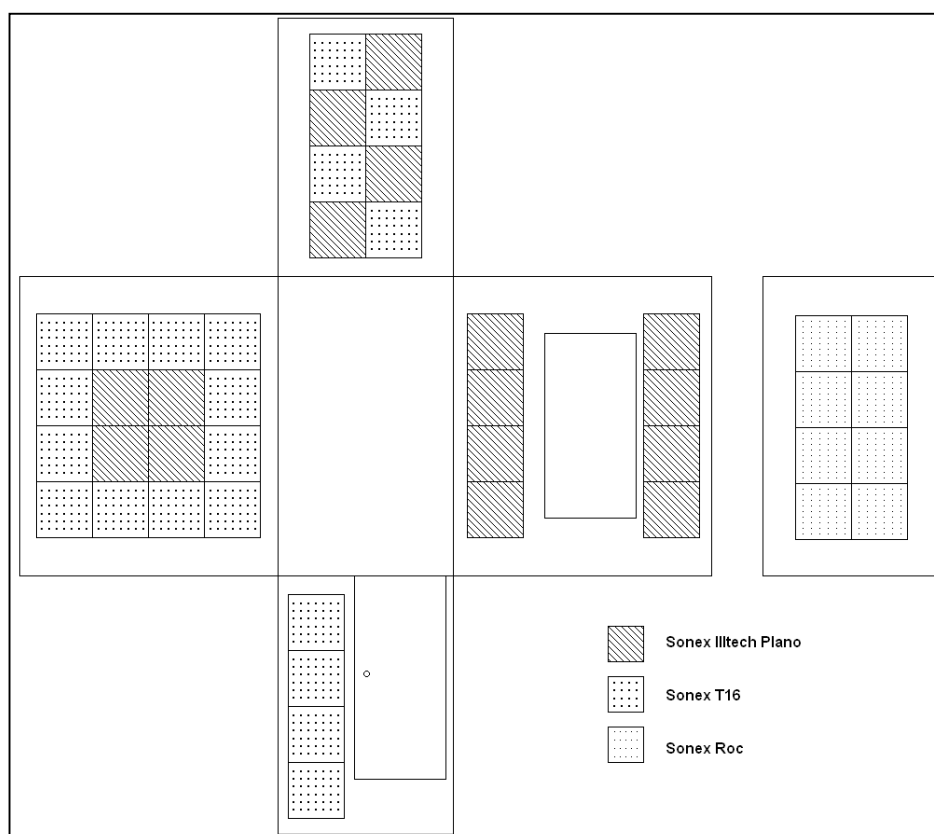


Figura 24 – “Arranjo Acústico do Aquário”.

Curvas dos materiais utilizados:

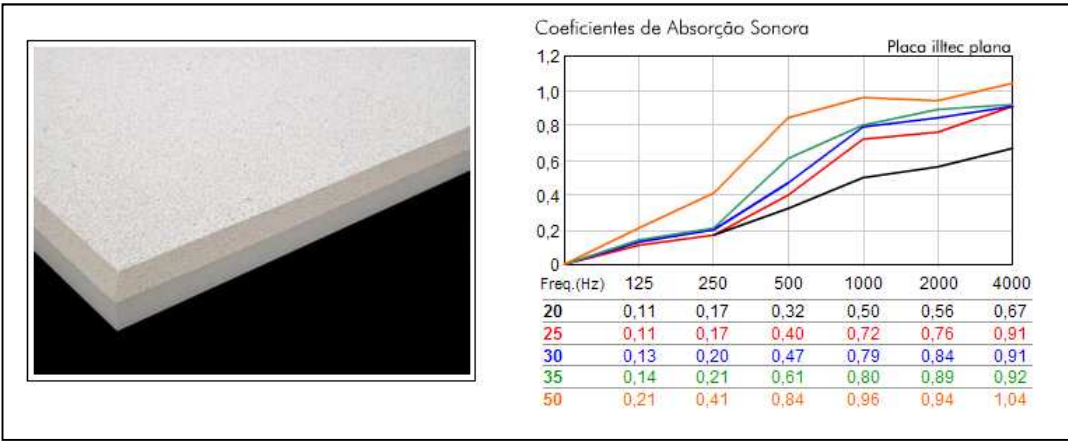


Figura 25 – “Sonex Illtech Plano” [8].

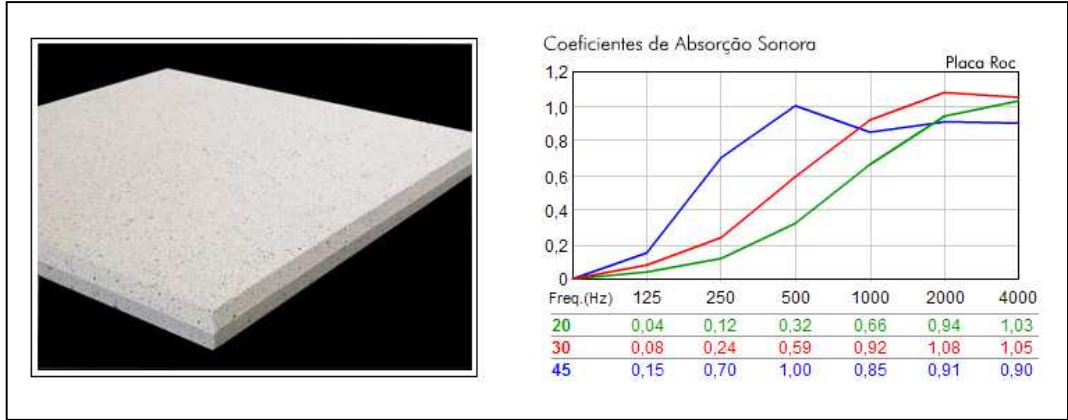


Figura 26 – “Sonex Roc” [8].

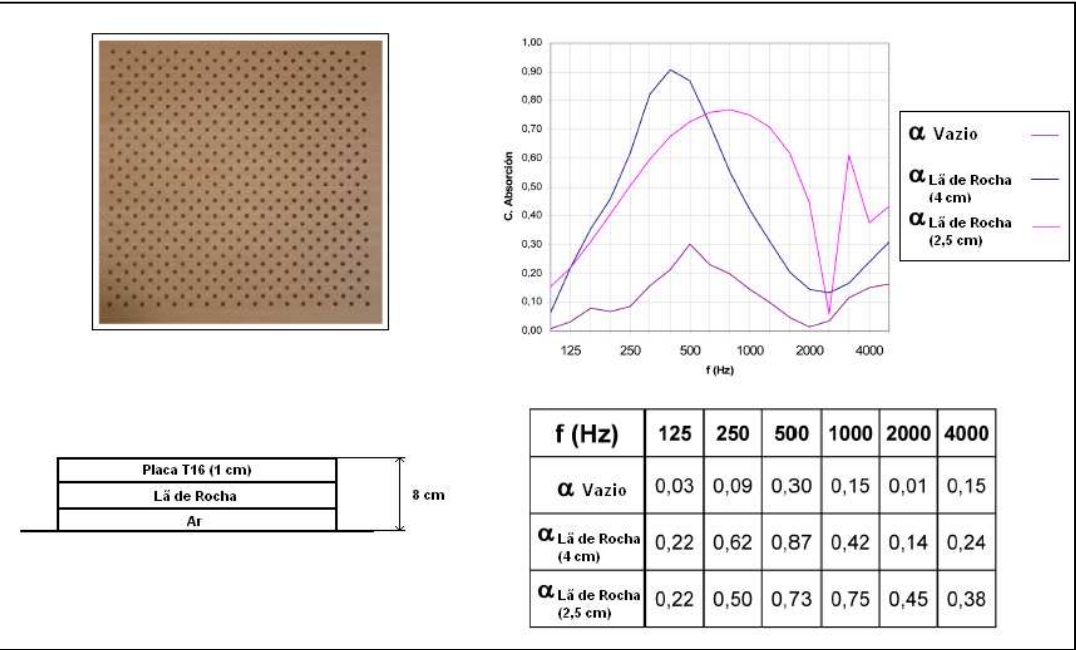


Figura 26 – “Sonex T16” [8].

CAPITULO 5 – CONCLUSÕES

O resultado obtido para o tempo de reverberação condiz com o emprego dos ambientes. Os modos axiais não representam grandes problemas devido às distâncias das bandas serem suficientemente espaçadas, porém é aconselhado o uso de absorvedores de graves para atenuação de algumas frequências críticas. Esses absorvedores devem ser posicionados de acordo com as coordenadas de picos dos modos a serem tratados. Portanto é comum posicioná-los nos cantos das salas, pois a pressão sonora dos modos atinge os valores mais elevados nas paredes.

Os procedimentos da construção das paredes, para o tratamento de ruídos, não foram detalhados, pois fogem do escopo do trabalho. Bibliografia especializada no assunto é facilmente encontrada, assim como catálogos de fornecedores de materiais acústicos e seus respectivos manuais de instalação.

A teoria apresentada no trabalho possui uma variedade de formulações empíricas que proporcionam uma abordagem mais prática do assunto. A acústica pode ser estudada de forma mais teórica, entretanto, seu uso não está de acordo com o escopo das análises apresentadas.

O estudo é restrito às salas retangulares. Qualquer variação na geometria deve ser analisada de forma mais detalhada, com a criação de modelos, emprego de uma teoria mais elaborada ou até mesmo com a utilização de simulações numéricas.

O tratamento acústico de ambientes é muitas vezes baseado na experiência de aplicações anteriores, e pode levar a enganos devido a mitos que são criados por leigos no assunto. Uma análise da teoria derruba esses mitos e comprova a necessidade de um simples estudo do ambiente antes da aplicação prática.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] MÖSER, M. **Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control**. Tradução de Zimmermann, S.; Ellis, R. 2. ed.. Berlin: Springer, 2009.
- [2] COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application**. 2. ed.. London: Taylor & Francis, 2009.
- [3] EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. **Master Handbook of Acoustics**. 5. ed.. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [5] BRUNEAU, M. **Fundamentals of Acoustics**. Tradução de Scelo, T, London: ISTE Ltd, 2006.
- [6] KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics**. 4. ed.. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [7] BERANEK, L. L. **Acoustics**. 2. ed.. New York: Acoustic Society of America, 1993.
- [8] **Sound Isolation Company**. disponível em: <<http://www.soundisolationcompany.com>>.
- [9] **Sonex Acoustic**. disponível em: <<http://www.sonex.com.br>>.