

# ANÁLISE E TRATAMENTO ACÚSTICO PARA ESTÚDIOS MUSICAIS

**Tiago de Almeida Martins**  
**tiago.martins1@gmail.com**

***Resumo.** Este 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.*

## 1. Introdução

A criação de um estúdio musical necessita de 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 a 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.

## 2. 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.

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.

### 2.1 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.

#### 2.1.1 Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação é um parâmetro que analisa a reflexão e absorção do som em ambientes.

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.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum(S_i \cdot \alpha_i)}{\sum S_i} \quad (1)$$

Onde:

$S_i$ : Área da superfície  $i$  [ $m^2$ ]

$\alpha_i$ : Coeficiente de absorção da superfície  $i$  [Sabin]

As formulações para o tempo de reverberação seguem abaixo.

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

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad (2)$$

Onde:

$V$ : Volume da sala [m<sup>3</sup>]

$A$ : Absorção total da sala

$$A = \sum(S_i \cdot \alpha_i) \quad (3)$$

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

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (4)$$

Onde:

$S$ : Área total da sala [m<sup>2</sup>]

$RT_{60}$ : Tempo de Reverberação [s]

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.

### 2.1.2 Análise Modal

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 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.

$$f = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}} \quad (5)$$

Onde:

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

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

$f$ : Frequência 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 1, e é calculada conforme apresentada abaixo.

$$\Delta f = \frac{2,2}{RT_{60}} \quad (6)$$

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 esta perto de 60 Hz ao invés de 70 como mostrado na figura.

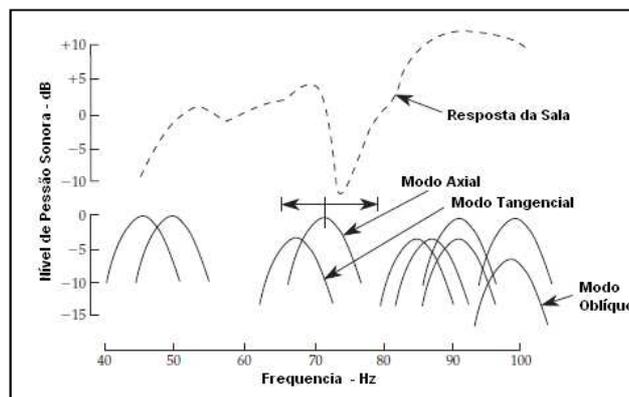


Figura 1 – “Modos de Ressonância e resposta da sala” [3].

### 2.1.3 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 está 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.

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 2.

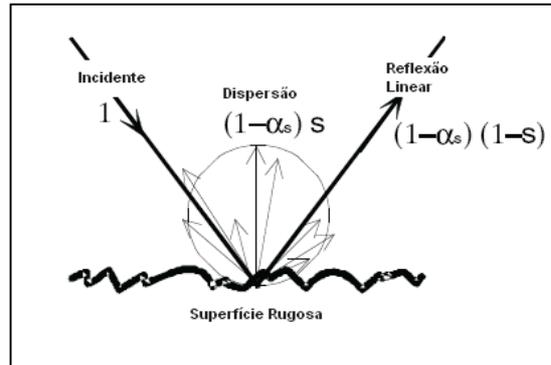


Figura 2 – “Coeficiente de Dispersão” [2].

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.

### 2.1.4 Perda de Transmissão e Redução de Ruído

A análise acústica apresentada nos itens anteriores 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.

$$NR = SPL_1 - SPL_2 \quad (7)$$

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

$$TL = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{\tau} \right) \quad (8)$$

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

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad (9)$$

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

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

Onde:

$S_w$ : Área da parede. [m<sup>2</sup>]

$R_2$ : Constante do segundo ambiente.

$$R_2 = \frac{S_2 \cdot \bar{\alpha}_2}{1 - \bar{\alpha}_2} \quad (11)$$

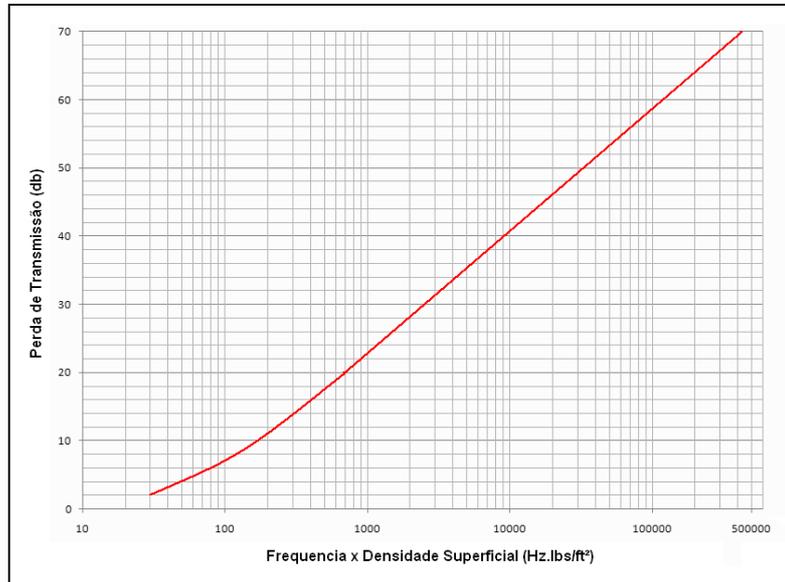
Considerando várias paredes com coeficientes diferentes, o TL deve ser calculado como mostrado abaixo.

$$TL = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{S}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \tau_i} \right) \quad (12)$$

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 3 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 3 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.



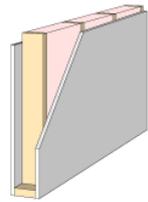
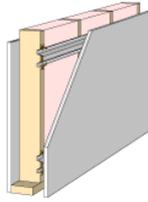
**Figura 3** – “Perda de Transmissão para Incidência Aleatória” [7].

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 <sup>2</sup> )
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 4 apresenta a perda de transmissão para alguns 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

**Figura 4** – “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.

### 3. 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.

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

Dimensões	Estúdio	Aquário
L (Comprimento)	5,195 m	3,230 m
W (Largura)	2,960 m	1,900 m
H (Altura)	2,675 m	2,790 m
A (Área)	74,384 m <sup>2</sup>	40,899 m <sup>2</sup>
V (Volume)	41,134 m <sup>3</sup>	17,122 m <sup>3</sup>

**Tabela 2** – “Dimensões das Salas”.

#### 3.1 Tempo de Reverberação

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.

Material	Estúdio												
	Área	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
	m <sup>2</sup>	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 3** – “Tempo de Reverberação do Estúdio”.

Material	Area m <sup>2</sup>	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
		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 4 – “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.

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

$\bar{\alpha} = 0,257$  Sabin;  $A = 19,101$  m<sup>2</sup>

#### Aquário:

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

$\bar{\alpha} = 0,225$  Sabin;  $A = 9,189$  m<sup>2</sup>

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

### 3.2 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:

$$L \text{ (Comprimento)} - 2 \text{ m}$$

$$H \text{ (Altura)} - 1 \text{ m}$$

$$STC - 30 \text{ dB}$$

Sem tratamento:

$$\tau_{parede} = \frac{1}{\frac{TL}{10^{10}}} = \frac{1}{\frac{65}{10^{10}}} = 0,00001$$

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

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

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

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

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

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

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)

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3 Modos de Ressonância

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

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”.

Estúdio:

p	q	r	Frequência (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 6** – “Frequências Modais Axiais do Estúdio”.

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.

**3.4 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 resposta 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-Cilíndrico de 4 Períodos (0,3 m)						
Frequência	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 7** – “Respostas 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.

**3.5 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.

De acordo com as tabelas obtidas, os arranjos dos materiais são determinados conforme figuras 5 e 6.

Estúdio													
Material	Área m <sup>2</sup>	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
		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
Coeficiente 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 8 – “Tempo de Reverberação do Estúdio (Acusticamente Tratado)”.

Aquário													
Material	Área m <sup>2</sup>	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
		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
Coeficiente 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 9 – “Tempo de Reverberação do Aquário (Acusticamente Tratado)”.

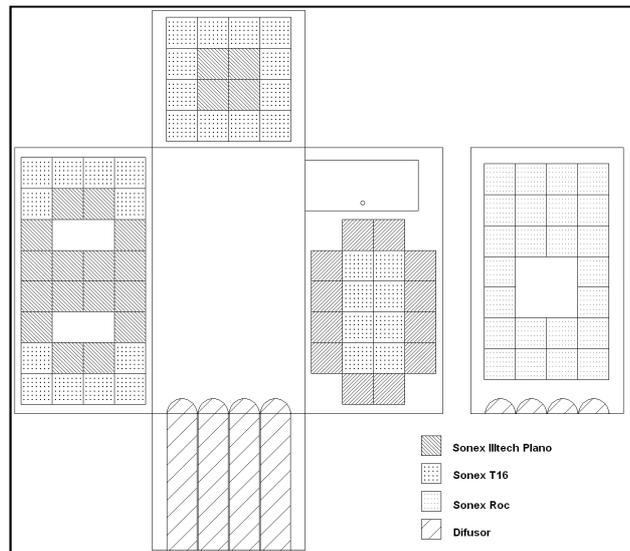


Figura 5 – “Arranjo Acústico do Estúdio”.

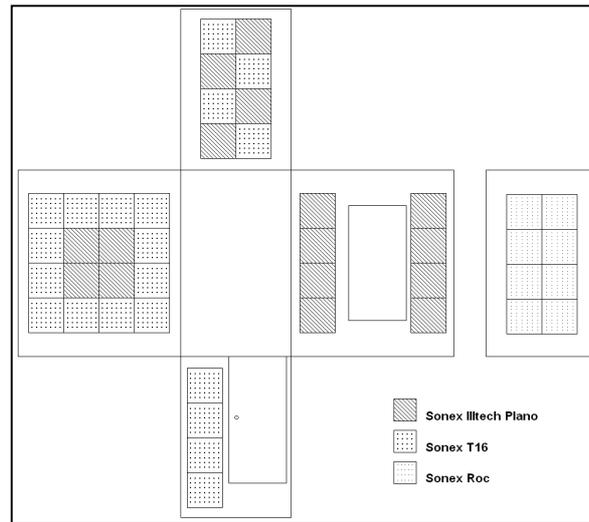


Figura 6 – “Arranjo Acústico do Aquário”.

#### 4. 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.

#### 5. Referências

- [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>>.

#### ACOUSTIC ANALYSIS AND TREATMENTS FOR MUSIC STUDIOS

**Tiago de Almeida Martins**  
**tiago.martins1@gmail.com**

**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.