

***Instituto de Matemática e Estatística da USP***  
Tópicos em Ciência da Computação

Aluno: Alfredo Roberto Junior  
Orientador: Flávio Soares Corrêa da Silva  
São Paulo, Junho de 2004

***Acústica em Quartos Cubóides***

# Índice

1.	Introdução .....	3
2.	Física de ondas.....	4
2.1	ELEMENTOS DA ONDA SONORA .....	4
2.1.1	<i>Frequência</i> .....	4
2.1.2	<i>Forma da Onda</i> .....	5
2.1.3	<i>Amplitude</i> .....	6
3.	Propagação da Onda Sonora.....	7
3.1	COMPRESSIBILIDADE E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA EM DIFERENTES MEIOS.....	7
3.2	POTÊNCIA SONORA E INTENSIDADE ENERGÉTICA.....	8
3.3	SENSAÇÃO AUDITIVA .....	8
4.	Fenômenos Relativos a Propagação da Onda.....	10
4.1	IMPEDÂNCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA.....	10
4.2	REFLEXÃO E REFRAÇÃO .....	10
4.3	ABSORÇÃO DO SOM .....	11
4.3.1	<i>Frequência</i> .....	12
4.3.2	<i>Espessura</i> .....	12
4.3.3	<i>Fracionamento</i> .....	13
4.3.4	<i>Pintura</i> .....	13
4.3.5	<i>Disposição</i> .....	13
4.4	INTERFERÊNCIA .....	13
4.5	BATIMENTO .....	14
4.6	DIFRAÇÃO DO SOM .....	15
4.7	RESSONÂNCIA.....	16
4.8	DISTORÇÃO.....	16
4.9	ECO.....	17
4.10	REVERBERAÇÃO .....	17
5.	Qualidade do Som Ouvido e Teoria Psicoacústica.....	19
6.	Conclusão.....	23
7.	Bibliografia .....	24

## ***1. Introdução***

Este estudo tem por finalidade relatar o conhecimento adquirido em relação ao tema de pesquisa “Acústica em Quartos Cubóides”, sendo neste documento relatado o desenvolvimento mais específico do tópico de ondas sonoras bem como a leitura qualitativa de tais ondas dentro de uma sala. O estudo começa caracterizando alguns elementos cruciais no tema em questão (nada sonora, timbre, amplitude, reverberação, entre outros) valorizando mais adiante os modos pelos quais estes elementos são levados em conta para uma análise acústica adequada dentro de um quarto cubóide (tempo de reverberação, vivacidade, brilho).

## 2. *Física de ondas*

O som é resultado das vibrações dos corpos elásticos, quando essas vibrações se verificam em determinados limites de frequências (vibrações sonoras). Tais vibrações se transmitem ao meio que circunda o corpo sonoro (fonte sonora), produzindo compressões e distensões sucessivas (deformações transitórias), que se propagam com velocidade uniforme em todas as direções se a propriedade elástica do meio é igual em todos os seus pontos (meio isótopo).

Como todo movimento material, o som possui certa energia que ao encontrar resistência ao seu deslocamento é restituída ao meio circundante (resistência resultante da viscosidade, obstáculos, por exemplo). A restituição pode acontecer de duas formas, seja a onda passando parte de sua quantidade de movimento para o obstáculo, o qual passa a entrar em vibração; seja transformando parte de sua energia cinética em calor.

### 2.1 Elementos da Onda Sonora

A onda longitudinal de pressão ocasionada pela fonte sonora toma o nome de onda sonora, tal onda apresenta uma série de características que servem para qualificá-la:

- **Altura**, relacionada com a seqüência das vibrações sonoras, isto é, com a frequência do som e nos diz se um som é agudo ou grave;
- **Timbre**, relacionado diretamente com a composição da harmônica da onda sonora, ou seja, sua forma, permitindo que identifiquemos a procedência do som (vindo de uma pessoa, instrumento musical ou qualquer outra fonte sonora);
- **Intensidade**, relacionada com a amplitude da onda, caracteriza a variação de pressão do meio em que se verifica a sua propagação. A intensidade do som é medida através da intensidade sonora, propagada por unidade de superfície (intensidade energética).

#### 2.1.1 Frequência

Frequência de uma onda sonora é o número de vibrações completas (ciclos) realizados pela mesma em um segundo.

- A unidade utilizada para medir tal característica da onda é o hertz (Hz) que corresponde a uma vibração completa (ciclo) por segundo;
- Entende-se ciclo como sendo a totalidade de variações de pressão, iniciando no zero, passando por todos os valores positivos e negativos possíveis (crescente e decrescente) e terminando no zero novamente.

- A frequência da onda sonora é igual àquela da fonte;
- Os limites de audição para o órgão auditivo humano estão entre 16 e 3000 Hz;
- A frequência de onda sonora caracteriza a qualidade denominada *altura da som*;
- O inverso da frequência, o tempo necessário para efetuar uma onda completa de oscilação recebe o nome de *período*;

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{seg/ciclos}$$

- A relação entre velocidade de propagação do som  $c$  em m/s e a frequência  $f$  em ciclos/segundos nos dá o comprimento de onda  $\lambda$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{m/ciclo}$$

### 2.1.2 Forma da Onda

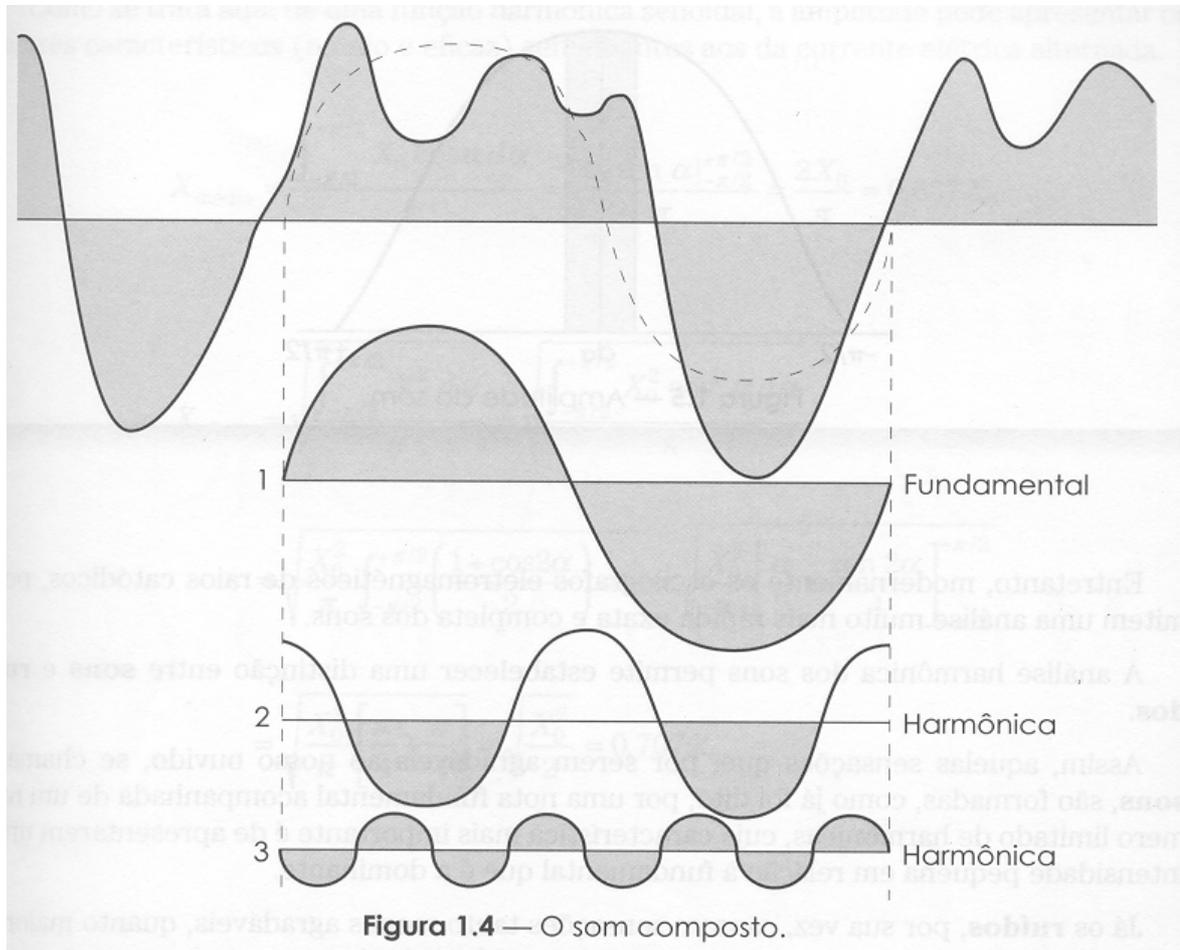
Caso registremos num sistema de coordenadas cartesianas os deslocamentos das partículas do meio como efeito das oscilações sonoras, em função do tempo, obteremos uma função periódica que traduzirá a forma da onda. Trata-se de um movimento harmônico que obedece a seguinte equação:

$$X = X_0 \cos(a) = X_0 \cos(\omega \cdot t) = X_0 \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$a$  = caminho angular percorrido;  
 $\omega$  = velocidade angular;  
 $f$  = frequência;  
 $X_0$  = amplitude ou alongação máxima da oscilação;  
 $t$  = tempo percorrido;

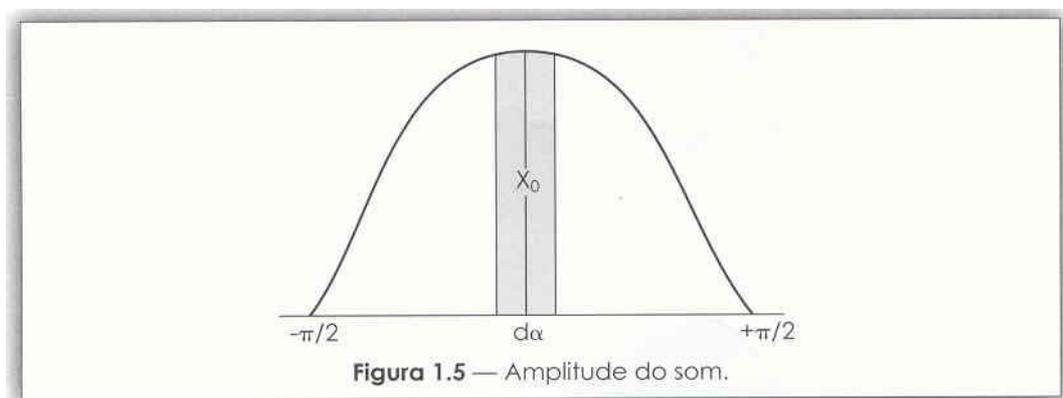
Os sons comuns são geralmente compostos, resultantes da superposição de vários sons simples; um desses marcado por ter maior intensidade e cuja frequência caracterizará a altura do som resultante, denominado fundamental, os demais sons tem suas intensidades menores e suas frequências são múltiplas da do som fundamental, denominados de harmônicos.

Do número e da intensidade dos harmônicos depende o timbre do som, que nos permitirá diferenciar a procedência do som.



### 2.1.3 Amplitude

Amplitude de uma onda sonora é o maior ou o menor deslocamento atingido pelas partículas do meio em virtude das oscilações que a formaram.



### 3. Propagação da Onda Sonora

A propagação da onda sonora se dá pela vibração elástica (mecânica) dos meios ponderáveis ou corpos de uma maneira geral, sejam estes líquidos, sólidos ou aeriformes. A análise de ondas elásticas longitudinais (planas) num meio compressível, contínuo e isótopo é onde se enquadra o objetivo deste estudo pois desta forma acaba caindo na aplicação direta dos problemas acústicos de quartos cubóides, onde consideramos as ondas planas (hipótese de que a fonte sonora esteja num plano infinito), simplificação funcional somente em ondas caracterizadas por pequenos deslocamentos na amplitude, característica de sons e rumores comuns.

#### 3.1 Compressibilidade e Velocidade de Propagação da Onda em Diferentes Meios

A compressibilidade ou elasticidade de um corpo é a característica pela qual o mesmo sofre variações de volume sobre a ação de variações da pressão externa.

$$A = -\frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dp} \quad (\text{compressibilidade})$$

$$E = -v \cdot \frac{dp}{dv} \quad (\text{elasticidade})$$

$$E = \frac{1}{A}$$

$v$  = volume específico em  $m^3/Kg$  ;

$p$  = é a pressão em  $N/m^2$  ;

Na propagação das ondas de pressão nos gases teríamos com boa aproximação

$$E = kp$$

$k = 1,4$  (coeficiente de Poisson);

A velocidade de propagação do som nos meios sólidos e líquidos segue a seguinte fórmula

$$c = \sqrt{E\nu}$$

Enquanto nos meios gasosos, sendo  $E = kp$ , temos

$$c = \sqrt{kp\nu}$$

### 3.2 Potência Sonora e Intensidade Energética

Na propagação de uma onda sonora a potência apresentada pela mesma deve-se a energia cinética de vibração de suas partículas e é dada por

$$W = \frac{Sp^2}{c\rho}$$

S = superfície onde as partículas entram em vibração;  
P = pressão em N/me<sup>2</sup>;  
c = velocidade do som;  
 $\rho$  = massa específica;

A potência da onda sonora, por unidade de superfície, toma o nome de intensidade energética I, e é dada por

$$I = \frac{W}{S} = \frac{p^2}{c\rho}$$

Onde  $c\rho$ , tal produto, conota uma resistência ao fluxo da onda sonora e toma o nome de *impedância acústica específica Z*.

### 3.3 Sensação Auditiva

Sensação auditiva caracteriza-se por ser a maior ou menor impressão causada em nosso ouvido pelo som. Para cada frequência, ao aumentar a pressão sonora eficaz, cresce a sensação auditiva, desde zero na linha de audibilidade até um máximo na linha limite de dor, conforme a lei de *Característica de Audição para a Frequência Dada*.

A avaliação da sensação auditiva baseia-se na lei de Fechner Weber, a qual diz que para todas as sensações, a mínima variação de estímulo necessária para produzir uma variação de sensação perceptível, é proporcional ao estímulo já existente

A fórmula da *sensação auditiva convencional* ou *nível sonoro* para uma frequência de referencia de 1000Hz é dada por

$$S = \frac{1}{k \ln \frac{I}{I_0}} = \frac{2,303}{k \log \frac{I}{I_0}}$$

$I_0$  = intensidade energética do limite de audição;

$I$  = intensidade energética qualquer;

É bom notarmos que a sensação auditiva é diretamente proporcional ao logaritmo da intensidade energética ( $I$ ) que, por sua vez, é inversamente proporcional à superfície  $S$  e, portanto, ao quadrado da distância  $D$  do observador à fonte.

Como último ponto definimos *sensação sonora equivalente* como o nível sonoro de um som puro de frequência igual a 1000Hz, que produz no ouvido o mesmo efeito do som puro de frequência qualquer em exame. Sua fórmula é dada por

$$S_e = 10 \log \epsilon \frac{I}{I_0}$$

## 4. Fenômenos Relativos a Propagação da Onda

Quando estudamos a onda sonora dentro de um quarto, desde sua emissão até sua chegada em um ponto de escuta, estamos entrando diretamente num grande conjunto de fenômenos que podem modificar seu efeito final na sensação auditiva, trazendo desta forma, conseqüências na qualidade do som ouvido, seja distorcendo ou evidenciando este último.

### 4.1 Impedância Acústica Específica

Impedância acústica específica é a relação entre a pressão da onda sonora e a velocidade de vibração das partículas, sendo dada pela fórmula,

$$z = \frac{P}{C}$$

P = pressão da onda;

C = velocidade de vibração das partículas;

### 4.2 Reflexão e Refração

Ao encontrar um obstáculo a onda sonora que está incidindo tem sua energia sonora dividida em duas partes, uma que penetra no meio (obstáculo - absorvida pelo meio) e outra que é refletida. Se o meio é ilimitado a energia absorvida pelo mesmo é totalmente transformada em calor, porém se o meio tem uma espessura limitada parte da energia se transmitirá por refração.

Chamando de  $I_i$  a intensidade energética incidente,  $I_r$  a intensidade energética refletida,  $I_a$  a intensidade absorvida e  $I_t$  a intensidade refratada temos as seguintes relações:

$$I_i = I_r + I_a + I_t$$

$$\frac{I_r}{I_i} + \frac{I_a}{I_i} + \frac{I_t}{I_i} = r + a + t = 1$$

r = coeficiente de reflexão;

a = coeficiente de absorção;

t = coeficiente de refração;

TABELA 3-2 — Coeficiente de transmissão e reflexão do som nos diversos meios, em relação ao ar			
Meio	Z	r	t
Ar	412,80	0	1
Anidrido carbônico	530,64	0,01560	0,98440
Vapor de água	251,40	0,05900	0,94100
Aço	38.922.000	0,99998	0,00002
Alumínio	13.834.550	0,99988	0,00012
Chumbo	14.938.600	0,99989	0,00011
Vidro sódico	12.500.000	0,99987	0,00013
Rocha	6.250.250	0,99974	0,00026
Mármore	9.880.000	0,99983	0,00017
Alvenaria	7.656.000	0,99978	0,00022
Tijolos	6.570.000	0,99975	0,00025
Pinho // à fibra	2.788.000	0,99941	0,00059
Pinho  _ à fibra	850.920	0,99806	0,00194
Cortiça	120.000	0,98633	0,01367
Borracha	49.680	0,96731	0,03269
Água do mar	1.549.120	0,99894	0,00106
Água destilada	1.461.000	0,99887	0,00113

### 4.3 Absorção do Som

A absorção do som se dá quando parte da energia da onda sonora incidente numa superfície sólida é absorvida devido a viscosidade do ar ou atrito direto com esta superfície. Levando em conta o raio do poro do material absorvente podemos chegar a seguinte fórmula,

$$a = 1 - \frac{2M^2 - 2M + 1}{2M^2 + 2M + 1}$$

onde

$$M = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{u}{2\pi f \rho}}$$

R = raio do poro m;

u = coeficiente de viscosidade do ar em  $\text{Kg}/\text{ms}$ ;

f = freqüência em Hz;

$\rho$  = massa específica em  $\text{Kg}/\text{m}^3$ ;

Materiais com poros bem pequenos, da ordem de milímetros, tem a inércia do ar contido neles impedindo parte da absorção e fazendo com que a porção de energia refletida seja maior. Além da dimensão dos poros, fatores como freqüência, espessura, pintura superficial, disposição adotada para o obstáculo, podem influenciar no valor do coeficiente de absorção de um determinado material.

TABELA 3-3 — Coeficiente de absorção do som no feltro, em função da freqüência	
Freqüência Hz	$\alpha$
200	0,62
400	0,72
800	0,80
1.600	0,83
3.200	0,80
6.400	0,72

#### 4.3.1 Freqüência

Muitos materiais absorventes apresentam um coeficiente de absorção variável com a freqüência o que pode muitas vezes impossibilitar um resultado sonoro adequado na sala em questão, principalmente quando o som resultante deve ser formado por diferentes valores de freqüências, por exemplo, um show de uma orquestra.

#### 4.3.2 Espessura

O aumento da espessura do material absorvente pode aumentar o coeficiente de absorção do mesmo, sobretudo para baixas freqüências, porém este fenômeno se

faz mais presente quando o material em questão é o "feltro", sendo notado com menor intensidade nos demais materiais encontrados no mercado (aqueles à base de fibra, madeira aglomerada).

#### 4.3.3 Fracionamento

Quando o material absorvente usado é subdividido em painéis o conjunto apresenta um coeficiente de absorção maior, tanto pelo aumento da superfície exposta ao som quanto pelos interstícios criados com sua separação, o que acaba introduzindo irregularidades de densidade e de elasticidade facilitando a absorção sonora nos bordos.

#### 4.3.4 Pintura

A pintura de superfícies com materiais como verniz e esmalte pode acarretar na diminuição da capacidade de absorção da mesma em até 30% (materiais presentes principalmente em acabamentos), porém existem tintas solúveis em água, que por serem permeáveis não influenciam tanto na absorção de materiais.

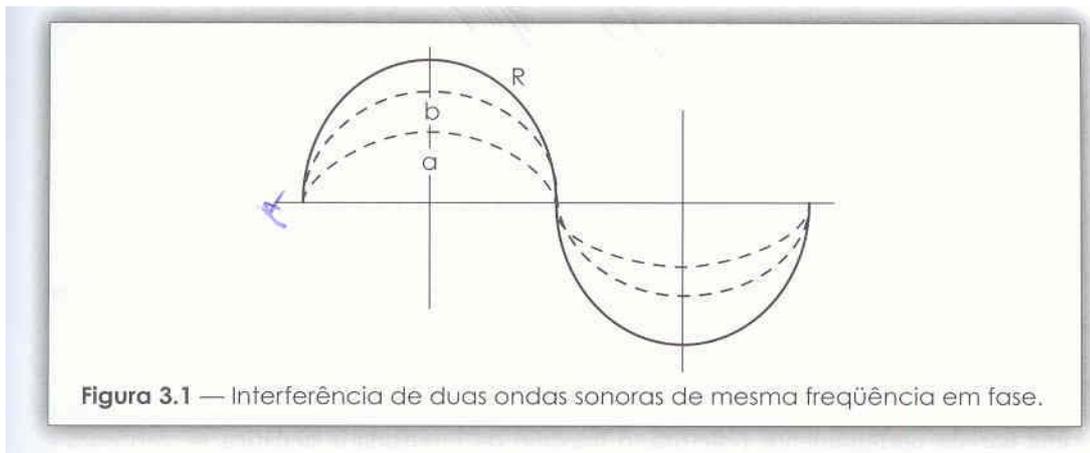
#### 4.3.5 Disposição

Têm-se recorrido ao uso de painéis vibrantes (metálicos ou de madeira compensada) colocados afastados das paredes a revestir com o material de revestimento por trás. Tais painéis trabalham como ressonadores onde a frequência fundamental será  $344/2l$  (onde  $l$  é a largura do painel), aumentando a absorção destas frequências que por refração atingem o espaço entre os painéis e a parede.

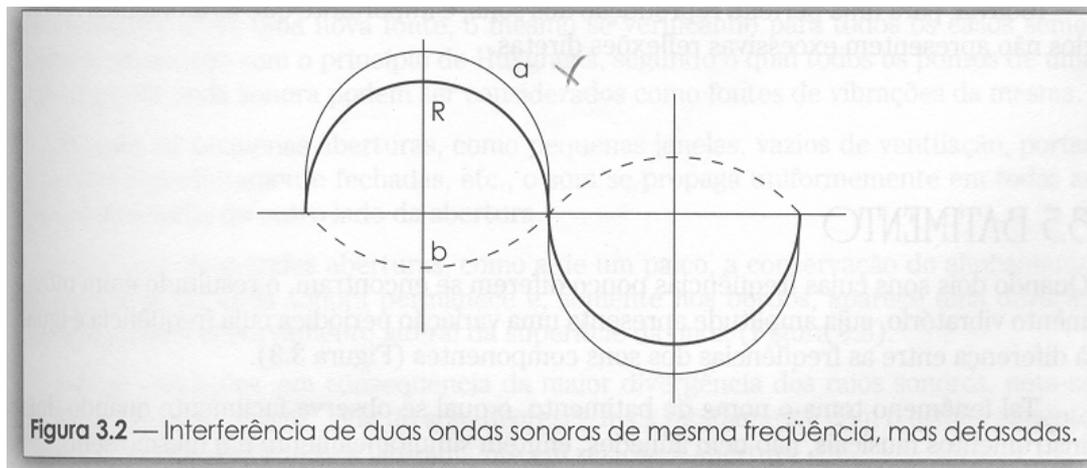
#### 4.4 Interferência

Interferência é o encontro de duas ondas sonoras. Sendo elas da mesma frequência, dois casos podem ser observados:

- quando as ondas sonoras estão em fase (as compressões e as distensões se verificam no mesmo ponto), o movimento resultante apresentará uma amplitude que será igual a soma das amplitudes dos movimentos componentes;



- quando as ondas estão em oposição de fase, a amplitude resultante será igual à diferença entre as amplitudes das ondas componentes.



Os sons em um recinto fechado resultam da composição de vários movimentos vibratórios refletidos com o movimento direto da fonte e, sua amplitude variará de ponto para ponto, fato de grande importância na acústica dos ambientes.

#### 4.5 Batimento

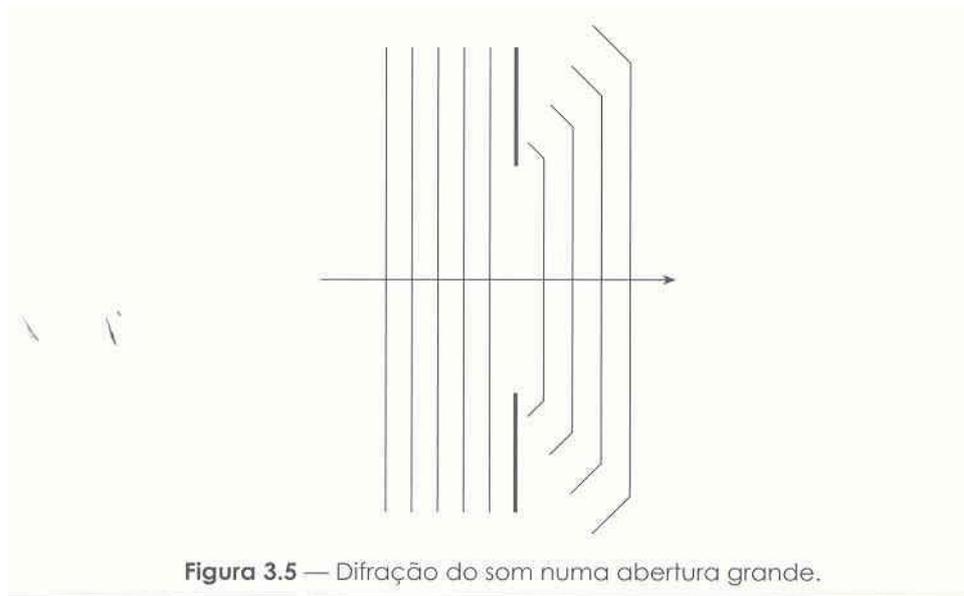
O batimento ocorre quando dois sons de frequências semelhantes se encontram e o movimento vibratório resultante apresenta uma variação periódica cuja frequência é igual a diferença entre as frequências de seus componentes.



#### 4.6 Difração do Som

Experiências mostram que um obstáculo de pequenas dimensões não altera de modo sensível a qualidade do som dado que a onda sonora contorna tal obstáculo. Quando uma onda sonora passa por uma abertura de dimensão pequena em relação ao comprimento da onda a pequena porção de superfície da onda que passa pela abertura comporta-se como uma nova fonte e o som se propaga uniformemente em todas as direções do outro lado de tal abertura. Já no caso de grandes aberturas, como a de um palco, a conservação do alinhamento da superfície da onda sonora se mantém e, somente nos bordos da onda a difração se faz sensível.





#### 4.7 Ressonância

Um corpo pode entrar em vibração quando recebe do meio circundante vibrações elásticas, chamada "vibração forçada", porém tais vibrações só atingem uma amplitude apreciável para a frequência de vibração própria do corpo, o que denominamos ressonância.

A frequência de ressonância de uma câmara retangular é dada por

$$f_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 + \left(\frac{r}{h}\right)^2}$$

l,b,h = dimensões da câmara retangular;  
 p,q,r = coeficientes de valores 0, 1, 2, ... (conforme os modos pelos quais o gás do ambiente pode entrar em vibração);  
 c = velocidade de propagação do som no gás do ambiente;

A aplicação da ressonância na acústica dos ambientes se dá no reforço de algumas ondas sonoras componentes da voz e da música, entretanto este fenômeno pode causar a formação de ondas estacionárias o que acabaria por prejudicar a acústica local.

#### 4.8 Distorção

Distorção é a modificação da forma da onda de um som complexo (seu timbre), pela alteração desigual das amplitudes dos componentes das diversas frequências que fazem parte de tal som.

Atualmente, grande parte das distorções podem ser evitadas com um rebalanceamento eletrônico de suas frequências componentes. Ponto altamente aplicado nos modernos aparelhos de gravação, amplificação e reprodução de som.

#### 4.9 Eco

Eco é um fenômeno onde o som refletido ocasiona uma sensação auditiva em nosso ouvido independente da sensação ocasionada pelo som direto. Uma repetição do som original, devida a defasagem de tempo superior a 1/15 de segundo entre o som direto e o refletido (ou quando o caminho percorrido pelo som direto e o refletido diferem de mais de 23 metros).

#### 4.10 Reverberação

Todos os raios sonoros que partem da fonte atingindo o ouvido num intervalo de tempo de 1/15 segundo, produzem uma sensação sonora distinta, enquanto os demais produzem uma sensação que é como o prolongamento da principal, de intensidade decrescente, tomando o nome de *resíduo*. Tendo em vista a audição, quando a intensidade energética do som residual torna-se inferior à da linha limite de audibilidade, podemos considerar tal *resíduo* como extinto.

A este fenômeno, onde o som residual permanece no ambiente mesmo depois da fonte Ter parado de emitir qualquer sinal de onda toma o nome de reverberação.

Um dos pontos importantes a se ressaltar é a diferença entre eco e reverberação (ponto onde muitos enganos são cometidos), já que o primeiro caracteriza-se pela repetição distinta do mesmo som e o segundo pela permanência do som no ambiente.

A reverberação por ser o resultado direto de sucessivas reflexões das ondas sonoras pelas paredes de uma sala (podemos aqui subentender sem problemas o termo quarto cubóide) tem uma importância sem igual na determinação da qualidade acústica de um ambiente, funciona como um sinal do comportamento deste último em função da propagação do som, uma espécie de marca de qualidade (é claro dependente do objetivo da sala). Para então definir a qualidade de um ambiente em função da reverberação fora criado um parâmetro chamado *tempo de reverberação*.

- *Tempo de reverberação é o tempo necessário para que a intensidade energética de um som puro de 512Hz se reduza a um milionésimo de seu valor inicial (60 dB), a partir do momento no qual a fonte cessa de emití-lo.*

Características:

- O tempo de reverberação de um ambiente é praticamente igual para todos os pontos do mesmo (som perfeitamente difundido);
- O tempo de reverberação de um ambiente independe da posição da fonte sonora;
- O efeito de uma superfície absorvente sobre o tempo de reverberação de um determinado ambiente é independente da localização da mesma.

A primeira fórmula para o cálculo do tempo de reverberação foi desenvolvida por W. C. Sabine, porém ela é aplicável somente dentro de certos limites bem restritos; sendo a equação denominada de *fórmula de Eyring* (pesquisa simultânea de vários autores) a resposta mais geral ao cálculo do tempo de reverberação,

$$T = \frac{0,16V}{S \ln 1/(1 - a)}$$

a = coeficiente de absorção equivalente do ambiente.

S = superfície do ambiente;

V = volume do ambiente;

Este tempo é calculado admitindo-se uma perfeita difusão do som, com uma uniforme distribuição de energia sonora sobre a superfície S, que limita o espaço V de recinto considerado.

## 5. *Qualidade do Som Ouvido e Teoria Psicoacústica*

Para chegarmos a uma definição de qualidade acústica de uma sala, seja de concerto, conferência ou até mesmo aula nós nos deparamos com dois aspectos intrinsecamente ligados, mas que se colocam sobre respaldos diferentes, a apreciação subjetiva e a atributos físicos.

A apreciação acústica está intimamente ligada com a sensibilidade e percepção dos indivíduos em um determinado ambiente , ou seja , com as propriedades fisiológicas e psicológicas de nosso órgão auditivo, com o modo como as sensações auditivas são processadas em nosso cérebro, levando em conta todos os hábitos de escuta e considerações estéticas do ouvinte. Tal investigação subjetiva pode se realizar de diferentes modos: julgando a qualidade acústica da sala através de ouvintes especializados (músicos ou ouvintes especializados), sintetizando os campos sonoros com parâmetros definidos em câmaras anecóicas e julgando subjetivamente.

A ligação entre tal análise subjetiva e os atributos físicos da sala se dá no momento que tais atributos (fenômenos físicos, estudo da ondulatória) dão a possibilidade de transformar algo até então montado sobre percepções em algo definido qualitativamente, através de expressões matemáticas, alcançando um fator objetivo e dando a tais percepções subjetivas um caráter de grandeza física mensurável.

Abaixo são mostrados termos que são considerados na avaliação acústica de uma sala, bem como e especificada sua análise qualitativa (Fábio Leão Figueiredo, Bruno Masiero e Fernando Iazzetta; 2003):

- Vivacidade (liveness): Uma sala é dita “viva” se pode ser considerada uma sala reverberante. Salas que refletem pouco som para o ouvinte - por exemplo, quando dotadas de excessivos materiais absorvedores- são ditas salas mortas ou secas. Uma sala tem vivacidade quando, entre outras ocorrências, apresenta um volume total muito maior que o volume ocupado pela audiência ou quando apresenta superfícies bastante refletoras. Uma sala viva concede "preenchimento sonoro" à música. Vivacidade está relacionada diretamente com o tempo de reverberação das frequências médias e altas (acima de 500 Hz). Índice objetivo: RT 60;
- Calor (warmth): Calor em acústica é definido como a presença dos graves(baixas frequências). Ocorre quando tempo de reverberação para as baixas frequência ( menores que 250 HZ) é suficientemente grande para garantir que tais frequências sejam bem percebidas. Índice objetivo: BR;

$$\frac{RT_{125}+RT_{250}}{RT_{500}+RT_{1000}}$$

- Brilho (Brilliance): Dizemos que um som é “brilhante” numa sala, da proeminência dos harmônicos superiores e do relativo baixo decaimento para essas freqüências. É afetado pelo intervalo entre a chegada do som direto e das primeiras reflexões, e pela razão entre os tempos de reverberação de médias e altas freqüências. Uma sala que apresenta clareza e vivacidade nas altas freqüências, tende também a apresentar um som brilhante. Índice objetivo: TR;

$$\frac{RT_{2000}+RT_{4000}}{RT_{500}+RT_{1000}}$$

- Nível de som direto e reverberante (Loudness of direct / reverberant sound): Nossa impressão do volume de uma música tocada em determinado ambiente é formada pelas contribuições do som direto e do som reverberante. No caso do som direto, é desejável que não existam pontos desprivilegiados na sala, ou seja, a sala deve ser projetada de forma que em todos os lugares haja uma boa audibilidade. Essa tarefa é particularmente mais complicada para salas maiores. A energia do som reverberante é função de duas variáveis: a intensidade do som que viaja indiretamente até o ouvinte e o tempo de reverberação da sala. Índice objetivo: L;

$$10 \log [ E_d / E_r ]$$

- Intimismo (intimacy): Uma sala possui intimismo acústico se a música tocada em seu interior dá a sensação de estar sendo tocada em uma sala pequena. A impressão que se tem do tamanho da sala é determinada pelo intervalo de tempo entre o som que chega diretamente e sua primeira reflexão proveniente das superfícies refletoras. Em salas apontadas pelos músicos como tendo intimismo acústico, as superfícies refletoras são dispostas de tal forma que o intervalo de reflexão é pequeno, menor que 20 milissegundos. Índice objetivo: ITDG;

$$t_d - t_r$$

- Clareza ou Definição (Clarity or Definition): Quando a música tocada numa sala soa bem definida, com articulações sonoras límpidas e precisas independentemente do andamento, dizemos que a sala apresenta bom grau de clareza. Estudos psicoacústicos revelaram que os primeiros 50 milissegundos a partir da chegada do som ao ouvido são particularmente importantes para certas propriedades da percepção sonora, como por exemplo a clareza. O grau de definição de uma sala é função do padrão de reflexão de suas superfícies, da distância entre o ouvinte e músico e das dimensões da sala. Mais do que qualquer outro, o tempo de reverberação é o atributo decisivo para o parâmetro clareza. Índice objetivo: C50;

$$10 \log \left[ \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right]$$

-Impressão Espacial (Spatial Impression): É o efeito psicoacústico causado pelas reflexões sonoras que atingem o ouvinte a partir de várias direções. Embora não chegue a distinguir tais direções, o ouvinte cria mentalmente uma sensação acústica espacial do ambiente. Este parâmetro está obviamente relacionado com o fenômeno da difusão, mas também é influenciado decisivamente por outras propriedades dentre as quais a mais importante é a *dissimilaridade biauricular*. Essa grandeza é uma medida da diferença entre o que é captado em de cada um dos ouvidos ao longo do tempo de exposição. Fisicamente, a impressão espacial é inversamente proporcional ao grau de correlação entre os sinais biauriculares. Índice objetivo: IACC (*interaural cross correlation*).

$$\max \left| \left[ \int p_e(t) p_d(t + \alpha) dt \right] \cdot \left[ \int p_e^2(t) dt \int p_d^2(t) dt \right]^{-1/2} \right|$$

Sendo que:

- RT 60 é o tempo de reverberação, ou seja, o intervalo de tempo que o sinal sonoro leva para ser amortecido em 60 dB.  $RT_{125}$ ,  $RT_{250}$ ,  $RT_{500}$ , são os tempos de reverberação nas frequências 125 Hz, 250Hz, 500Hz e assim respectivamente. Um outro parâmetro relacionado à reverberação é o E.D.T. (early decay time).
- BR é razão de graves (bass ratio) e TR é razão de agudos (treble ratio).
- $t_d$  é o instante em que o som direto chega em determinado ponto de captação, e  $t_r$  é o instante em que chega a primeira reflexão. A diferença entre esses dois instantes é o ITDG (initial time delay gap).
- Ed e Er são energia de som direto e reverberante, respectivamente.
- P(t) é o valor da pressão acústica num dado instante. A expressão física da clareza C50 é a razão da energia que chega nos primeiros 50 milissegundos pela energia total. Essa razão também pode ser tomada nos primeiros 80 milissegundos (C80).
- IACC (interaural cross correlation), é o valor máximo da função de correlação entre os sinais obtidos no ouvido esquerdo ( $P_e$ ) e direito ( $P_d$ ) de um dummy head (dispositivo de gravação que simula a anatomia da cabeça humana, apresentando forma e impedância acústica característica próximas às de um ser humano).

## **6. Conclusão**

Com o estudo da onda e dos parâmetros que capacitam a avaliação qualitativa de um quarto cubóide formou-se a base para a próxima parte do projeto de mestrado, a implementação de programas de simulação acústica. Nesta parte do projeto serão implementadas várias versões de um simulador com o fim de apurar todas as conseqüências que o cálculo destes parâmetros de qualidade trazem para uma análise computacional, até que ponto tais índices de qualidade podem ser calculados sem comprometer o tempo computacional, quais seriam os limites impostos a tais simuladores que manteriam a confiabilidade da resposta obtida.

Neste passo, além de um visão mais voltada a programação propriamente dita, com a busca de técnicas de simulação adequadas (Modelos Tridimensionais, Fontes Imaginárias, Traçado de Raios); será dado também atenção a técnicas de otimização no processamento dos dados de entrada inibindo, de repente., o número de simplificações adotadas para o simulador.

## 7. *Bibliografia*

1. Ennio Cruz da Costa. Acústica Técnica. Edgard Blucher, 2003;
2. Donald Hall. Musical Acoustics. Brooks-Cole, 1991 (2ª Edição);
3. The Java Sound API. <http://java.sun.com/products/java-media/sound/>;
4. ROOM OPTIMIZER. <http://www.rpginc.com/cgi-bin/byteserver.pl/news/reflections/drv5i2.pdf>;
5. F. Richard Moore. Elements of Computer Music. PTR Prentice Hall, 1990;
6. V. L. Jordan. Auditoria Acustics: Development in Recent Years, 1975;
7. G. M. Hulbert, D. E. Baxa. Criterion for Quantitative Rating and Optimum Design of Concert Halls, 1981;
8. Manuel Recuero López. Acondicionamiento Acústico. Thomson Editores Spain – Paraninfo, 2001.