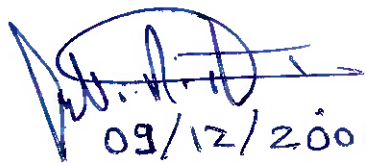


**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Realidade Virtual Acústica em Estúdio de Gravação**

**Célio Rubens Akito Magario  
Rafael Fujita Azuma**

**Orientador: Sylvio R. Bistafa  
Co-orientador: José Carlos Giner**

  
09/12/2003  
9,0 (Nove e Zero)

**São Paulo  
2003**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Realidade Virtual Acústica em Estúdio de Gravação**

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

**Célio Rubens Akito Magario  
Rafael Fujita Azuma**

**Orientador: Sylvio R. Bistafa  
Co-orientador: José Carlos Giner**

**Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica**

**São Paulo  
2003**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010613

FICHA CATALOGRÁFICA

1361942

Azuma, Rafael Fujita; Magario, Célio Rubens Akito  
Realidade Virtual Acústica em Estúdio de Gravação  
São Paulo : EPUSP, 2003.  
47P. + anexo.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia Mecânica.

I. Acústica, 2. Estúdio de Gravação, 3. CATT-Acoustics, 4. Auralização  
I. Azuma, Rafael Fujita, II. Magario, Célio Rubens Akito, III.  
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de  
Engenharia Mecânica.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por nos permitir realizar todo esse projeto que é a vida.

Às nossas famílias, que nos deram apoio sempre e que ainda nos sustentaram durante todos esses anos.

Aos nossos amigos, os quais sem eles não seria possível agüentar esses anos de Poli. Principalmente aos DZKNs, que sempre estiveram com a gente tanto nas horas recreativas como nas horas de estudo; e também à nossa turma da Mecânica, que mostrou ser um grupo de grandes amigos e cuja amizade deve ser preservada para sempre.

Ao professor Sylvio Bistafa, que nos orientou nesse trabalho sempre com bastante atenção, e que dedicou parte de seu tempo para o sucesso desse projeto.

Ao co-orientador José Carlos Giner, que enriqueceu nossas apresentações e sua experiência compartilhada foi de grande importância para o trabalho.

Ao Professor Alberto Hernandez, por ministrar essa matéria e tornar possível a realização desse trabalho de conclusão.

Aos demais professores da Escola Politécnica, que optaram ser mestres e nos deram o privilégio de aprendizado de suas sabedorias ao longo desses anos.

Ao Sr. Bengt-Inge Dalenbäck, nosso contato com a empresa do programa *CATT-Acoustics*, que nos viabilizou todos os recursos necessários para a conclusão desse trabalho.

A todas as pessoas que colaboraram com a gente mas que não se encaixam em nenhum agradecimento anterior.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 01: *master.geo* - arquivo de geometria da “caixa de sapato”;
- Figura 02: *master.geo* - arquivo de geometria da “caixa de sapato”;
- Figura 03: visualização em 3D do “estúdio paralelepípedo”;
- Figura 04: absorção e dispersão dos planos;
- Figura 05: gráficos de reverberação;
- Figura 06: principais parâmetros;
- Figura 07: comparativo de parâmetros;
- Figura 08: análise de um raio;
- Figura 09: mapeamento dos parâmetros para 1kHz;
- Figura 10: mapeamento dos parâmetros para 1kHz;
- Figura 11: visualização do estúdio pentagonal;
- Figura 12: gráficos de reverberação para frequência de 1 kHz;
- Figura 13: parâmetros acústicos para as simulações.;
- Figura 14: mapeamento dos parâmetros para 1kHz;
- Figura 15: mapeamento dos parâmetros para 1kHz;
- Figura 16: caminho percorrido por uma onda sonora;
- Figura 17: resposta binaural para a primeira simulação;
- Figura 18: resposta binaural para a segunda simulação;
- Figura 19: resposta binaural para a terceira simulação;
- Figura 20: resposta binaural para a quarta simulação;
- Figura 21: gráfico da primeira simulação;
- Figura 22: gráfico da segunda simulação;
- Figura 23: gráfico da terceira simulação;
- Figura 24: gráfico da quarta simulação.

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| <b>Agradecimentos</b>                          | <b>2</b>  |
| <b>Lista de Figuras</b>                        | <b>3</b>  |
| <b>1. Resumo</b>                               | <b>6</b>  |
| <b>2. Introdução</b>                           | <b>7</b>  |
| <b>3. Fundamentos Teóricos</b>                 | <b>8</b>  |
| <b>4. Teoria</b>                               | <b>9</b>  |
| 1) Reflexão                                    | 9         |
| 2) Absorção                                    | 9         |
| 3) Difusão                                     | 10        |
| 4) Direcionalidade                             | 10        |
| 5) Nível de Pressão Sonora                     | 11        |
| 6) Reverberação                                | 11        |
| <b>5. Tratamento de Sinais</b>                 | <b>13</b> |
| <b>6. Convolução</b>                           | <b>14</b> |
| <b>7. Modelagem de uma Sala Paralelepípedo</b> | <b>17</b> |
| <b>8. Rodando o Programa</b>                   | <b>21</b> |
| <b>9. Modelagem do Estúdio Pentagonal</b>      | <b>28</b> |
| <b>10. Difusão</b>                             | <b>32</b> |
| <b>11. Resultados das Simulações</b>           | <b>33</b> |
| <b>12. Post-Processing</b>                     | <b>38</b> |
| <b>13. Auralização</b>                         | <b>41</b> |

|            |                     |           |
|------------|---------------------|-----------|
| <b>14.</b> | <b>Conclusões</b>   | <b>44</b> |
| <b>15.</b> | <b>Bibliografia</b> | <b>45</b> |
| <b>16.</b> | <b>Anexo</b>        | <b>46</b> |

## **1. RESUMO**

Esse relatório mostrará tudo que foi feito no Projeto Integrado. Ele consiste de uma parte introdutória onde será abordada a acústica de uma maneira geral seguida de uma fundamentação teórica na qual foi baseado o desenvolvimento do trabalho. A avaliação tutorial qualitativa das telas do software *CATT-Acoustics* vem logo em seguida, junto com uma análise dos resultados obtidos e uma conclusão final do trabalho feito. Em anexo apresenta-se um CD cujos dados também representam parte dos resultados.

## **2.INTRODUÇÃO**

A acústica de interiores é bastante utilizada por arquitetos e engenheiros civis. No entanto, suas maiores preocupações quando se projeta um ambiente são o conforto visual, sua segurança e praticidade. A parte da acústica geralmente é feita depois que a obra já está acabada, sendo somente uma medida corretiva.

Nesse projeto, visa-se a otimização de um estúdio de gravação virtual, ou seja, sem sua construção material. Assim, será possível avaliar a qualidade e já tomar medidas preventivas quanto a seus aspectos construtivos.

Ambientes fechados designados prioritariamente para reproduzir música são bem mais complexos do que os destinados para a fala. É sempre difícil especificarmos o melhor tempo de reverberação, ou o tempo de reverberação ideal, o qual varia com o volume da sala, o tipo de música e o efeito desejado. Os ambientes destinados à música poderão ser um pouco mais reverberantes do que salas de leitura, biblioteca ou salas de conferências.

Em projetos de estúdios de gravação de música é aconselhável possuir um tempo de reverberação de pequeno valor, particularmente se estes estúdios são compostos por uma ampla variedade de equipamentos eletrônicos com limitador de amplitude, reverberação artificial e controle de frequências. Os limites do ambiente - paredes e teto deverão possuir alta densidade para evitar vazamento para o meio exterior.

### 3.FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Primeiramente em nosso trabalho foi indispensável uma pesquisa teórica para entender os processos envolvidos na caracterização de um estúdio. Por ser um assunto novo e o qual não foi abordado em nossa estrutura curricular, houve um cuidado maior nessa parte, por isso foi essencial definir com o orientador os fundamentos necessários para o entendimento do projeto. Apesar de ser apenas uma complementação do nosso trabalho, é válido citar a teoria estudada com uma breve explicação do que foi entendido.

A base de nossa pesquisa foi voltada para a Internet. Ao procurar alguma bibliografia relacionada à acústica, o que foi encontrado era extremamente vago e muito voltado para a parte arquitetônica, sendo que nosso objetivo era a otimização de um estúdio. No entanto, na Internet foi encontrado um material mais específico para o objetivo em questão, que variou desde *sítes* que abordavam a teoria da acústica até outros que tratavam o assunto de maneira mais prática sem qualquer metodologia teórica aplicada.

Portanto o entendimento teórico feito foi suficiente para abordar os diversos parâmetros acústicos envolvidos e saber como eles se comportam para as devidas situações empregadas.

## **4. TEORIA**

A parte teórica da acústica não é muito relevante e nem deve ser destacada nesse projeto. Como dito anteriormente, trata-se de um assunto novo para nós, e seu total domínio nunca foi esperado. O que foi estudado foram alguns parâmetros que caracterizam uma sala e que são importantes para a otimização de um estúdio, tais como:

### **1) Reflexão**

Aqui nada mais é do que o comportamento de uma onda sonora ao refletir sobre uma superfície, ou seja, a mudança de direção e sentido da mesma, semelhante a um raio de luz incidente em uma superfície lisa refletora (ainda sem contar absorção e difração).

### **2) Absorção**

Na verdade, é uma propriedade dos materiais e formas existentes no ambiente onde se propaga o som e não propriamente dele. Esse parâmetro tem grande dependência das paredes do estúdio já que são nelas que ocorrem as absorções. Nada mais é do que a absorção propriamente dita de parte da energia contida na onda sonora, sendo que existem diferentes índices para cada material e faixas de frequências do som. O índice de absorção é calculado através da razão de energia absorvida pelo material pela energia que incide no mesmo.

### **3) Difusão**

Também propriedade do material da sala, esse parâmetro define a quantidade de energia sonora que é “espalhada” quando uma onda atinge uma superfície. Semelhante à reflexão, mas nesse caso o som é não é refletido como um só, mas sim como várias ondas de intensidades bem menores. Possui as mesmas dependências quanto ao material incidido e a frequência da onda, sendo que materiais mais porosos tendem a ter alto índice de difusão.

### **4) Direcionalidade**

Esse parâmetro é muito importante no projeto de caixas acústicas e sua disposição no estúdio. Trata-se da medida característica direcional de uma fonte sonora, e é de extrema importância em um ambiente reverberante. Da prática percebe-se a direcionalidade das diversas faixas de frequência, como por exemplo, o som mais grave que possui direcionalidade baixa, pois é “espalhado” no ambiente ao contrário do som agudo que é direcionado de acordo com o apontamento da fonte. Então, para um bom ambiente acústico é interessante ter em mãos os conhecimentos de direcionalidade para projetar e localizar devidamente as fontes sonoras para diferentes frequências e regiões. O índice de direcionalidade é medido em decibéis e é calculado através da diferença entre o nível de pressão sonora produzida pela fonte em uma direção e a média de pressão sonora ao redor da fonte medida à mesma distância.

### **5) Nível de Pressão Sonora**

Como o próprio nome diz, é a intensidade de pressão de energia sonora no local, a qual será transmitida para o tímpano do ouvinte. Seu índice NPS ou SPL (*Sound Pressure Level*), medido em decibéis, é uma relação entre pressão sonora local com a menor pressão audível (por volta de  $20\mu\text{Pa}$ ).

### **6) Reverberação**

Um dos parâmetros mais importantes nesse trabalho, pois é ele que caracteriza o ambiente de estúdio considerando todos seus aspectos construtivos (geometria, material, local de fonte sonora e ouvinte). É descrito como a persistência do som em um espaço fechado como resultado de reflexões múltiplas após a extinção da fonte sonora. O índice que classifica o esse parâmetro é o tempo de reverberação e é medido através do tempo necessário para que o campo sonoro em um determinado espaço caia 60 dB ou a um milionésimo da potência original. Em termos simplificados, se refere ao tempo suficiente para que o som seja refletido pela sala até ser absorvido pelo material das paredes e pelo ar. A importância de se controlar o tempo de reverberação está no fato de que ele afetará diretamente a inteligibilidade do som, no caso a música, e tal controle é feito principalmente através do ajuste da resposta impulsiva da sala (convolução).

A partir desses fundamentos, definem-se outros parâmetros que caracterizam mais especificamente uma sala ou um estúdio. São bastante semelhantes aos apresentados, mas possuem outros valores de referência

já que servem para avaliar qualitativamente o comportamento da sala para situações mais específicas nas quais requerem diferentes características acústicas. Esses outros conceitos serão abordados ao decorrer do relatório à medida que o programa *CATT-Acoustics* for explicado.

Por fim define-se a auralização (*auralization*), que no nosso caso chamamos de “Realidade Virtual Acústica”. De acordo com teoria, significa como o processo de simulação audível, por modelo físico ou matemático, do campo afetado por uma fonte em um ambiente, em tal maneira que simula a experiência binaural de escutar o som em uma posição no espaço modelado. Em outras palavras, auralização significa a experiência de sentir (ou ouvir) como o som se comportaria dada uma geometria física com suas características acústicas, portanto seria possível prever sua performance antes de qualquer construção física. No entanto, tais aspectos serão estudados e aplicados nas próximas etapas do trabalho.

## 5. TRATAMENTO DE SINAIS

A forma mais direta para se excitar uma sala consiste em usar impulsos capazes de excitar todas as frequências de forma linear. Deste modo, a resposta obtida não é mais do que a correspondente à resposta impulsional desejada, ou seja, um sinal de espectro plano nas frequências convoluído com a resposta impulsional da sala. Posteriormente, aplica-se uma FFT (Transformada de Fourier Rápida) para estimar a função de transferência da sala.

Contudo, impulsos deste gênero possuem energia reduzida, não sendo por isso especialmente indicados para excitação de sistemas acústicos. Mas pode-se aumentar a precisão repetindo os impulsos periodicamente, e fazer a média das respostas em cada período. Deste modo, a resposta impulsional obtida é semelhante à anterior, desde que o seu comprimento seja inferior ao período em análise.

Resumindo, no caso específico do estúdio de gravação, o sinal mais importante a ser considerado é a resposta impulsiva da sala, ou seja, como um som intenso, porém de curta duração se comportaria (considerando tempo de reverberação, absorção, reflexão entre outros) dentro do estúdio em questão. Esses dados, aplicados para as diferentes faixas de frequências, já dariam uma boa idéia de como o som seria ouvido naquele ambiente.

## 6. CONVOLUÇÃO

Teoricamente, a convolução é definida:

*“A transformada de Laplace do produto de convolução entre duas funções  $f$  e  $g$ , é igual ao produto das transformadas de Laplace das duas funções”.*

Demonstrando matematicamente, temos:

A partir das definições da transformada de Laplace e do produto de convolução, obtemos:

$$L\{f * g\} = \int_0^{\infty} \int_0^t f(r) \cdot g(t-r) \cdot e^{-st} dr dt$$

O integral em  $r$  pode ser estendido até infinito, se multiplicarmos por uma função degrau unitário que anule a parte desde  $t$  até infinito:

$$L\{f * g\} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(r) \cdot g(t-r) \cdot u(t-r) \cdot e^{-st} dr dt$$

Trocando a ordem dos dois integrais, obtemos:

$$L\{f * g\} = \int_0^{\infty} f(r) \left[ \int_0^{\infty} g(t-r) \cdot u(t-r) \cdot e^{-st} dt \right] dr$$

O termo entre colchetes é a transformada de Laplace da função  $g$ , deslocada em  $t$ :

$$g(t-r) u(t-r)$$

Vemos que é igual à transformada de Laplace de  $g$ , multiplicada pela exponencial de  $-sr$ . Assim, obtemos o resultado:

$$L\{f * g\} = G(s) \int_0^{\infty} f(r) e^{-sr} dr$$

Onde é igual ao produto das transformadas de Laplace das duas funções, como pretendíamos demonstrar:

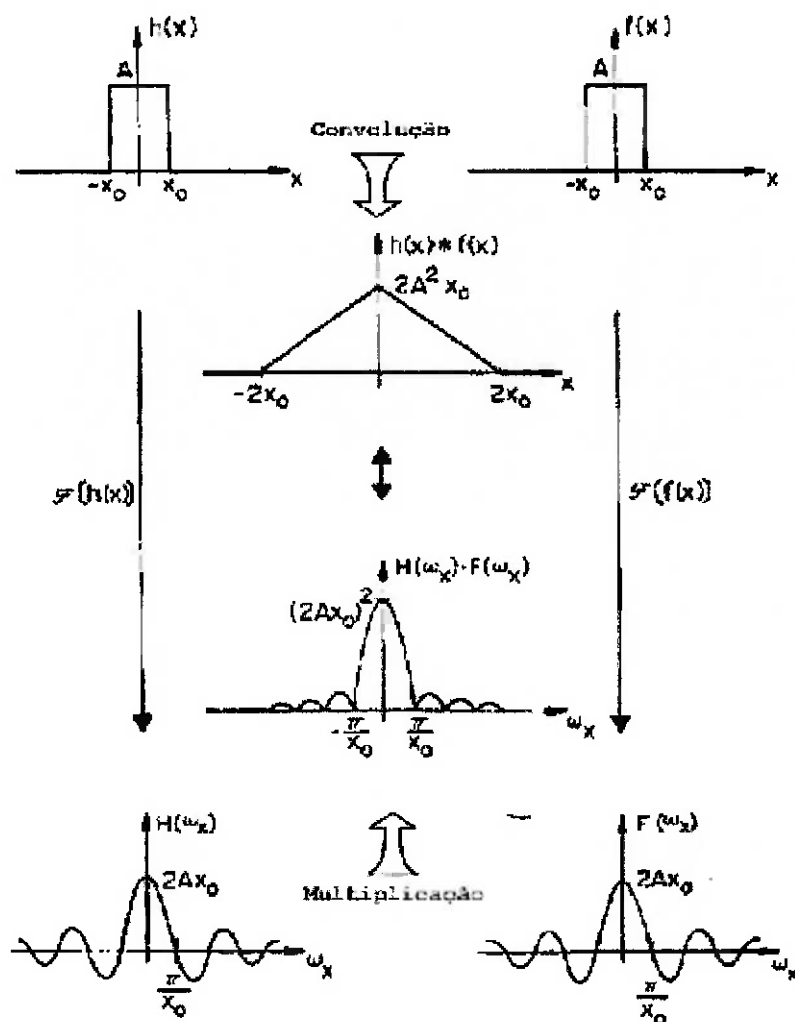
$$L\{f * g\} = F(s) G(s)$$

O teorema anterior também implica, em forma inversa, que a transformada inversa de Laplace de um produto de funções é igual ao produto de convolução entre as transformadas inversas das duas funções. O teorema de convolução é útil no cálculo de transformadas inversas de funções complicadas que possam ser escritas como o produto entre funções simples. O produto de convolução entre funções verifica as propriedades comutativa, associativa e distributiva em relação à soma de funções.

Vendo de outra forma, também se pode definir a convolução:

*“A transformada de Fourier de duas funções convoluídas no domínio do espaço é igual ao produto das transformadas das duas funções no domínio de Fourier”*

Resumidamente, temos:



Teorema da Convolação:  $\mathcal{F}[f(x) * h(x)] = F(\omega_x)H(\omega_x)$ .

## 7. MODELAGEM DE UMA SALA PARALELEPÍPEDO

O modelo *demo* do programa *CATT-Acoustics* disponibiliza uma sala de concertos para analisar os parâmetros acústicos e familiarizar com o programa. Para essa etapa a versão *demo* é muito útil.

Além disto é possível criar uma sala com dimensões variadas, através de uma linguagem que o tutorial ensina ou também pelo método de importar um arquivo do software *AutoCAD*, mas não é possível na versão *demo*. Neste projeto, para um maior aprendizado, o grupo por ora optou por criar um novo estúdio, com dimensões bem simples, na forma de um paralelepípedo.

Esse estúdio inicial possui uma forma de “caixa de sapato” e dentro dele existe uma fonte e um receptor, simulando uma caixa de som e um ouvinte respectivamente.

O arquivo que se compila a geometria do estúdio se chama “*master.geo*” e está representado na figura a seguir:

Figura 01: *master.geo* - arquivo de geometria da “caixa de sapato”

```
;MASTER.GEO
;variáveis
LOCAL h = 2.5 ;altura da sala em m
LOCAL w = 5 ;comprimento da sala
GLOBAL d = 7 ;largura da sala
;coeficientes de absorção e dispersão de 125Hz a 4kHz [%], cor
ABS piso = <40 50 60 70 80 80> L <30 40 50 60 70 80> { 255 0 0 }
ABS malha = <40 70 90 90 95 90> L <30 30 30 30 30 30> { 255 255 0 }
ABS vidro = <18 06 04 03 02 02>
;Notas:
;- os coeficientes para as frequências de 8k e 16k são opcionais
;- caso não mencionadas, são usados valores de 2k e 4k.
;- a cor e o coeficiente de dispersão também são opcionais.
```

No arquivo são definidos para este caso os materiais utilizados nas paredes, teto e piso. Para cada material são definidos os coeficientes de absorção e dispersão para diferentes faixas de frequências.

Figura 02: *master.geo* – arquivo de geometria da “caixa de sapato”

```
CORNERS
;cantos inferiores
1 -w/2 0 0
2 -w/2 d 0
3 w/2 d 0
4 w/2 0 0

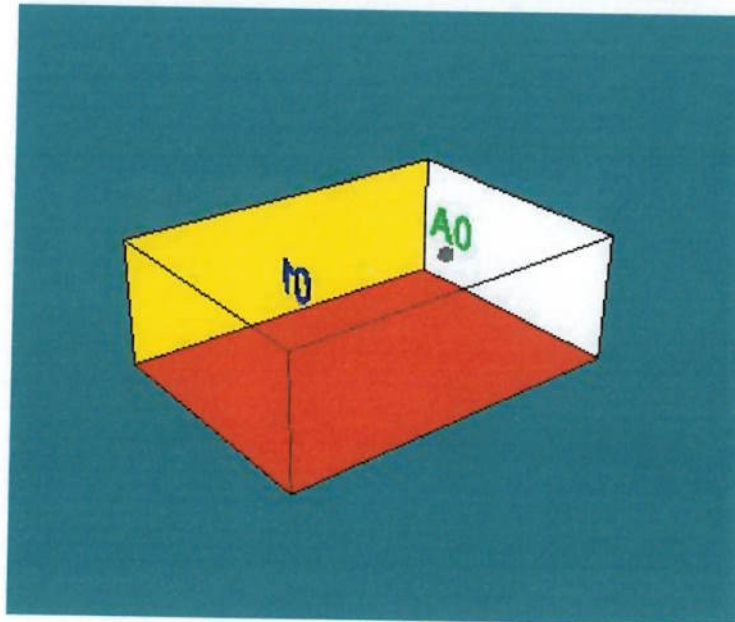
;cantos superiores
11 -w/2 0 h
12 -w/2 d h
13 w/2 d h
14 w/2 0 h
PLANES
[1 piso / 4 3 2 1 / piso ]
[2 teto / 11 12 13 14 / malha ]
[3 parede de vidro / 1 11 14 4 / vidro ]
[4 parede oposta / 3 13 12 2 / malha ]
[5 parede esquerda / 2 12 11 1 / malha ]
[6 parede direita / 4 14 13 3 / malha ]
```

Nesta continuação do arquivo estão presentes os pontos que definem os extremos das paredes divididos em “cantos superiores” e “cantos inferiores”. Depois de definidos os pontos extremos, é possível ingressar os planos e o material que eles são feitos. Neste caso, três paredes e o teto são de malha (isolante acústico) e uma parede é de vidro.

Também se define a fonte sonora em sua localização no espaço, direção (na forma de um vetor) e intensidade para as diversas faixas de frequências. O receptor é definido somente pela sua localização espacial.

Para uma melhor visualização, a próxima figura mostra como ficou a “caixa de sapato” em 3D, que ficou denominada “estúdio paralelepípedo”.

Figura 03: visualização em 3D do “estúdio paralelepípedo”

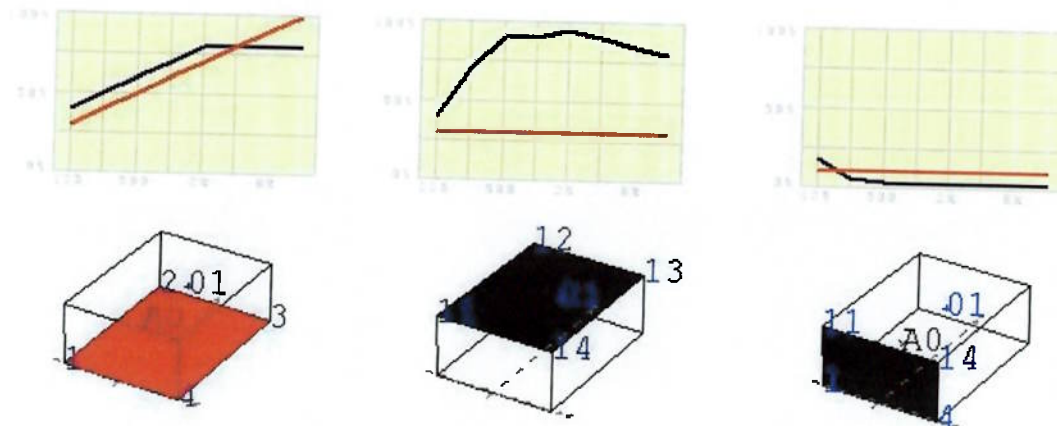


Os quais “A0” representa a fonte e “01” representa o receptor. É importante frisar que o grupo, para esse início de estudo, optou por utilizar duas fontes representando duas caixas acústicas nos cantos da sala viradas em direção do receptor. Essa tentativa não foi eficaz, pois a versão demo limita o uso de apenas uma fonte assim como somente um receptor é permitido.

As cores envolvidas também servem para diferenciação dos tipos de material empregados.

Após realizar a geometria almejada e definir a fonte e o receptor, é possível avaliar pelo programa o nível de absorção e de dispersão nos diferentes planos, em função da frequência, como a seguir:

Figura 04: absorção e dispersão dos planos



Nota-se que a absorção da malha é muito elevada (linha preta), e em contrapartida a absorção do vidro é muito baixa, para todas as frequências. A escolha de tipos de materiais diferenciados foi feita propositalmente para se ter um estúdio de testes com aspectos bastante diversificados.

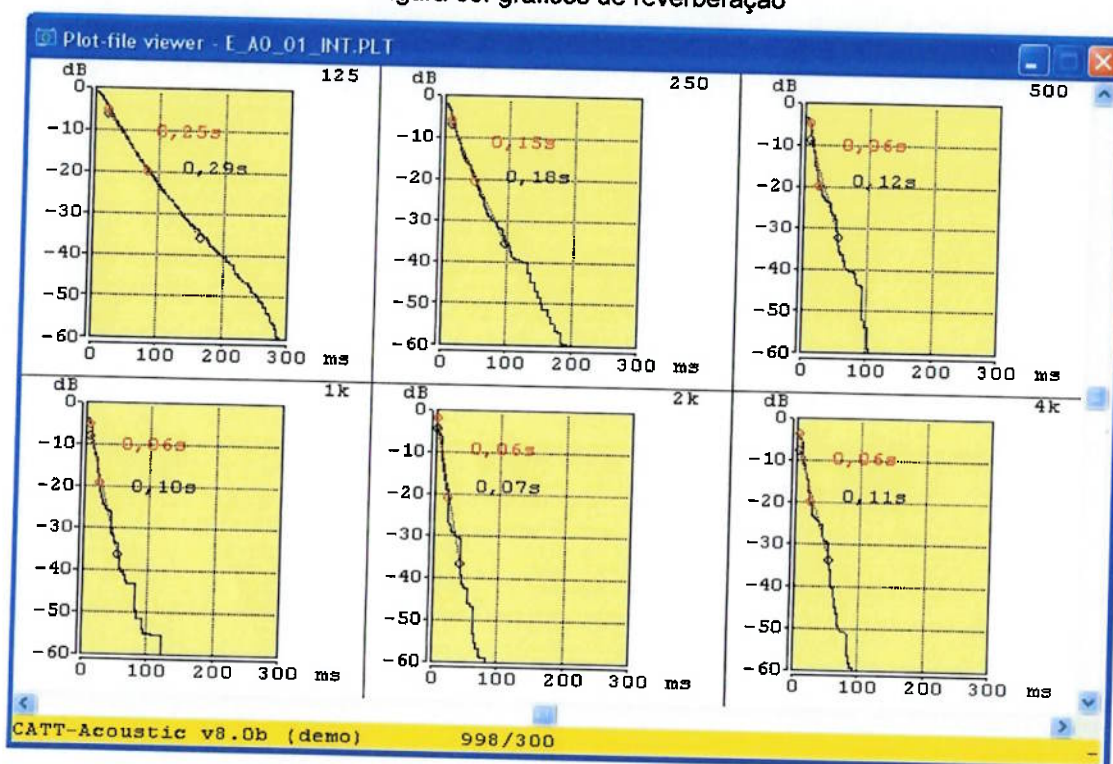
As características do chão foram tiradas de uma versão tutorial do próprio programa. Já as propriedades da malha de lã de vidro e do próprio vidro foram tiradas de referências da Internet, sendo que escolhemos um material bastante absorvente e imaginamos uma parede de vidro para uma visualização externa do ambiente de estúdio.

## 8. RODANDO O PROGRAMA

O próximo passo é rodar o programa. Para isso, é necessário configurar diversos requisitos, assim como, tempo de truncagem, número de raios utilizados, diretório no qual serão gravadas as entradas e saídas do programa, temperaturas e umidades do ambiente, presenças de sons externas, dentre outras coisas.

Depois de rodado o programa, estuda-se os arquivos de resposta. O primeiro deles é o arquivo que mostra gráficos de reverberação:

Figura 05: gráficos de reverberação



Este gráfico representa os tempos que são necessários para a curva ter um decaimento de 15db e 30db (números em vermelho e azul, respectivamente) para diferentes frequências.

A próxima figura mostra a média dos mais importantes parâmetros que um estúdio de gravação, casa de espetáculos, teatro devem ter. Eles são: D-50, C-80, LF, SPL e G.

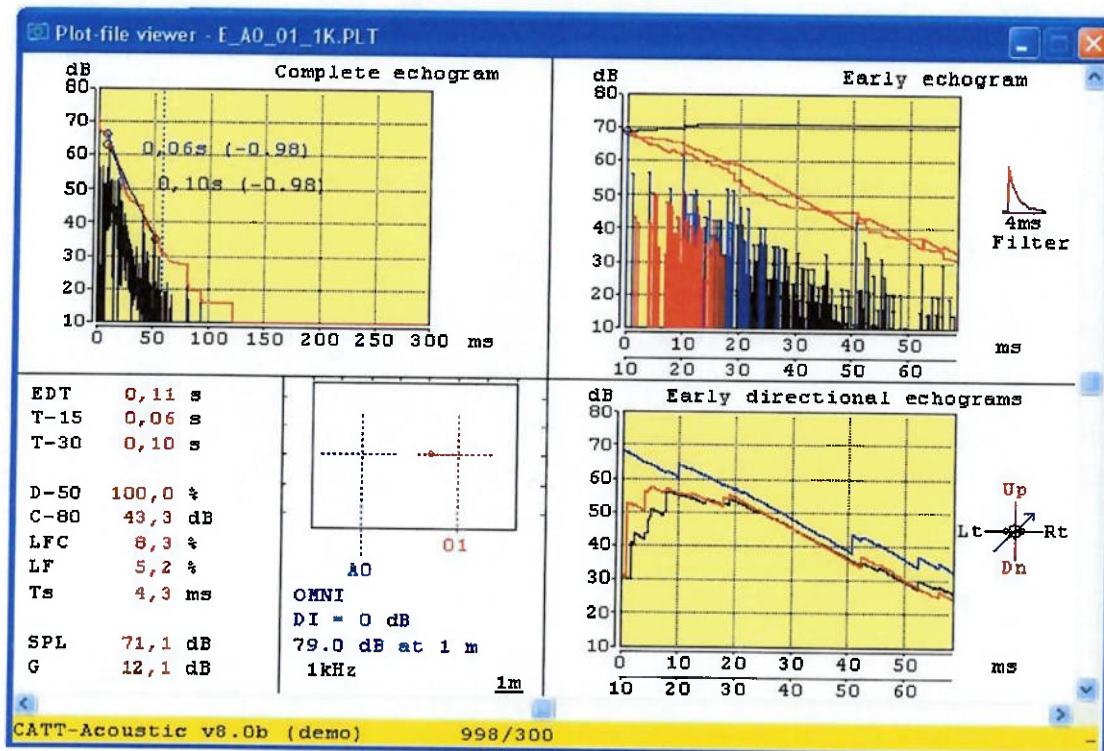
O parâmetro D-50 mede se o nível de reverberação e o tempo central favorecem para um ambiente melhor para a fala, como por exemplo, uma sala da aula. Neste quesito o estúdio se mostrou muito bem, tendo a resposta de 100%.

Já o C-80 mede a clareza que o som emite, muito bom para o propósito deste texto, um estúdio de gravação. Há certa faixa do C-80 para otimização do ambiente. Nele, há a preocupação de um tempo de reverberação um pouco maior que o D-50, já que na música a sobreposição de sons é interpretada de forma positiva.

LF é uma abreviatura para "*Lateral Fraction*" que em inglês significa Fração Lateral. Esse parâmetro mede a porcentagem do que som chega pelas laterais do receptor. Isso é muito importante para um estúdio de gravação, pois quanto maior for o LF, maior será a sensação de imersão dentro do som, obtendo assim o efeito "*surround*".

SPL e G são duas maneiras para medir grandezas iguais, o nível de pressão sonora, medida em decibéis. Esse é o parâmetro mais conhecido e difundido entre todos, inclusive nos campeonatos de som automotivo, onde são feitas medidas de dentro do carro com um decibelímetro.

Figura 06: principais parâmetros

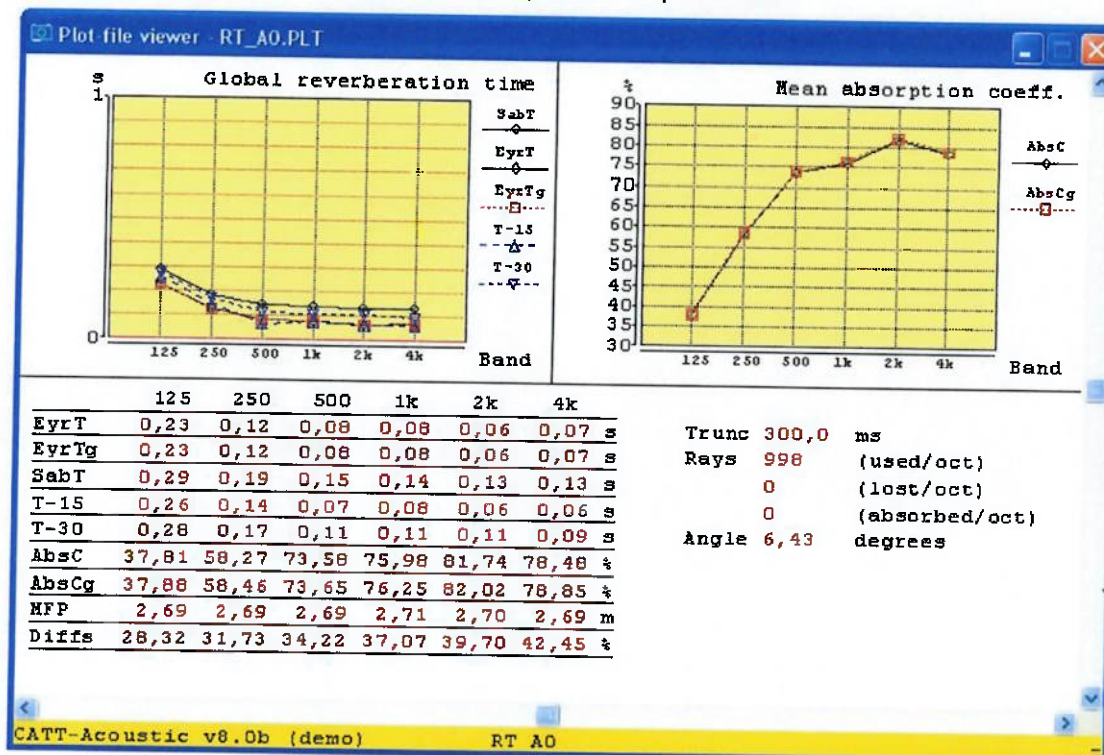


Na tabela acima, os gráficos representam a resposta impulsiva da sala em função do tempo, sendo que mostram tanto a resposta direta como também a resposta resultante das reflexões e difusões das ondas sonoras.

A seguir o programa calcula através de seus algoritmos, diferentes valores para o tempo de reverberação (EyrT, EyrTg, SabT), além dos valores medidos (T-15, T-30). Análogo para a taxa de absorção (AbsC, AbsCg). É também calculada a distância média percorrida pelos raios (MFP), e a porcentagem de raios difundidos (Diffs). Todos esses valores são representados graficamente para fins comparativos.

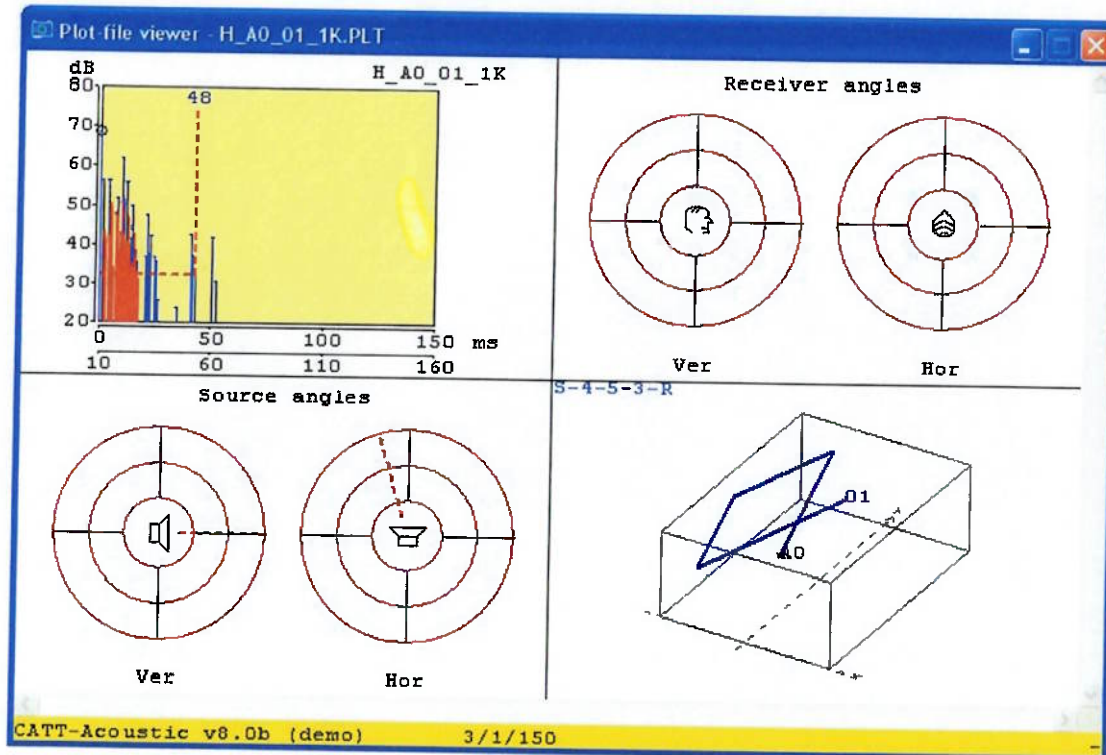
São mostrados também quantos foram os raios utilizados para rodar o programa, o tempo de truncagem, e quantos raios foram perdidos (esse último caso só ocorre quando há falha na geometria da sala).

Figura 07: comparativo de parâmetros



O programa também analisa alguns raios emitidos, ou seja, cada raio possui uma direção, reflete em uma tal parede, é absorvido em outra, e é possível analisar um de cada vez, como a próxima figura mostra. Pode-se ver a direção que o raio deixa a fonte, a direção de que o receptor recebe a onda, o tempo em que foi recebido, e o percurso feito, além do tempo até a chegada ao ouvinte:

Figura 08: análise de um raio



As próximas duas figuras são representações em um plano projetado do estúdio dos diversos parâmetros que são importantes para o mesmo. Todos eles foram devidamente escolhidos para a frequência de 1kHz (frequência recomendada para otimização de estúdios de gravação). Aqui se pode avaliar o mapeamento da qualidade acústica da sala para posteriores ajustes para se conseguir otimizar determinado local ou região, na qual o parâmetro envolvido é mostrado quantitativamente através de uma escala colorida. No programa é possível a escolha de parâmetros a serem mapeados, de forma que todos podem ser incluídos na metodologia de otimização.

Figura 09: mapeamento dos parâmetros para 1kHz

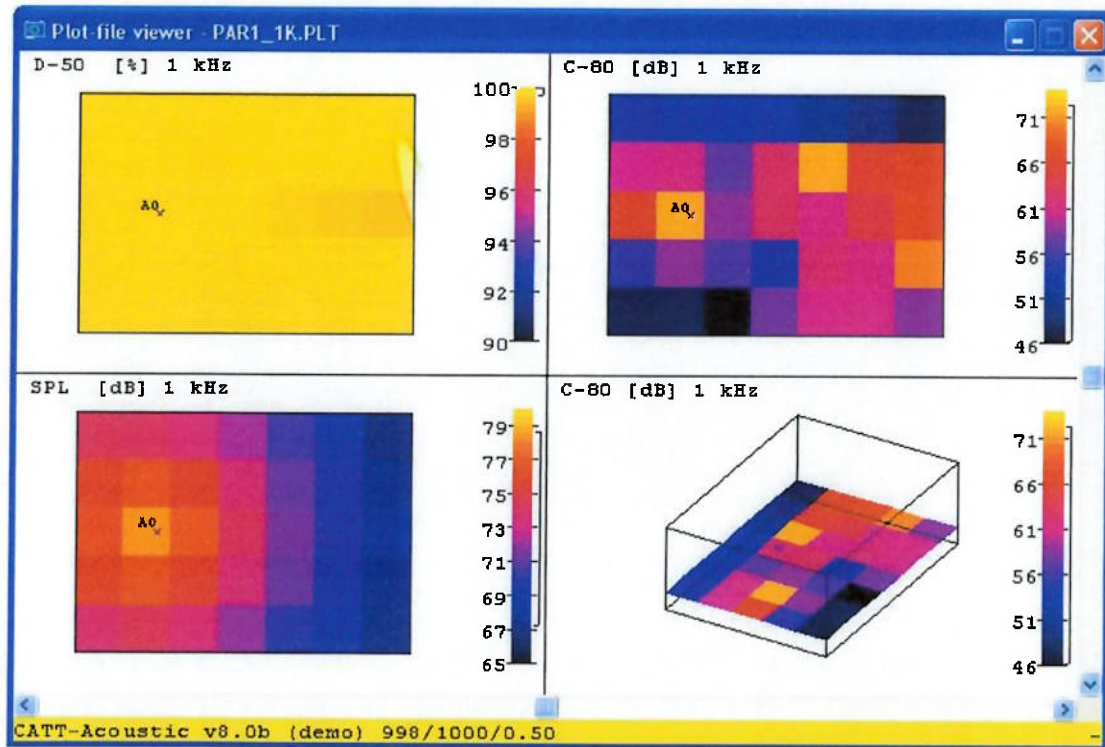
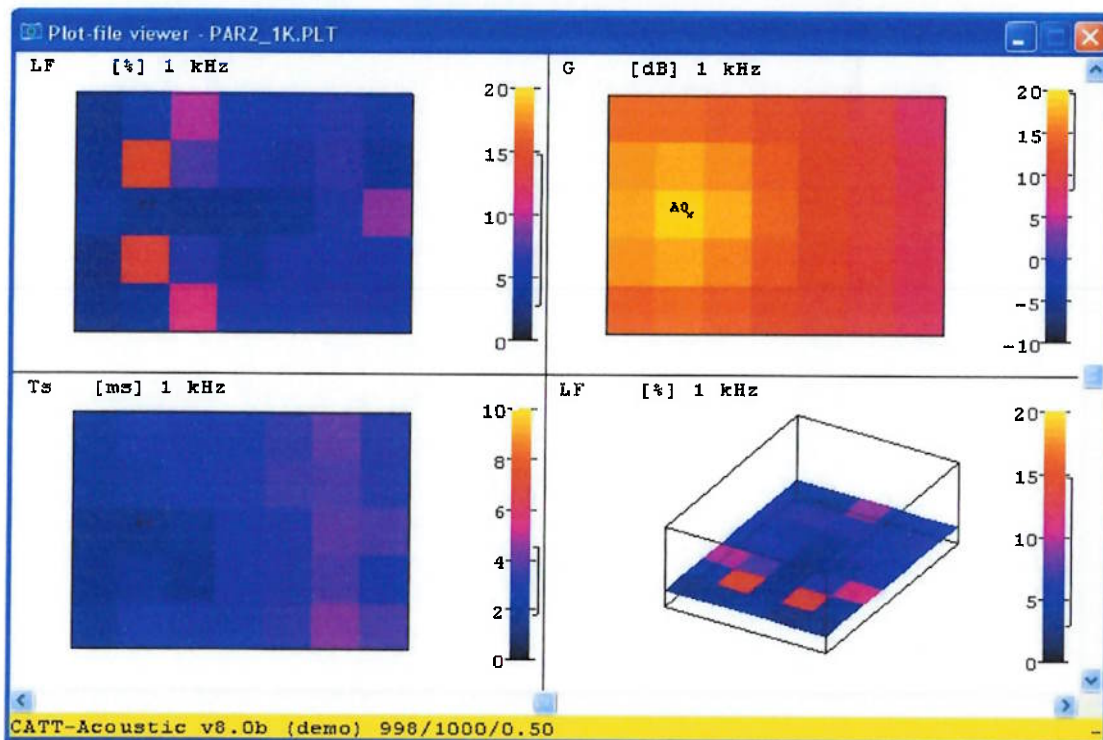


Figura 10: mapeamento dos parâmetros para 1kHz



Também há figuras semelhantes a essas, com os mesmos coeficientes, porém medidos ao longo do tempo (em ms). Tais figuras não trazem muito valor para a nossa pesquisa, pois não se trata de um ambiente muito grande no qual haveria grandes variações paramétricas em tempos perceptíveis para o homem.

Como resultado da simulação do programa também se têm arquivos em formato de texto que qualificam o estúdio de forma numérica. Para a versão utilizada, tais arquivos de saída se mostraram não muito úteis, já que as imagens e gráficos produzidos eram de mais fácil compreensão e, é claro, de visualização.

## 9. MODELAGEM DO ESTÚDIO PENTAGONAL

A partir dessa etapa do projeto, utilizou-se a versão completa do *CATT-Acoustics*, que não apresenta restrições que comprometeriam o resultado. Essa versão somente é restrita quanto a auralização, sendo que só um arquivo de áudio é disponível para a mesma.

Do mesmo modo que foi modelado o Estúdio Paralelepípedo, o grupo optou por uma sala com uma geometria mais complexa, e foi escolhida uma forma pentagonal com teto irregular, baseado em um estúdio de gravação que no momento estava em fase de construção. As paredes foram divididas verticalmente em três partes, para experimentar diferentes tipos de materiais a fim de otimizar sua acústica. Utilizou-se dois tipos de materiais, denominados “material1”, espuma flexível perfilada em ondas, que tem como característica principal uma maior absorção e “material2”, cortina de tecido leve esticada em contato com a parede, a qual apresenta menos absorção. Em uma parede dividiu-se horizontalmente em três partes, tendo o objetivo de simular uma janela de vidro para comunicação visual externa. No teto foram utilizados os mesmos materiais.

A seguir apresenta-se o arquivo de modelagem do estúdio, que foi gerado a partir de coordenadas plotadas em um papel milimetrado.

```
;MASTER.GEO  
LOCAL h = 3.16
```

```
ABS piso = <15 11 10 7 6 7> L <10 10 10 10 10 10> {255 255 128}  
ABS material1 = <7 18 27 41 49 53> L <10 10 10 10 10 10> {68 68 68}  
ABS material2 = <03 04 11 17 24 35> L <10 20 30 40 50 60> {128 128 128}  
ABS teto2 = <03 04 11 17 24 35> L <10 10 10 10 10 10> {128 128 128}  
ABS teto1 = <7 18 27 41 49 53> L <10 10 10 10 10 10> {68 68 68}  
ABS vidro = <05 03 02 02 03 02> L <10 10 10 10 10 10> {255 255 255}
```

```

CORNERS
;cantos superiores
1 0 0 0
2 5 0 0
3 6.55 4.75 0
4 2.50 7.68 0
5 -1.53 4.75 0
6 0.82 1.12 0
7 4.18 1.12 0
8 5.22 4.32 0
9 2.50 6.30 0
10 -0.22 4.32 0
11 1.13 1.57 0.35
12 3.87 1.57 0.35
13 4.70 4.17 0.35
14 2.50 5.75 0.35
15 0.30 4.17 0.35
16 1.63 2.25 0.35
17 3.37 2.25 0.35
18 3.90 3.88 0.35
19 2.50 4.92 0.35
20 1.12 3.88 0.35
23 5.52 1.58 0
24 6.03 3.17 0
25 5.20 5.72 0
26 3.87 6.70 0
27 1.13 6.70 0
28 -0.22 5.72 0
29 -1.03 3.17 0
30 -0.52 1.58 0
116 1.63 2.25 0
117 3.37 2.25 0
118 3.90 3.88 0
119 2.50 4.92 0
120 1.12 3.88 0

;intermediários
50 0 0 -h/3
51 0 0 -2*h/3
52 5 0 -2*h/3
53 5 0 -h/3

;cantos inferiores
101 0 0 -h
102 5 0 -h
103 6.55 4.75 -h
104 2.50 7.68 -h
105 -1.53 4.75 -h
123 5.52 1.58 -h
124 6.03 3.17 -h
125 5.20 5.72 -h
126 3.87 6.70 -h
127 1.13 6.70 -h
128 -0.22 5.72 -h
129 -1.03 3.17 -h
130 -0.52 1.58 -h

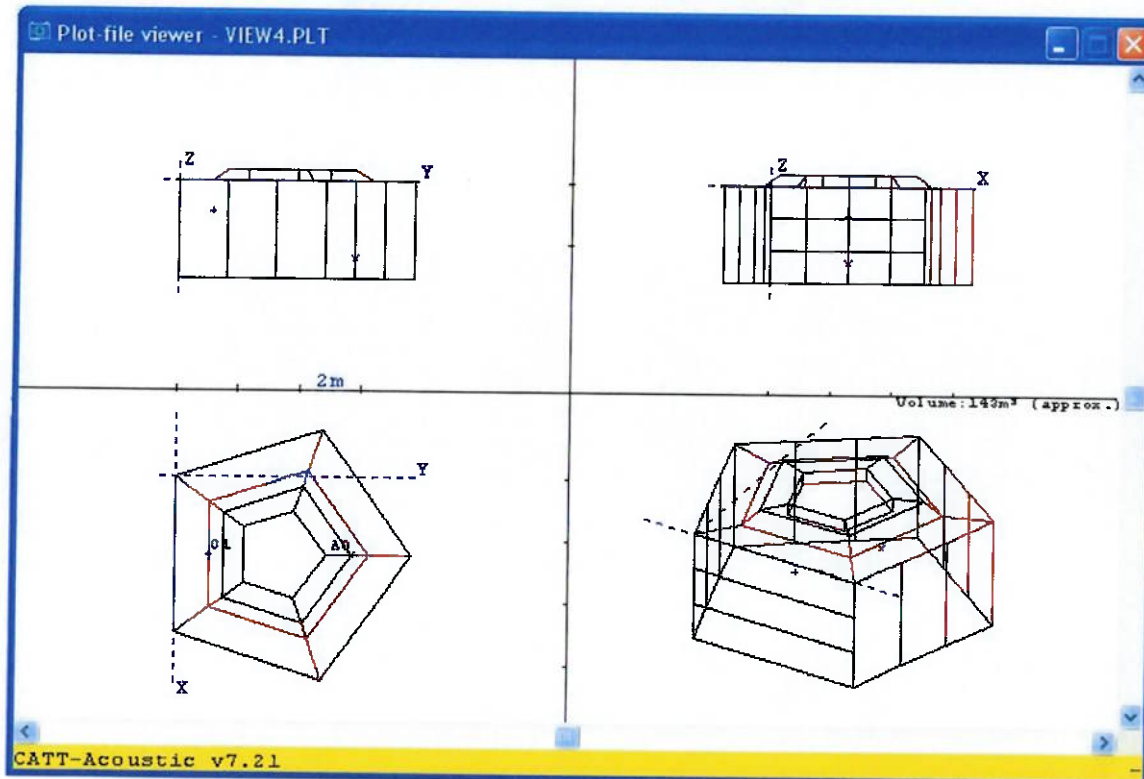
```

#### PLANES

```
[1 Teto A1 / 1 6 7 2 / teto1 ]
[2 Teto A2 / 6 11 12 7 / teto2 ]
[3 Teto A3 / 11 16 17 12 / teto1 ]
[4 Teto A4 / 16 116 117 17 / teto2 ]
[5 Teto B1 / 2 7 8 3 24 23 / teto1 ]
[6 Teto B2 / 7 12 13 8 / teto2 ]
[7 Teto B3 / 12 17 18 13 / teto1 ]
[8 Teto B4 / 17 117 118 18 / teto2 ]
[9 Teto C1 / 3 8 9 4 26 25 / teto1 ]
[10 Teto C2 / 8 13 14 9 / teto2 ]
[11 Teto C3 / 13 18 19 14 / teto1 ]
[12 Teto C4 / 18 118 119 19 / teto2 ]
[13 Teto D1 / 4 9 10 5 28 27 / teto1 ]
[14 Teto D2 / 9 14 15 10 / teto2 ]
[15 Teto D3 / 14 19 20 15 / teto1 ]
[16 Teto D4 / 19 119 120 20 / teto2 ]
[17 Teto E1 / 5 10 6 1 30 29 / teto1 ]
[18 Teto E2 / 10 15 11 6 / teto2 ]
[19 Teto E3 / 15 20 16 11 / teto1 ]
[20 Teto E4 / 20 120 116 16 / teto2 ]
[21 Teto Centro / 116 120 119 118 117 / teto1 ]
[23 Parede A1 / 1 2 53 50 / material2 ]
[24 Parede A2 / 50 53 52 51 / vidro ]
[25 Parede A3 / 51 52 102 101 / material2 ]
[26 Parede B1 / 2 23 123 102 52 53 / material2 ]
[27 Parede B2 / 23 24 124 123 / material1 ]
[28 Parede B3 / 24 3 103 124 / material2 ]
[29 Parede C1 / 3 25 125 103 / material2 ]
[30 Parede C2 / 25 26 126 125 / material1 ]
[31 Parede C3 / 26 4 104 126 / material2 ]
[32 Parede D1 / 4 27 127 104 / material2 ]
[33 Parede D2 / 27 28 128 127 / material1 ]
[34 Parede D3 / 28 5 105 128 / material2 ]
[35 Parede E1 / 5 29 129 105 / material2 ]
[36 Parede E2 / 29 30 130 129 / material1 ]
[37 Parede E3 / 30 1 50 51 101 130 / material2 ]
[38 Piso / 101 102 123 124 103 125 126 104 127 128 105 129 130 / piso ]
```

A partir do arquivo de modelagem, o programa gera a seguinte imagem em 3-D do estúdio:

Figura 11: visualização do estúdio pentagonal



As características da fonte e do receptor encontram-se a seguir:

```
SOURCEDEFS
A0 2.50 5.75 -2.50 Omni 2.50 3.45 0.0
Lp1m_a = <87.8 89.2 86.3 86.5 89.8 87.9>

RECEIVERS
1 2.5 1.12 -1.0
```

A fonte simula um amplificador direcionado para o teto com um ângulo de  $47^\circ$  com o chão. O receptor foi definido baseado em um microfone de ambiente localizado a 2,16 metros do chão, próximo à parede com a janela de vidro.

## **10. DIFUSÃO**

Nessa simulação, segundo sugestão do orientador, visou-se analisar os efeitos da difusão dos materiais na acústica de um ambiente. Para isso, foram feitas quatro simulações com diferentes valores de difusão para o material<sup>2</sup>, com menor índice de absorção. Para o teto utilizou-se os mesmos índices de difusão nas simulações.

Na primeira simulação, a difusão utilizada foi de <10 20 30 40 50 60>, que representa as porcentagens de difusão para frequências de 125 a 4000 Hz. Na segunda simulação utilizou-se <10 30 50 70 80 90>. Na terceira foi utilizado uma difusão alta, de <90 90 90 90 90 90> para uma comparação de extremos com a quarta simulação, com índices de <10 10 10 10 10 10>.

Os resultados obtidos, assim como uma análise dos mesmos serão apresentados nas próximas seções do relatório.

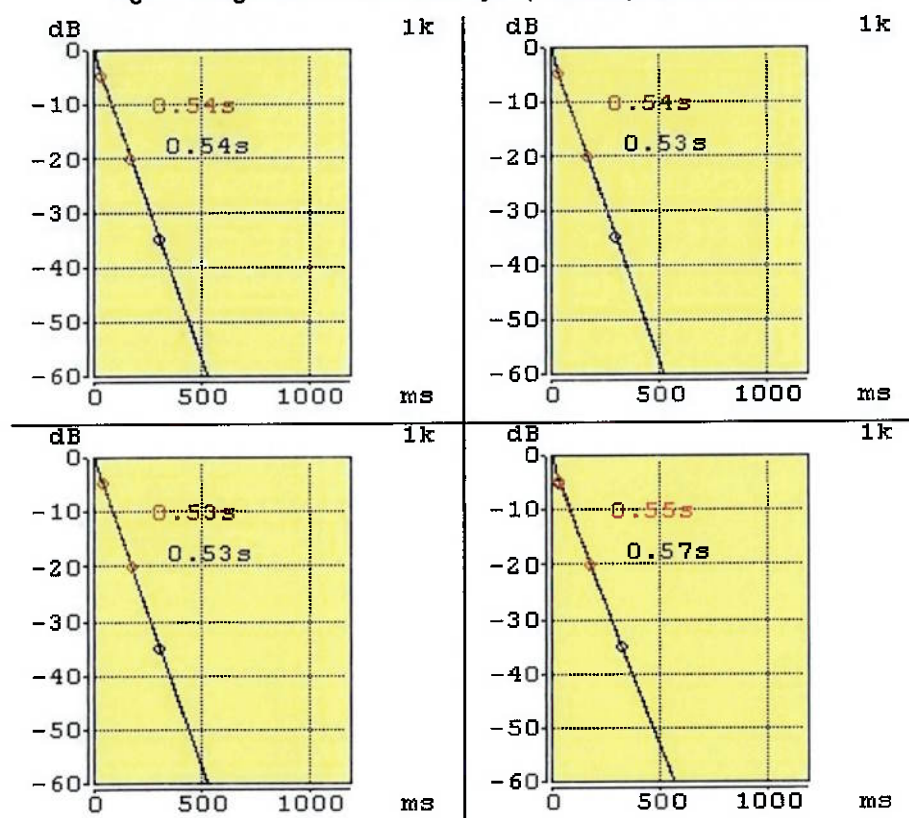
Procurou-se analisar a difusão de uma maneira mais prática, com alguma base na teoria mas com maior ênfase nos resultados conseguidos.

## 11. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Simulou-se a acústica do estúdio com 13000 raios e um tempo de truncagem de 1,2 segundos. O mapeamento dos parâmetros foi feito a uma altura de 1,60 metros do plano do chão, simulando a altura de um microfone.

Os resultados para as quatro simulações não apresentaram grandes diferenças nessa etapa de medição dos parâmetros acústicos. A seguir apresentam-se os gráficos do tempo de reverberação para a frequência de 1 kHz para as quatro simulações:

Figura 12: gráficos de reverberação para frequência de 1 kHz



Vê-se que há diferenças muito sutis e, como esperado, temos maior amplitude de resultados nas simulações 03 e 04 (casos extremos).

Também para fins comparativos, a figura a seguir mostra diferentes valores para os parâmetros acústicos estudados:

Figura 13: parâmetros acústicos para as simulações

|      |         |      |         |
|------|---------|------|---------|
| EDT  | 0.52 s  | EDT  | 0.53 s  |
| T-15 | 0.53 s  | T-15 | 0.53 s  |
| T-30 | 0.54 s  | T-30 | 0.53 s  |
| D-50 | 76.1 %  | D-50 | 76.2 %  |
| C-80 | 9.1 dB  | C-80 | 9.1 dB  |
| LEF1 | 45.1 %  | LEF1 | 43.0 %  |
| LEF2 | 31.2 %  | LEF2 | 29.5 %  |
| Ts   | 34.6 ms | Ts   | 34.1 ms |
| SPL  | 86.4 dB | SPL  | 86.4 dB |
| G-10 | 20.0 dB | G-10 | 19.9 dB |
| EDT  | 0.53 s  | EDT  | 0.56 s  |
| T-15 | 0.53 s  | T-15 | 0.55 s  |
| T-30 | 0.53 s  | T-30 | 0.57 s  |
| D-50 | 74.2 %  | D-50 | 74.8 %  |
| C-80 | 8.8 dB  | C-80 | 8.4 dB  |
| LEF1 | 42.1 %  | LEF1 | 45.6 %  |
| LEF2 | 28.2 %  | LEF2 | 32.3 %  |
| Ts   | 36.2 ms | Ts   | 35.9 ms |
| SPL  | 86.1 dB | SPL  | 86.1 dB |
| G-10 | 19.6 dB | G-10 | 19.6 dB |

Aqui as mesmas diferenças sutis se aplicam. Fica claro que o parâmetro mais afetado pela mudança na difusão é o LEF (*lateral measures*), ou seja, a fração da pressão sonora captada pelas laterais. Tal fração é indiretamente proporcional à difusão aplicada nas quatro simulações, e é consequência de uma maior absorção das ondas sonoras após as mesmas serem difundidas (diversas ondas com intensidades menores).

A seguir têm-se os gráficos do mapeamento dos parâmetros. Feitas as simulações, concluiu-se que não há diferenças consideráveis entre elas, então optou-se por apresentar somente um resultado como sendo o padrão. Pode-se ver que o tempo de reverberação ( $RT'$ ) tem um valor considerado bom para os padrões musicais, entre 0,4 e 0,6 segundos.

O C-80 também se mostrou adequado segundo teoria. Ele indica o nível de clareza e nesse caso está na faixa de 8 a 10 dB. Pode-se notar também que as regiões próximas à fonte possuem comportamento diferenciado em todos os parâmetros, ou seja, o estúdio mostra-se com qualidade apenas nas regiões um pouco afastadas da fonte.

As regiões localizadas atrás da fonte não se mostraram favoráveis, como se pode notar. O índice LEF apresentou maiores sensibilidades, uma vez que tem distribuição diferenciada das demais.

Como se estava utilizando a versão completa do programa, foi escolhido um mapeamento mais detalhado, com um passo de 0,10 metros para cada medição. Desse modo, pode-se ver que o resultado é mais completo e é possível analisar áreas menores da qualidade acústica.

Figura 14: mapeamento dos parâmetros para 1kHz

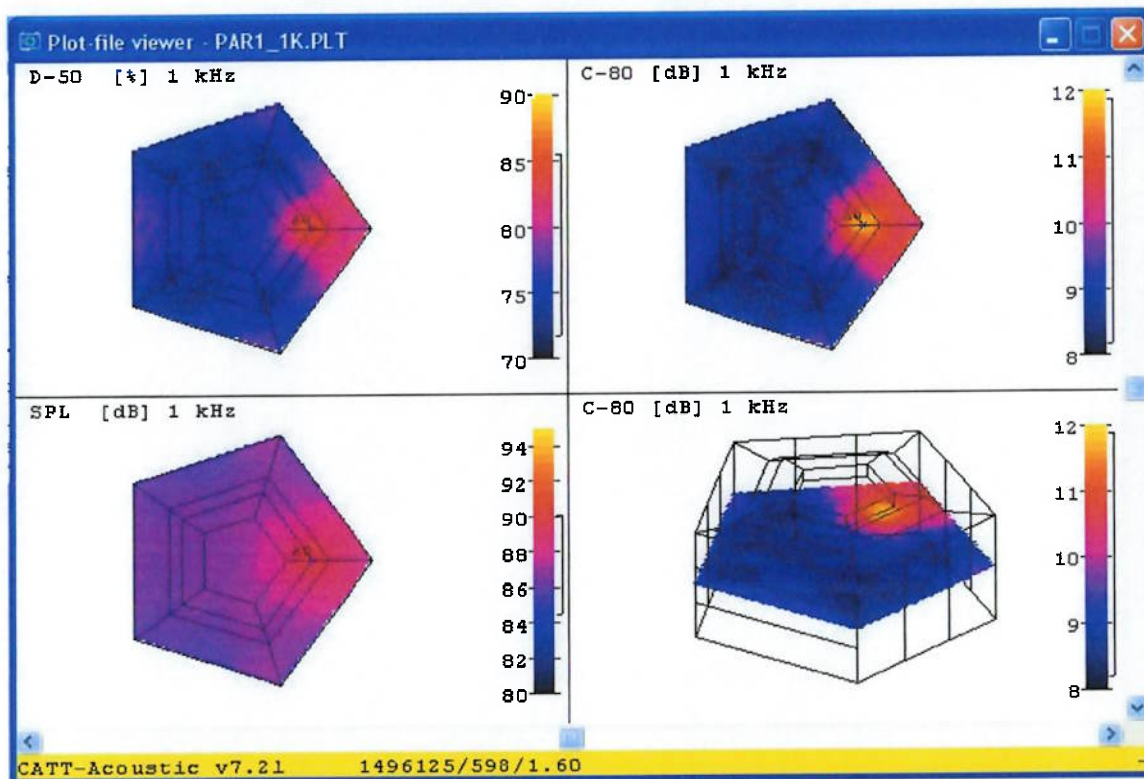
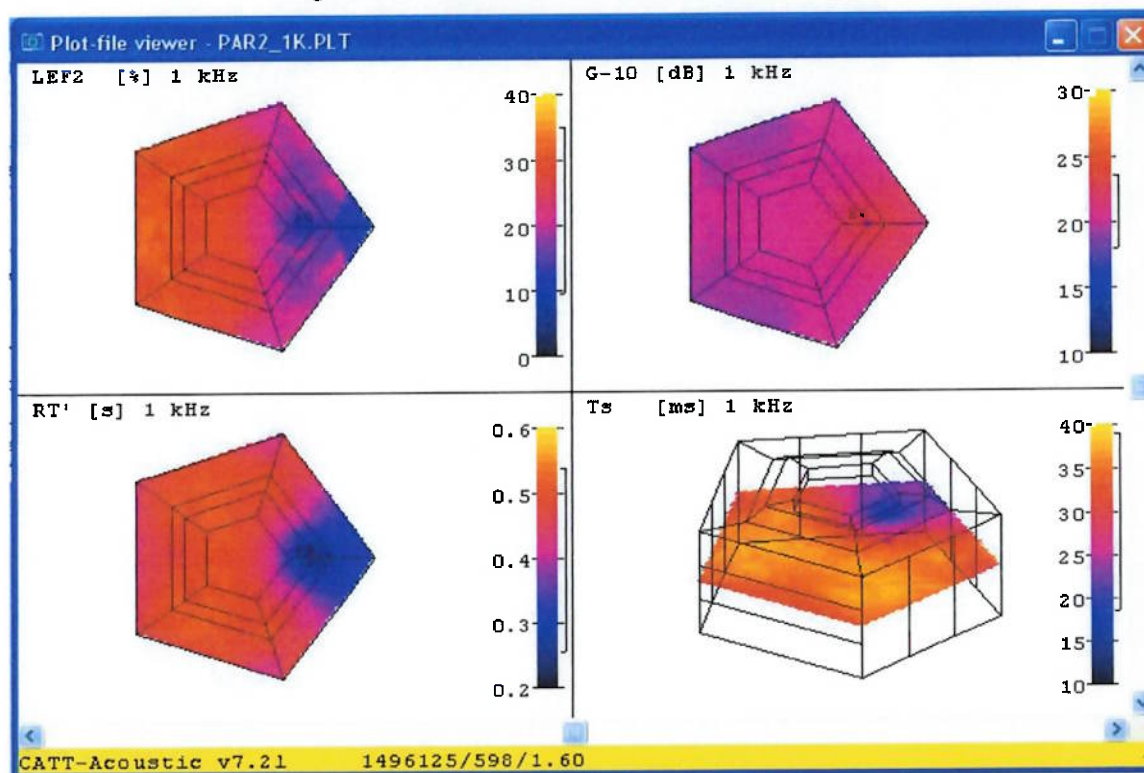
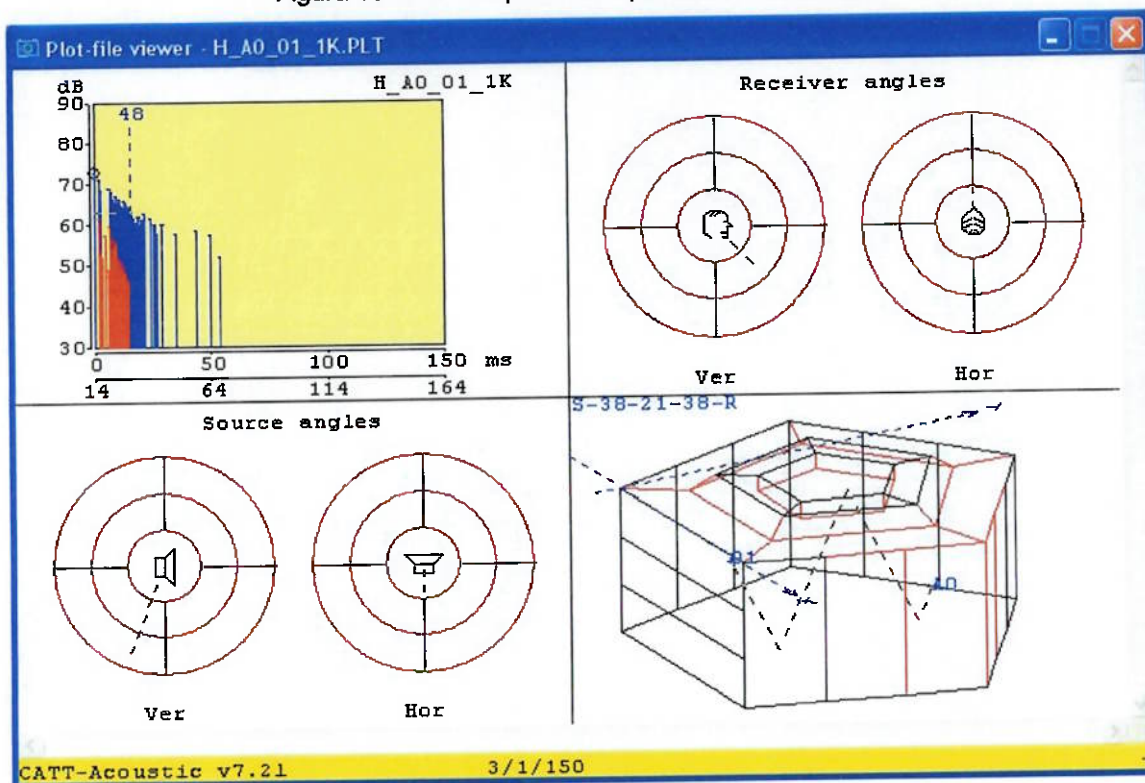


Figura 15: mapeamento dos parâmetros para 1kHz



Também com a finalidade ilustrativa, apresenta-se a seguir um gráfico com o caminho de uma onda sonora e as direções da saída e chegada da mesma, assim como também um gráfico do tempo de reverberação detalhado para cada raio escolhido.

Figura 16: caminho percorrido por uma onda sonora.



## 12. POST-PROCESSING

Depois de feitas as simulações da acústica do estúdio, foi realizada o *post-processing*, que se resume à obtenção da resposta impulsiva binaural de reverberação do ambiente e a convolução da mesma com o som anecóico. Os gráficos a seguir representam as respostas para o lado esquerdo e direito para cada simulação. Há diferenças sutis entre os quatro casos, porém tal diferença pode ser essencial na escolha de um estúdio.

Os arquivos obtidos são elementos chave para a continuação do projeto, uma vez que a resposta impulsiva binaural caracteriza os efeitos *surround* do ambiente em questão.

Figura 17: resposta binaural para a primeira simulação.

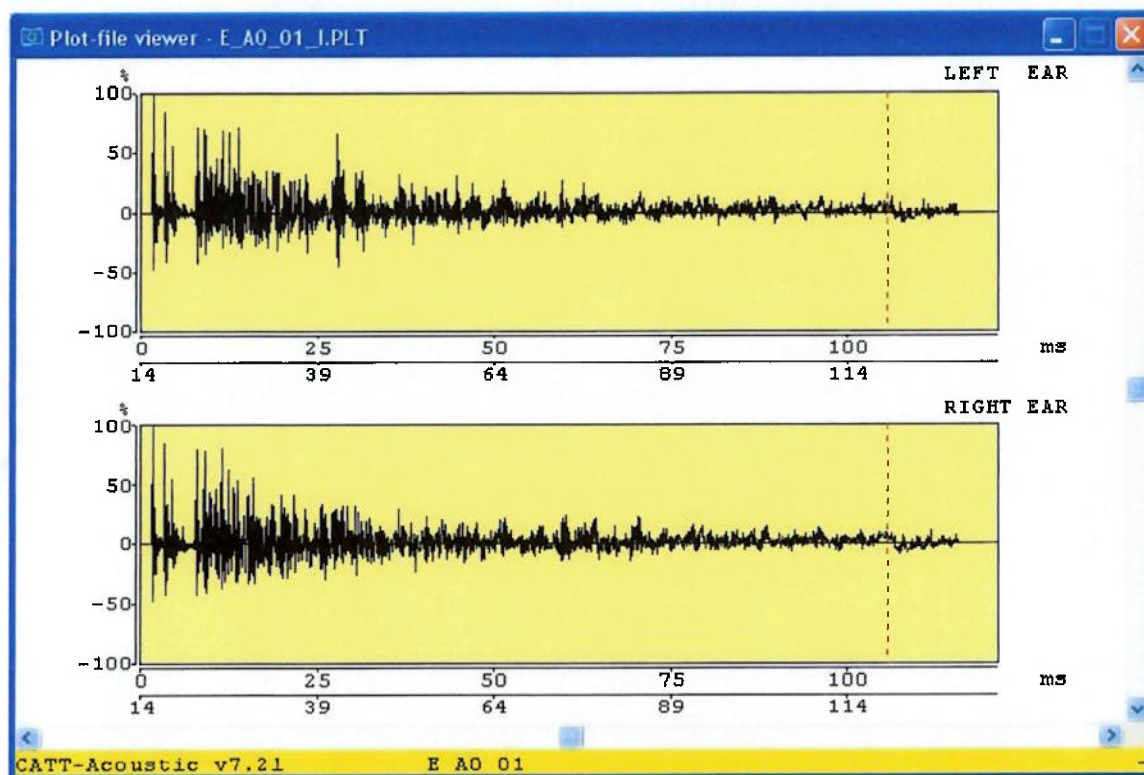


Figura 18: resposta binaural para a segunda simulação.

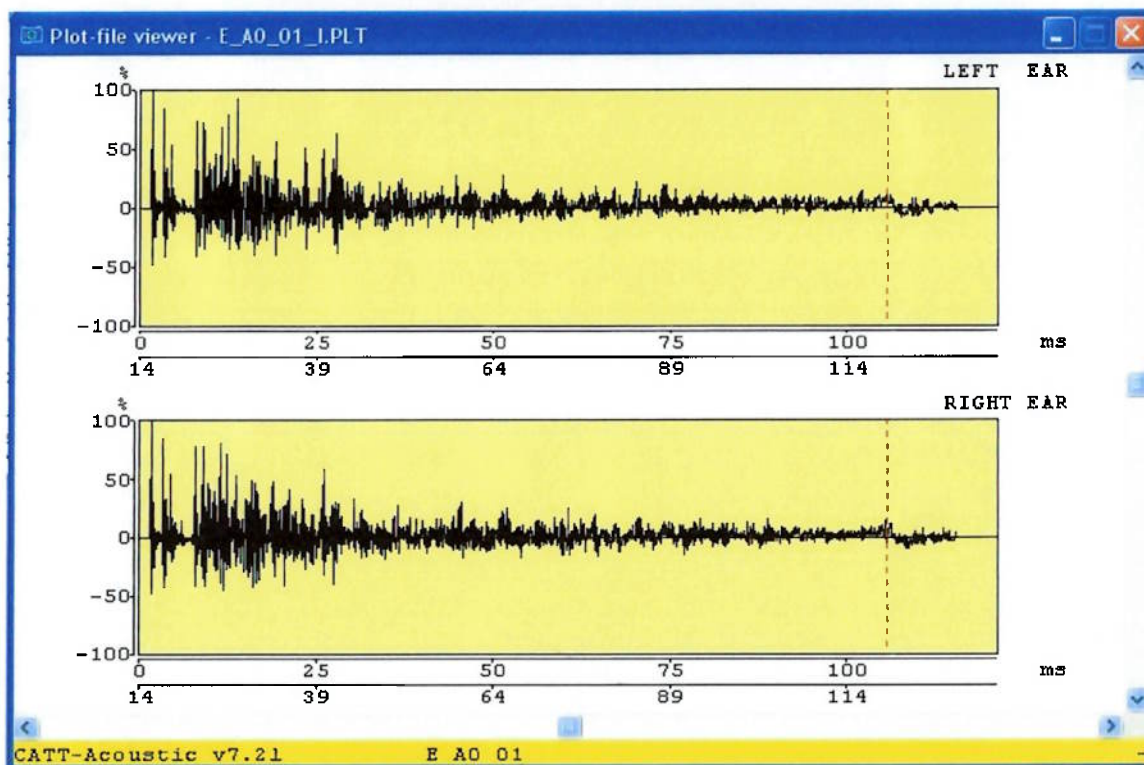


Figura 19: resposta binaural para a terceira simulação.

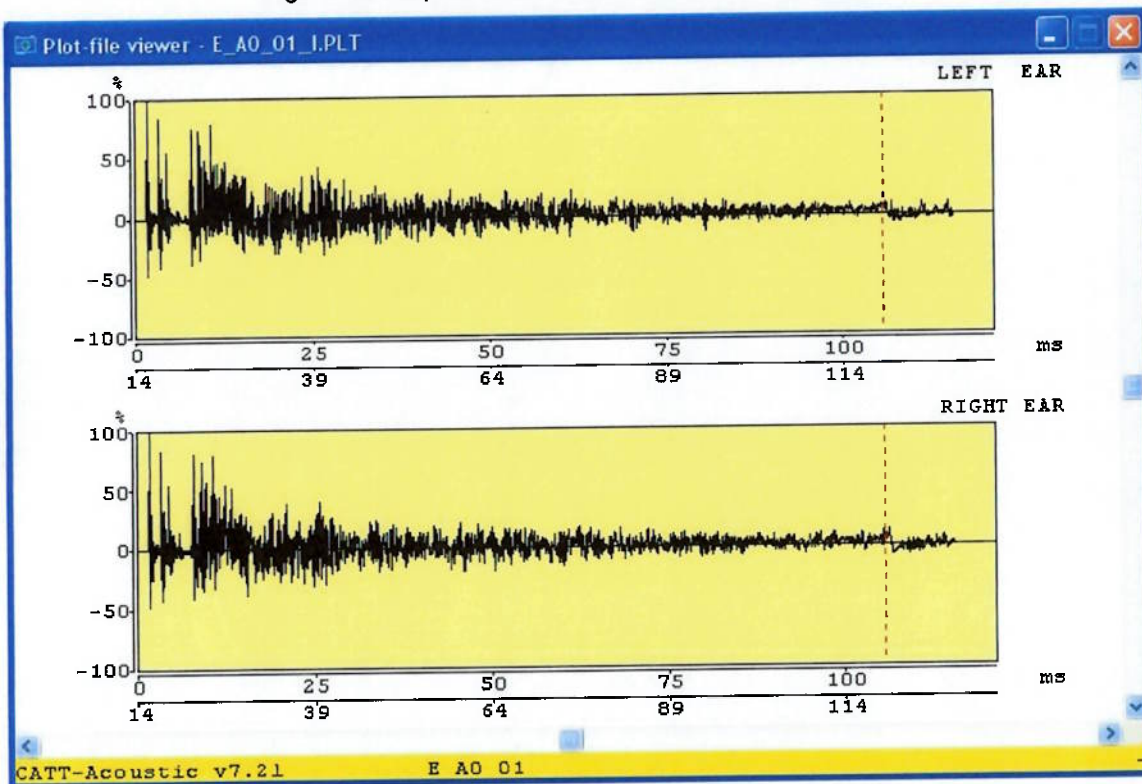
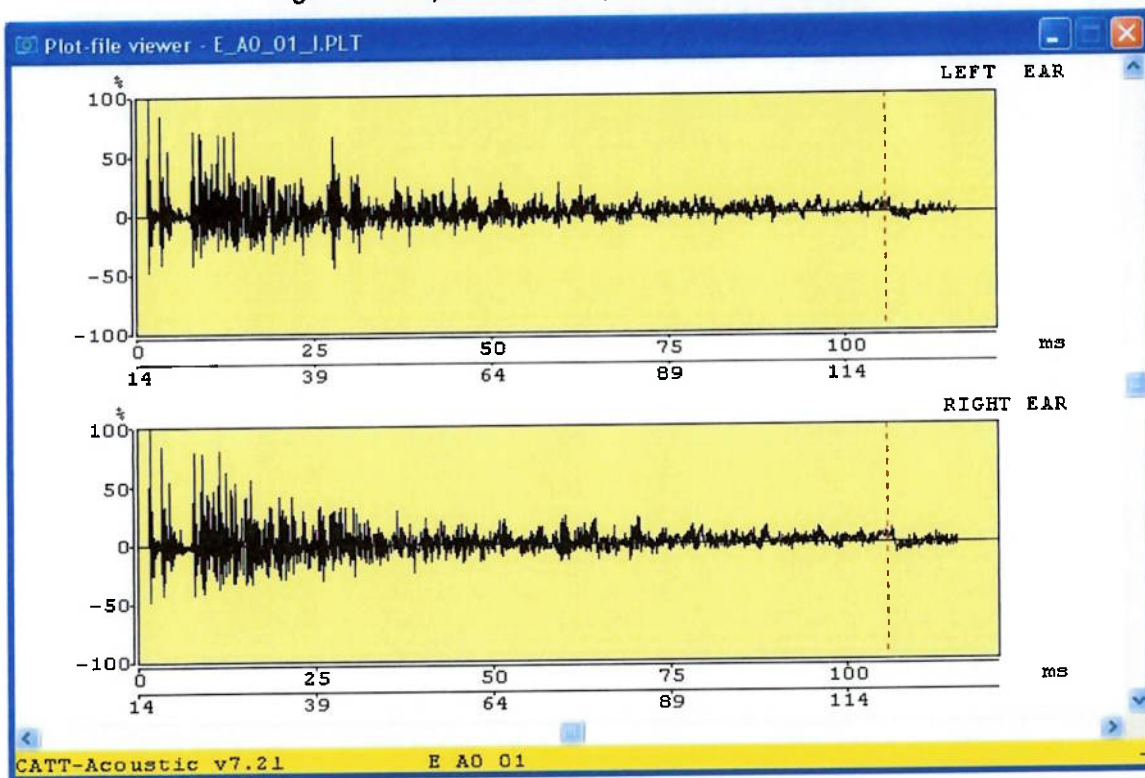


Figura 20: resposta binaural para a quarta simulação.



### 13. AURALIZAÇÃO

A etapa de auralização é a mais esperada e o objetivo final do projeto. O próprio programa *CATT-Acoustics* já possui as ferramentas necessárias. Feitas as auralizações para cada caso, pode-se avaliar qualitativamente cada simulação, de modo a escolher o melhor para uma finalidade determinada. Segue em anexo ao trabalho um CD com as faixas auralizadas, assim como também a faixa com a música anecóica.

Analisando cada auralização, vê-se que há diferenças perceptíveis principalmente para os casos extremos (03 e 04). Como visto na análise dos resultados das simulações, o caso 04 possui um maior tempo de reverberação, resultando em um som com mais eco que no caso 03, que possui menor tempo de reverberação. Tal fato também é justificado pelo fato de que na simulação 04 os valores de LEF (*lateral measures*) também são consideravelmente maiores.

Quanto à difusão, o som com mais eco é justificado pois como seu índice de difusão é baixo, os raios incidentes são refletidos com maior intensidade (não são separados, distribuídos ou difundidos), causando maior tempo de reverberação uma vez que os mesmos demorarão mais para serem absorvidos. No caso oposto, a mesma teoria se aplica, acarretando em uma absorção mais rápida, menor tempo de reverberação e um som mais “seco”.

O tempo de reverberação alto para as baixas frequências influi diretamente na qualidade do som, não o deixando com muita clareza.

Pode-se ilustrar a auralização mostrando as mudanças no formato do gráfico de cada convolução feita para as quatro simulações, onde:

Figura 21: gráfico da primeira simulação

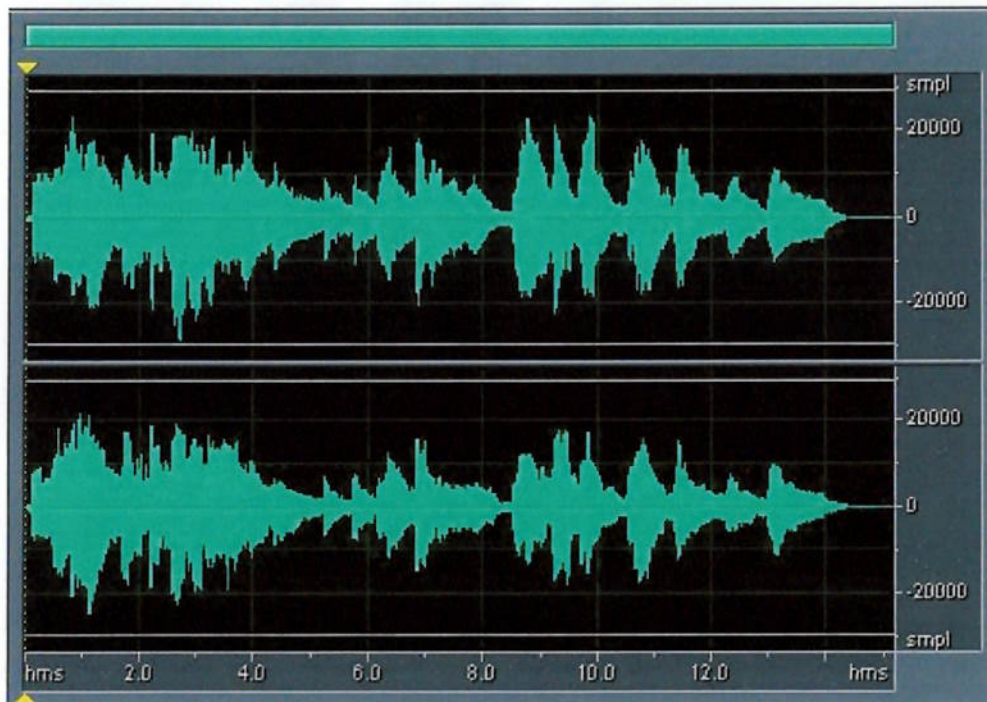


Figura 22: gráfico da segunda simulação

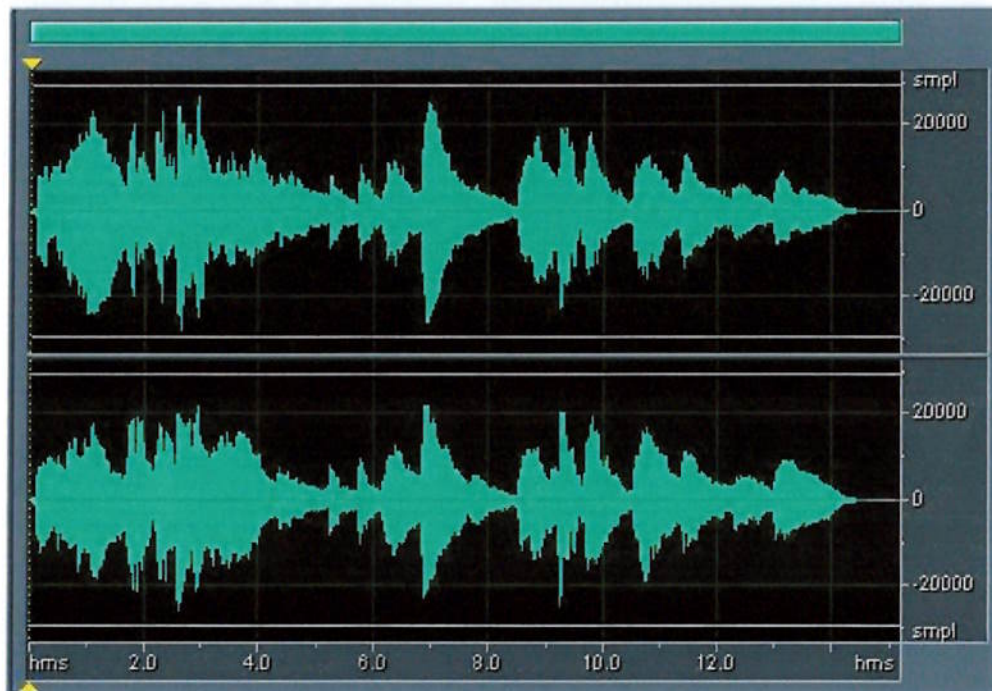


Figura 23: gráfico da terceira simulação

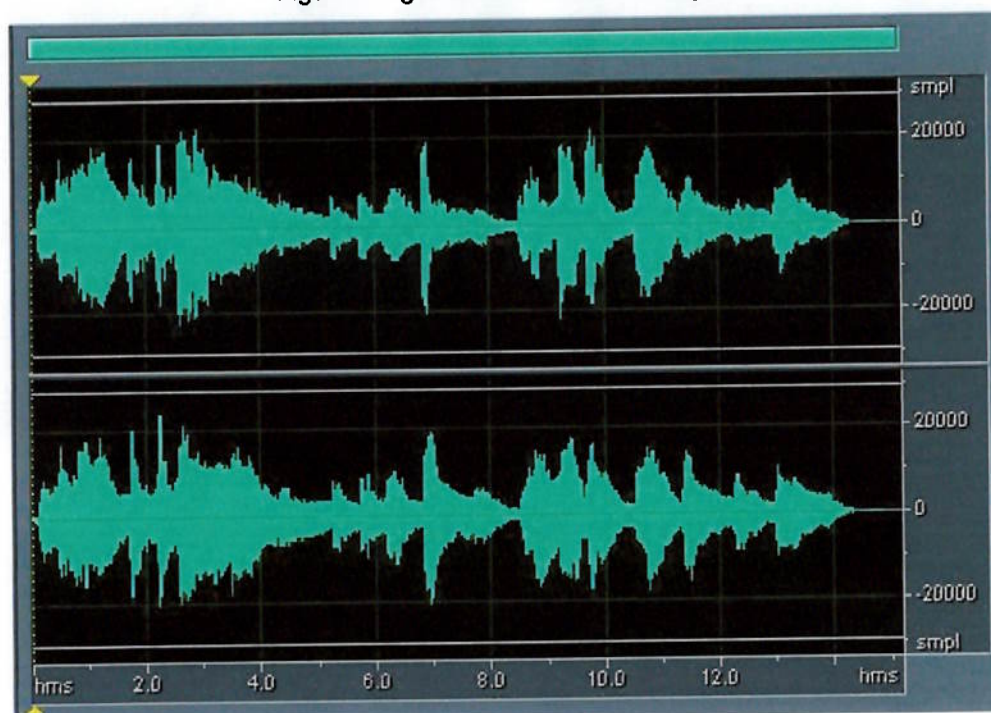
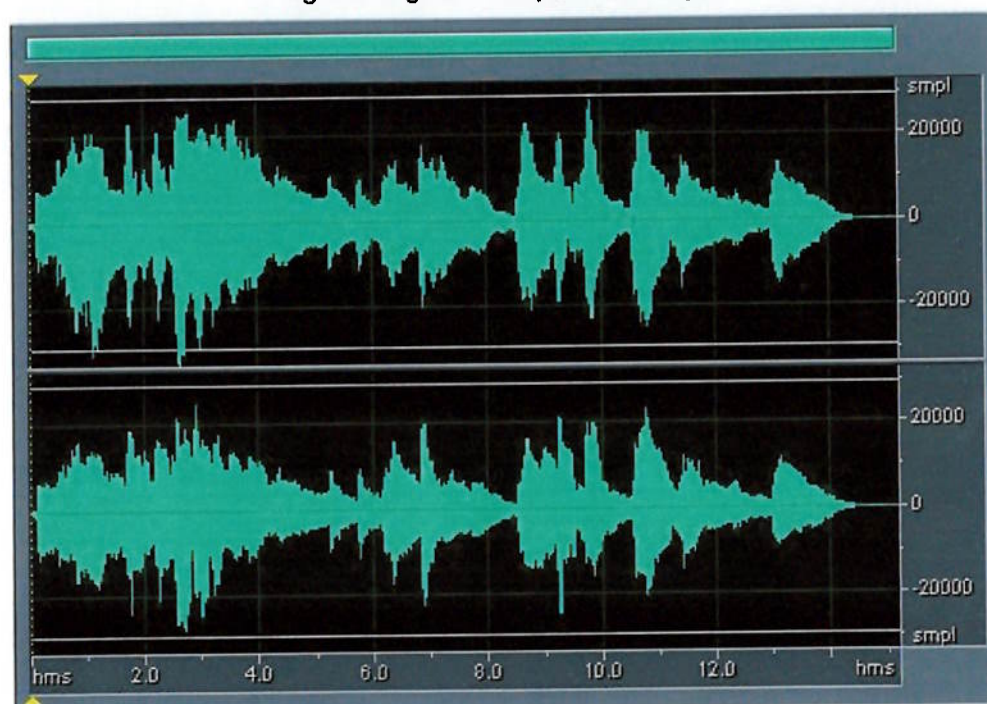


Figura 24: gráfico da quarta simulação



## 14. CONCLUSÕES

O trabalho feito no primeiro semestre de 2003 foi abordado com a finalidade de familiarização com o assunto para poder avaliar em termos paramétricos a qualidade da acústica de uma sala (no caso, estúdio). A versão *demo* do software *CATT-Acoustics* mostrou-se bastante eficaz nas atividades realizadas nessa etapa, no entanto é deficiente de certos recursos para a continuidade do projeto. Com a versão completa do programa foi possível fazer uma análise mais completa e confiável do estúdio, além das etapas de *post-processing* e de auralização.

Certamente as características de absorção dos materiais são mais influentes em um projeto de acústica, pois suas variações afetam bruscamente nos resultados. Porém o intuito desse projeto foi de, após determinados os valores de absorção, realizar uma sintonia fina nas propriedades difusivas a fim de otimizar o ambiente acústico. Esse recurso não é usualmente utilizado em projetos acústicos, e o principal objetivo foi de inovar os conceitos de otimização.

Os resultados obtidos mostram que há diferenças quando se trabalha com valores de difusão distintos, deixando claro que o processo de otimização não deve ser limitado apenas nos conceitos de absorção. No entanto, de acordo com a experiência do orientador e co-orientador, vê-se que os efeitos da difusão são mais agravantes quando testados na prática, sendo que deve haver uma alta qualidade nos dados de simulação para se obter resultados numéricos significativos.

As auralizações no CD anexado têm como objetivo fazer com que o leitor possa tirar suas próprias conclusões e avaliar de forma subjetiva os resultados mostrados.

## 15. BIBLIOGRAFIA

- DE MARCO, CONRADO SILVA, "Elementos de Acústica Arquitetônica", Ed. Nobel (1982);
- <http://www.fe.up.pt/~carvalho/aae97.htm>, *site* da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto;
- <http://orion.ipt.pt/~cferreir/index.html>, *site* da Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Politécnico de Tomar Quinta do Contador (Portugal);
- <http://www.catt.se>, *site* do programa *CATT-Acoustics*.
- <http://quark.fe.up.pt/deqwww/amiii/am-book/sec?8-10> - Site da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto na área do professor Jaime Enrique Villate Matiz;
- <http://www.if.ufrgs.br/ast/med/imagens/node51.htm> - Site do Instituto de Física da UFRGS;
- "Implementação em DSP de um Sistema "Real Time Analyzer" aplicado à Igualização Adaptativa", Gabriel Falcão Paiva Fernandes, 03/2002.

## **16. ANEXO**

**TABELA PADRÃO PARA CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO DE AMBIENTES**

| Material                                                   | Superfície | Área (m2) | Índice | Bandas de frequências |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------|------------|-----------|--------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                                            |            |           |        | 125                   | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | NRC  |
| Alvenaria de tijolos aparentes                             | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,03                  | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,04 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Alvenaria de tijolos aparentes pintados                    | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,01                  | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,02 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Alvenaria de blocos aparentes pintados                     | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,10                  | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,08 | 0,08 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Alvenaria de tijolos ou blocos rebocados                   | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,15                  | 0,11 | 0,10 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,09 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Reboque ou gesso rústico sobre alvenarias quaisquer        | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,02                  | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,04 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Reboque ou gesso desempenado sobre alvenarias quaisquer    | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,02                  | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Concreto armado aparente tratado e polido                  | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,01                  | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Divisória de gesso tipo dry-wall com ou sem enchimento     | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,10                  | 0,08 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,05 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Lambris ou divisória de madeira compensada, 5 a 8mm        | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,58                  | 0,22 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,07 | 0,17 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Lambris tipo macho-fêmea, padrão cedro, mogno ou marfim    | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,24                  | 0,19 | 0,14 | 0,08 | 0,13 | 0,10 | 0,15 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Porta de madeira comum para pintura ou verniz              | Portas     | 0,00      | alfa   | 0,24                  | 0,19 | 0,14 | 0,08 | 0,13 | 0,10 | 0,15 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Porta acústica de madeira para pintura ou verniz           | Portas     | 0,00      | alfa   | 0,15                  | 0,11 | 0,10 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,09 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Vidro fixo, temperado ou laminado, 8 a 10mm                | Janelas    | 0,00      | alfa   | 0,05                  | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| Vidro comum, 4 a 6mm, montado em caixilho (fechado)        | Janelas    | 0,00      | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
|                                                            |            |           | alfa   | 0,10                  | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,05 |
| Painel de cortiça, 5 a 10mm, sobre alvenarias quaisquer    | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,05                  | 0,05 | 0,05 | 0,08 | 0,01 | 0,13 | 0,06 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Revestimento de paredes em azulejos ou pastilhas           | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,02                  | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,04 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Revestimento de paredes em mármore ou granito polido       | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,01                  | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cortina de tecido leve, esticada, em contato com a parede  | Paredes    | 0,00      | alfa   | 0,03                  | 0,04 | 0,11 | 0,17 | 0,24 | 0,35 | 0,16 |
| Cortina de tecido médio, drapeada em 50%da área            | Paredes    | 0,00      | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
|                                                            |            |           | alfa   | 0,07                  | 0,31 | 0,49 | 0,75 | 0,70 | 0,60 | 0,49 |
| Cortina de tecido pesado, drapeada em 50% da área          | Paredes    | 0,00      | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
|                                                            |            |           | alfa   | 0,14                  | 0,35 | 0,55 | 0,72 | 0,70 | 0,65 | 0,52 |
| ABSORÇÃO TOTAL DE PAREDES, PORTAS E JANELAS                |            |           |        | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Concreto armado ou cimentado liso desempenado              | Pisos      | 0,00      | alfa   | 0,01                  | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Paviflex ou plurgoma colado sobre concreto desempenado     | Pisos      | 0,00      | alfa   | 0,02                  | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cerâmica, mármore ou granito polido                        | Pisos      | 0,00      | alfa   | 0,01                  | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Assoalho em tábuas corridas quaisquer                      | Pisos      | 0,00      | alfa   | 0,15                  | 0,11 | 0,10 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,09 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Tacos de madeiras quaisquer colados sobre contrapiso       | Pisos      | 0,00      | alfa   | 0,04                  | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,06 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Carpete tipo forração simples colado sobre contrapiso      | Pisos      | 0,00      | alfa   | 0,05                  | 0,05 | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,18 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Carpete tipo forração alto-tráfego colado sobre contrapiso | Pisos      | 0,00      | alfa   | 0,05                  | 0,10 | 0,15 | 0,30 | 0,50 | 0,55 | 0,28 |
|                                                            |            |           | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Carpete 6mm, nylon, sobre manta de feltro                  | Pisos      | 0,00      | alfa   | 0,05                  | 0,10 | 0,10 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,24 |
| Carpete 10mm, nylon, sobre manta de feltro                 | Pisos      | 0,00      | A      | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| ABSORÇÃO TOTAL DE PISOS                                    |            |           |        | 0,00                  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Lambris tipo macho-fêmea, padrão                           | Forros     | 0,00      | alfa   | 0,24                  | 0,19 | 0,14 | 0,08 | 0,13 | 0,10 | 0,15 |

