

Anna Carolina Ripke Gaspar

# ESTUDOS DE ESTRATÉGIAS NÃO-CONVENCIONAIS DE ACÚSTICA VARIÁVEL

STUDY OF NON-CONVENTIONAL VARIABLE ACOUSTICS

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no Ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano, orientada pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes

Coimbra, 05 de março de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Anna Carolina Ripke Gaspar

# Estudos de Estratégias Não-Convencionais de Acústica Variável

## Study of Non-Conventional Variable Acoustics

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no Ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano,  
orientada pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

Coimbra, 05 de março de 2018

## AGRADECIMENTOS

Para a realização desta dissertação foi imprescindível o apoio de várias pessoas, desde acadêmico, material e psicológico. Desejo manifestar meu sincero agradecimento a todos que de alguma forma contribuíram.

Desde logo aos meus orientadores, Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes, por terem acreditado na minha ideia, pela constante disponibilidade para a orientação do trabalho, pelo incentivo, pelos conselhos e sugestões.

Ao Professor Doutor Diogo pela sua disponibilidade em poder sanar dúvidas sobre a modelação da estrutura no software.

Agradeço a empresa Castelhana & Ferreira pelo fornecimento de material para a elaboração do protótipo, sem este não seria possível realizar a parte laboratorial do meu estudo.

Ao meu namorado, William Schneider Rabelo, por ter me dado o apoio necessário para conseguir enfrentar essa etapa, pela sua paciência, compreensão e pelo apoio emocional.

Aos meus pais, Lilianny Ripke Gaspar e Rogério Marcos Gaspar, que puderam me proporcionar uma experiência extremamente enriquecedora para minha vida e que sempre acreditaram no meu potencial.

Agradeço aos amigos que me ajudaram desde na realização dos ensaios até aos que disseram palavras de motivação.

## RESUMO

Devido ao aumento da urbanização, tanto em países do mundo desenvolvido como em desenvolvimento, e à crescente utilização das edificações modernas para múltiplos propósitos, o ruído tem sido identificado como um dos principais fatores responsáveis pelos problemas de conforto em ambientes urbanos. O controle de seus níveis dentro das edificações traz inúmeros benefícios para seus ocupantes e as organizações para as quais essas pessoas trabalham, pois níveis muito altos de ruído em determinadas frequências podem levar a uma perda de concentração, problemas psicológicos e, conseqüentemente, menores níveis de produtividade e qualidade de vida. Portanto, estudos de soluções para o melhoramento de ambientes de uso coletivo e com características de multi-uso, são cada vez mais necessários, visto que grande parte dos dados coletados pelos *Smart Buildings* visam sempre o bem estar de seus ocupantes. Paralelamente, pode-se até referir que, com o maior uso de sensores em edificações inteligentes e *Smartphones* por seus usuários, a coleta de dados tornar-se-á algo recorrente em um futuro próximo, e tal tendência abre caminho para que as soluções acústicas possam se beneficiar destes dados e proporcionar uma melhor adaptação de conforto acústico para seus ocupantes em tempo real.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um estudo preliminar de uma solução de acústica variável adaptável a vários cenários, com a aplicação de diferentes configurações geométricas, estudando suas conseqüências na alteração das propriedades acústicas dos ambientes estudados.

No desenvolvimento deste trabalho foi realizada uma simulação numérica de duas situações hipotéticas da aplicação de uma estrutura ajustável em ambientes de uso coletivo, sendo elas uma sala de aula e uma sala de reunião. Diversos parâmetros foram analisados, dentre eles o Tempo de Reverberação, Absorção Sonora, EDT, D50, C50 e STI. Entretanto, nos ensaios de laboratório preliminares foram analisados o Tempo de Reverberação e o Coeficiente de absorção de uma estrutura que combina duas tipologias de painéis, formando triângulos.

Os valores provenientes da simulação numérica foram então utilizados na avaliação das configurações de melhor desempenho, sendo que quando se avalia o quesito absorção sonora, estruturas planas com painéis absorventes perfurados apresentam um melhor desempenho; porém, ao tratar-se de tempo de reverberação, as estruturas triangulares apresentam melhor desempenho. No que concerne à análise dos dados laboratoriais, foi possível perceber uma diferença no coeficiente de absorção de duas disposições diferentes de estruturas triangulares com ângulos internos distintos. Mostrou-se que a alteração geométrica e a mudança nas propriedades acústicas dos painéis possibilitam uma posterior automação dessas estruturas para comportamento dinâmico em função de seu uso em tempo real, o que mostra que estruturas ajustáveis podem ser um caminho natural para a integração de Acústica Variável em *Smart Buildings*.

Palavras-Chave: Acústica Variável, Estruturas Ajustáveis, Estruturas de Origami, Simulação Acústica

## ABSTRACT

Due to the increasing urbanization in developed and developing countries and the growing use of modern multipurpose buildings, noise has been considered one of the main factors that cause discomfort in urban environments. The control of noise levels inside buildings benefits their users and the companies for which they work a great deal, for high levels of noise at certain frequencies may lead to a loss of concentration, psychological problems and consequently, less productivity and quality of life. Therefore, studies that aim at the improvement of collective use multipurpose environments are necessary since data collected by Smart Buildings aim at their occupants' well-being. As sensors and smartphones are increasingly used in smart buildings, data gathering will be something ordinary in the near future and such trend smooths the way for these data to be used for variable acoustic solutions so that the environment is better adapted for the right acoustic comfort for their users in real time.

Thus, the goal of this study is to develop a preliminary analysis of a variable acoustic solution with the application of different geometrical configurations and their effects on the acoustic properties of the environments analysed.

In this study, a numerical simulation of two hypothetical situations concerning the application of a variable structure in collective use environments was carried out. One of them was a classroom and another one was a meeting room. Several parameters were analyzed such as reverberation time, sound absorption, EDT, D50, C50 and STI. However, in the preliminary laboratory tests, reverberation time and the absorption coefficient of a structure that combines two types of panels forming triangles were analyzed.

The numbers from the numerical simulation were then used for the evaluation of the best performance configurations. As sound absorption was analyzed, flat structures with CF6 Plus - Pleno 40 pierced absorbing panels had a better performance. On the other hand, from the point of view of reverberation time, the triangular structures performed better. The analysis of the laboratorial data showed a difference in the absorption coefficient of two different positions of triangular structures with different inside angles. It was also evident that different geometric configurations and changes in the panel acoustic properties enable a future automation of these structures for dynamic behavior in real time, which shows that adjustable structures can be the a natural path towards the integration of variable acoustics and Smart Buildings.

Key words: Variable Acoustics, Adjustable Structures, Origami Structures, Acoustic Simulation

## Índice

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Enquadramento e Motivação.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos do Trabalho.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Estrutura do trabalho.....</b>	<b>2</b>
<b>2 CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE ESPAÇOS FECHADOS.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Introdução ao Conforto Acústico de Salas.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Propagação do Som em Espaços Fechados.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3 Absorção Sonora.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3.1 Conceito.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3.2 Características dos Materiais que Influenciam na Absorção Sonora.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.3 Sistemas Absorventes.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3.3.1 Materiais Porosos.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.3.2 Membranas Ressonantes.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.3.3 Ressonadores de Cavidade.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.3.4 Sistemas Híbridos.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Difusão Sonora.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4.1 Conceito.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4.2 Difusores Acústicos Geométricos.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4.2.1 Superfícies Planas.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4.2.2 Superfícies Triangulares e Piramidais.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4.2.3 Superfícies Curvas.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5 Parâmetros de Qualidade Sonora.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.1 Tempo de Reverberação.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.3 Índice de Transmissão da Linguagem - STI.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5.4 Definição - D50.....</b>	<b>20</b>

2.4.5 Índice de Claridade - C50 .....	20
2.5.6 Níveis de Pressão Sonora - SPL .....	21
<b>3 ACÚSTICA VARIÁVEL.....</b>	<b>22</b>
3.1 Soluções Baseadas na Variação do Volume da Sala .....	23
3.2 Soluções Baseadas na Variação da Absorção da Sala .....	25
3.3 Sistemas Eletroacústicos .....	27
3.4 Estruturas Ajustáveis de Acústica Variável.....	29
3.4.1 Estudos Relacionados a Estruturas de Origami .....	30
3.4.2 Conceito da Geometria Estudada .....	33
<b>4 SIMULAÇÃO ACÚSTICA.....</b>	<b>38</b>
4.1 CATT-Acoustic® .....	38
4.2 Acústica Geométrica - Método Estocástico .....	38
4.3 Modelação dos Casos de Estudo .....	40
4.3.1 Definição das Posições do Emissor e dos Pontos Receptores.....	43
4.3.2 Definição dos Materiais.....	45
4.4 Dados e Análises das Simulações.....	47
4.4.1 Sala de Aula .....	47
4.4.1.1 Tempo de Reverberação .....	47
4.4.1.2 Tempo de Reverberação Mais Curto – EDT .....	50
4.4.1.3 Índice de Transmissão da Linguagem – STI .....	50
4.4.1.4 Definição - D50 .....	51
4.4.1.5 Índice de Claridade - C50.....	52
4.4.1.6 Níveis de pressão sonora – SPL.....	53
4.4.1.7 Absorção Média da Sala ( $\alpha$ ).....	55
4.4.2 Sala de Reunião .....	56
4.4.2.1 Tempo de Reverberação .....	56
4.4.2.2 Tempo de Reverberação Mais Curto – EDT .....	58
4.4.2.3 Índice de Transmissão da Linguagem – STI .....	59
4.4.2.4 Definição - D50 .....	59
4.4.2.5 Índice de Claridade - C50.....	60
4.4.2.6 Níveis de Pressão Sonora – SPL.....	61

---

<b>4.4.2.7 Absorção Média da Sala <math>\alpha</math></b> .....	63
<b>5 ANÁLISE LABORATORIAL PRELIMINAR</b> .....	64
<b>5.1 Apresentação do Protótipo</b> .....	64
<b>5.2 Equipamentos</b> .....	66
<b>5.3 Metodologia</b> .....	66
<b>5.4 Tratamento dos Dados</b> .....	68
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	74
<b>6.1 Estudos Futuros</b> .....	75
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	76
<b>ANEXO A</b> .....	79



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e Motivação

A partir do início do século XX, é cada vez mais perceptível que a Lei de Moore tem mudado drasticamente inúmeros campos do conhecimento, seja pelo simples incremento na capacidade de computação ou pelo seu impacto na produtividade industrial e na versatilidade dos novos produtos por ela desenvolvidos. Essa nova realidade mudou a forma como os seres humanos se relacionam em sociedade e também mudou a forma como vemos os espaços de uso comum. Para se adaptar a essa nova realidade diversas inovações vêm sendo implementadas, focando em uma maior interação do espaço com o usuário, fazendo com que o ambiente se adapte às necessidades daquele instante em função dos dados coletados de seus ocupantes. Tal tendência deu origem ao termo *Smart Building*, ou Edificação Inteligente em português.

Nesses novos tempos, a acústica terá um papel fundamental para proporcionar um maior conforto e bem-estar para os ocupantes dos edifícios, e, por conta disso, ao longo das últimas décadas cada vez mais soluções na área da acústica variável vêm sendo desenvolvidas. Pelo fato da acústica ser um dos ramos relacionados com o conforto em edificações que necessitam de trabalhar com a geometria do ambiente e seu volume, nas soluções procuradas tendem a prevalecer também aspectos visuais em seus projetos.

As preocupações relacionadas com o ambiente construído têm crescido nas últimas décadas no mundo desenvolvido e em desenvolvimento. Tais preocupações relacionam-se também com o recente aumento dos níveis de ruído presentes em ambientes urbanos. No caso do mundo em desenvolvimento, isso se dá por conta do aumento desordenado das cidades e sua má gestão urbana, visto que quase não há distinção entre zonas comerciais e residenciais nas grandes capitais da América Latina e Ásia. Com isso em mente, os governos e empresas dessas regiões têm dado maior atenção à qualidade de vida de seus cidadãos e seus empregados; isso dá-se pela significativa redução em gastos com saúde pública e maior produtividade quando se foca na prevenção de doenças, sejam elas fisiológicas ou psíquicas. Por conta disso, um aspecto muito importante do ambiente construído, que não recebia a devida atenção e que recentemente tem entrado cada vez mais na pauta de política pública, é o conforto acústico.

Visto que as edificações modernas possuem ambientes com mais de um propósito, como por exemplo escritórios compartilhados, salas de aula em ambiente universitário e auditórios, é cada vez mais importante o estudo de novas soluções no campo da acústica que permitam uma adaptação dos ambientes a várias funções. Com isso em mente, neste trabalho são

---

estudados diferentes tipos de configurações geométricas obtidas de uma estrutura de origami e a caracterização de suas propriedades acústicas.

## **1.2 Objetivos do Trabalho**

O objetivo deste trabalho é a caracterização preliminar das propriedades acústicas de uma estrutura de acústica variável inspirada no conceito de origami. Para tal estudo, será realizada uma simulação numérica da estrutura em alguns ambientes comuns em edificações modernas e seu impacto na qualidade sonora da mesma, sendo analisados parâmetros acústicos como tempo de reverberação, EDT, definição sonora, índice de claridade, STI, SPL e absorção sonora. Uma outra análise será realizada usando a mesma estrutura, porém com auxílio de um modelo físico em escala real, que será instalado em uma câmara reverberante; neste caso, será analisado o tempo de reverberação e o coeficiente de absorção sonora da estrutura.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho encontra-se em 6 capítulos, sendo o primeiro a Introdução.

Segue-se o Capítulo 2, onde são apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento do condicionamento acústico, primeiramente é referido sobre como se da propagação do som em espaços fechados em relação as primeiras reflexões. De seguida são descritos sistemas de absorção sonora e de difusão, sendo mostrado os conceitos fundamentais de cada um e são mostrados alguns sistemas. Por fim são descritos os conceitos dos parâmetros de qualidade sonora, sendo mostrados os cálculos e avaliações subjetivas quando necessários.

O Capítulo 3 consiste primeiramente na apresentação das técnicas possíveis para a utilização da acústica variável e conseguinte são mostrados os trabalhos que são utilizados como referência para o conceito deste trabalho.

No Capítulo 4 corresponde aos dados da simulação acústica da estrutura de origami no software *CATT-Acoustic*®, foram utilizados duas situações de ambientes para o estudo da estrutura e constam as modulações propostas da estrutura variável, ainda consta os resultados dos parâmetros de qualidade sonora.

No Capítulo 5 estão presentes, o processo de preparo dos protótipos, os equipamentos utilizados durante o ensaio e as análises das medições realizadas.

Por último, no Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões a que se chegou com este trabalho desenvolvido, e foram propostos alguns possíveis trabalhos futuros a serem realizados.

## 2 CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DE ESPAÇOS FECHADOS

### 2.1 Introdução ao Conforto Acústico de Salas

A definição de conforto acústico tem como principal parâmetro um aspecto subjetivo, visto que o julgamento dependerá da percepção dos ocupantes de um determinado ambiente em estudo. Todavia o ouvido humano possui audibilidade nas bandas de frequências entre 20 Hz até 20 kHz, em que baixas frequências correspondem a sons mais graves enquanto que as mais altas correspondem a sons agudos. Portanto, é razoável dizer que o conforto acústico pode ser definido pelos limites estabelecidos pela própria tolerância do ouvido humano às pressões sonoras e frequências, podendo tais limites ser observados na Figura 2.1. (Isbert, 1998)

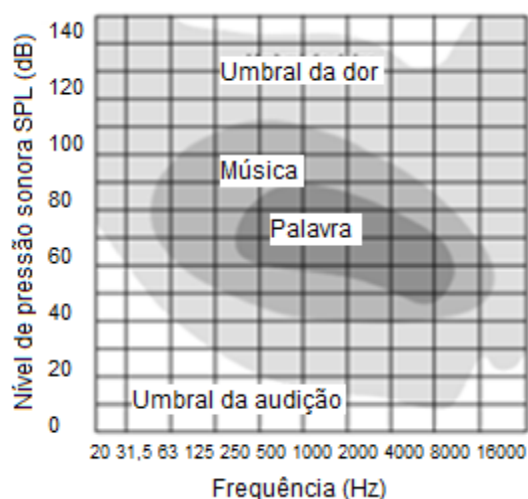


Figura 2.1- Níveis audíveis em função da frequência junto com as zonas correspondentes a música e a palavra. (Isbert, 1998)

Outro aspecto importante é a percepção da palavra falada; tal percepção está diretamente associada a frequências mais altas correspondentes às consoantes, por conseguinte é justo dizer que, em ambientes tais como auditórios, salas de aula e de reuniões, o conforto acústico também está associado a uma boa percepção dessas frequências. Além disso, outro ponto importante na hora de considerar um ambiente adequado em termos de qualidade acústica, é sua capacidade de isolar ruídos provenientes de fora da edificação

## 2.2 Propagação do Som em Espaços Fechados

O som em sua definição é uma das formas de propagação de energia. Há três meios mais comuns na construção civil onde o som se propaga: uma delas se dá em meio gasoso, outra em meio líquido, enquanto a última ocorre por meio sólido. Nos estudos da propagação do som em espaços fechados sempre há uma fonte emissora e um elemento receptor; o som chega até ao receptor de duas maneiras. A primeira é de forma direta, em outras palavras, em campo livre ou sem obstáculos, sendo que a forma direta está intimamente ligada apenas à distância entre fonte emissora e o receptor. A outra maneira se dá por reflexão, sendo que dependerá do caminho percorrido pelo raio sonoro e das características absorventes das superfícies das envolventes. Portanto, a distância entre as fontes e as características absorventes dos materiais presentes no ambiente irão determinar a energia associada ao som na fonte receptora, quanto maiores essas características menor será a energia associada às reflexões.

As reflexões se dividem em dois tipos, as primeiras reflexões e as reflexões tardias. Mesmo que a percepção das reflexões no ponto receptor seja de forma contínua, há diferença entre os tipos de reflexões devido a ordem de incidência sobre as superfícies do recinto. As primeiras reflexões são consideradas de baixa ordem devido ao fato de que os raios sonoros incidem poucas vezes nas superfícies do recinto antes de chegar ao ponto receptor. De uma forma mais prática estabelece-se um limite temporal para a zona das primeiras reflexões, por volta de 100 ms da chegada do som direto, mesmo que este valor acabe variando devido à forma e ao volume do ambiente estudado; a Figura 2.2 mostra o reflectograma associado diretamente ao som, onde a primeira zona corresponde às primeiras reflexões e a restante à zona das reflexões tardias. (Isbert, 1998)

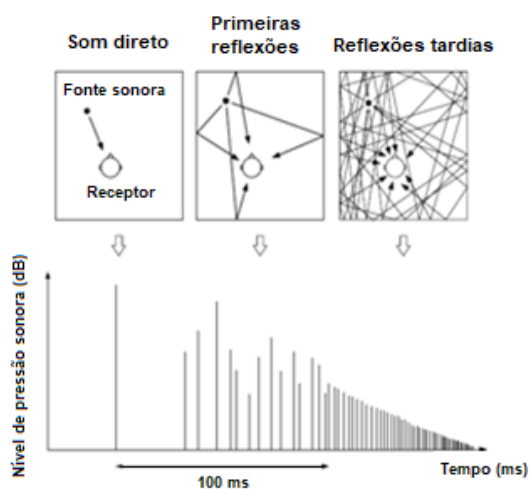


Figura 2.2 - Reflectograma associado a um receptor com indicação do som direto, as primeiras reflexões e as reflexões tardias (Isbert, 1998)

Em relação ao estudo das primeiras reflexões com a utilização da acústica geométrica, esta corresponde a uma maneira mais simplificada de entender como acontece a propagação dos raios sonoros. Como se mostra na Figura 2.3, a fonte sonora é estimulada e assim o som percorre em todas as direções, sendo refletido nas superfícies de forma especular. Caso alguma estrutura possua dimensões que sejam menores ou similares ao comprimento da onda sonora, esta passa a rodear o obstáculo como se este não existisse, sendo esse fenômeno chamado de difração.

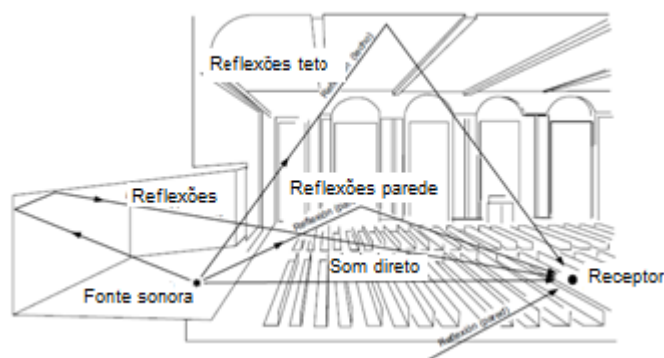


Figura 2.3 - Exemplo da chegada do som direto e nas primeiras reflexões a um receptor (Isbert, 1998)

Para o bom funcionamento do ambiente tanto para oratória como para música é importante que se tenha atenção às primeiras reflexões que chegam no público. Uma vez que as reflexões que se seguem ao som direto correspondem a um intervalo de 50 ms, o ouvinte dificilmente consegue distinguir essas reflexões separadamente. De fato, só serão perceptíveis reflexões separadamente quando ocorra um eco, que nada mais é do que uma reflexão com um nível sonoro superior ao nível geral de reverberação do ambiente, e que ocorra quando as reflexões tiverem um atraso maior que 50 ms em relação ao som direto.

## 2.3 Absorção Sonora

### 2.3.1 Conceito

A absorção sonora do meio, nada mais é do que a dissipação de energia sonora na superfície exposta de um material. Esta característica depende necessariamente da natureza das superfícies expostas do material, do ângulo de incidência das ondas sonoras e das condições em que foram aplicadas as soluções.

Ter conhecimento sobre a absorção dos materiais é necessário para se poder escolher qual é o melhor material para se otimizar em razão da necessidade de cada situação estudada. Os materiais absorventes são utilizados, com o fim de se conseguir tempos de reverberação mais

adequados para a funcionalidade do ambiente para o qual foi destinado. São utilizados na prevenção e eliminação de ecos provenientes de reflexões tardias, as quais possuem um nível acima da reverberação geral.

A definição do coeficiente de absorção sonora, denominado como  $\alpha$ , segundo a *Norma Portuguesa 3225/1:1986 "Acústica. Vocabulário. Parte: Definições Gerais"* corresponde à relação entre o valor de energia absorvida nas bandas de frequência e o valor de energia incidente no material em questão; ou seja, é a relação entre a quantidade de energia que se dissipa em relação à energia que incide ao mesmo tempo nesse elemento.

$$\alpha = \frac{\text{Energia Absorvida}}{\text{Energia incidente}} \quad (1)$$

Os coeficientes de absorção sonora variam de 0 a 1, sendo 0 uma superfície totalmente refletora e 1 possuindo absorção total. Materiais que são considerados como absorventes são aqueles que possuem um coeficiente de absorção sonora de médio a alto; estes geralmente têm valores em torno dos 0,5, enquanto que materiais com coeficientes mais baixos geralmente possuem valores menores que 0,20, indicando este valor que o material em questão absorve apenas 20% da energia que incide sobre ele. (Egan, 1988)

São encontrados valores em catálogos com coeficientes de absorção superiores a 1, mas estes não devem ser utilizados em cálculo, pois são consequência de alguma irregularidade técnica ocorrida durante a medição laboratorial dos materiais. A norma utilizada para tal ensaio é a *EN ISO 354 Medição da Absorção Sonora Em Câmara Reverberante*.

### **2.3.2 Características dos Materiais que Influenciam na Absorção Sonora**

Em todo o projeto acústico há três elementos fundamentais em sua concepção para garantir o sucesso da solução proposta, sendo eles a caracterização da fonte de ruído, a geometria do ambiente e, o mais importante deles, os materiais empregados no projeto. Por conta disso, compreender as características dos materiais que se quer utilizar é de suma importância.

A absorção sonora é a característica do material ao oferecer resistência à propagação da onda sonora em seu interior, sendo por sua vez ela influenciada por cinco fatores importantes, tais como a espessura do material, sua resistividade ao fluxo de ar, a porosidade, a tortuosidade e a rigidez.

A espessura do material possui uma relação direta com o aumento do coeficiente de absorção sonora nas baixas frequências. A relação entre a absorção sonora e a espessura do material está ligada ao comprimento de onda do som incidente (obtido pela relação entre a velocidade

do som e a frequência), sendo que, para poder absorver uma determinada frequência do som incidente, um determinado material tem que apresentar uma espessura suficiente quando comparada com o comprimento de onda. Considera-se que, em materiais porosos, uma espessura do material de  $\frac{1}{4}$  do valor do comprimento de onda será suficiente para que o som seja absorvido de forma significativa. Espessuras correntes permitem absorver sobretudo nas médias e altas frequências pois possuem um comprimento de onda menor; por exemplo, uma frequência de 1000 Hz possui um comprimento de onda igual a 0,34 m, enquanto que aos 100 Hz possui um comprimento de onda igual a 3,4 m.

Outra característica importante, também no caso dos materiais porosos/fibrosos, é a resistividade ao fluxo de ar, que pode ser compreendida como sendo a resistência que o material oferece à passagem do ar por unidade de espessura. Este parâmetro define muito do comportamento absorvedor de um material, pois valores muito elevados da resistividade significam que o material oferece uma grande resistência à passagem do ar, impedindo que o próprio som penetre no material e seja dissipado no seu interior de forma adequada, e aproximando-se de um material mais rígido. (Isbert, 1998)

A porosidade é caracterizada pela razão entre o volume dos poros expostos responsáveis pela propagação sonora e o volume da amostra. Existe uma relação entre a porosidade do material e a sua absorção sonora, podendo tal relação ser melhor compreendida na Figura 2.4.

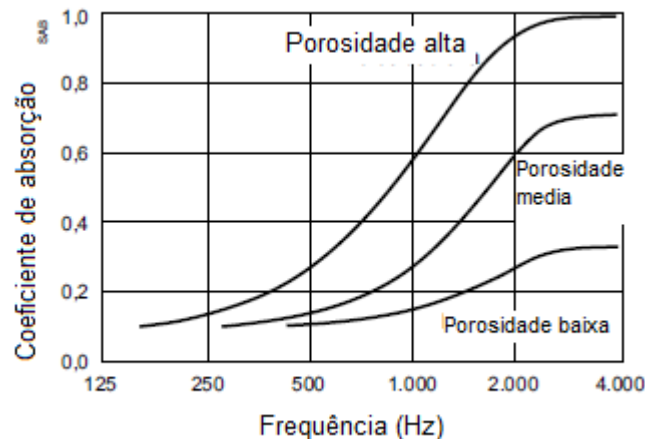


Figura 2.4 - Variação da absorção em função da frequência de um material absorvente com diferentes porosidades (Isbert, 1998)

Na Figura 2.4 é possível observar a variação do coeficiente de absorção em função da frequência do material em questão, assumindo uma absorção cada vez maior à medida que a porosidade cresce e assume valores mais elevados.

A tortuosidade e a porosidade são conceitos correlatos, sendo que a tortuosidade é a medida da sinuosidade dos poros em relação ao vetor propagação da onda interna no material. A descrição macroscópica correta do comportamento acústico e da absorção sonora de um material está intrinsecamente ligada à complexidade da forma dos poros em seu interior. Tal fenômeno da geometria interna do material pode ser melhor compreendido através da Figura 2.5.

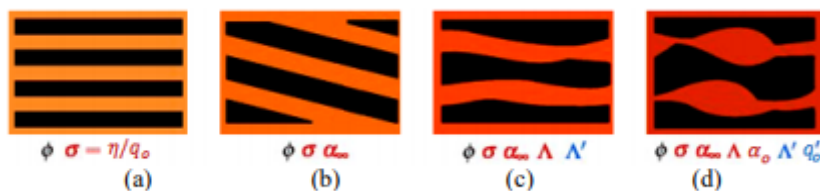


Figura 2.5 - Aumento de complexidade dos modelos de fluido equivalente: poros cilíndricos (a), poros cilíndricos inclinados (b), poros com variação de seção suave (c), e com possíveis constricções (d) (Mareze, 2013)

A relação do desvio do eixo axial entre a incidência da onda sonora no interior do material poroso e da sua não uniformidade em sua seção transversal dos poros longitudinalmente, caracteriza a tortuosidade, sendo tal fenômeno responsável pela propagação acústica no interior do material, visto que o comportamento da propagação depende da orientação dos poros em relação ao campo sonoro incidente. (Mareze, 2013)

A rigidez de um material é caracterizada pela sua resistência à deformação, portanto quanto mais rígido for um material, menos ele se irá deformar. Tal propriedade influi em sua capacidade de propagação de onda mecânica, visto que ondas nada mais são que deformações do meio em que elas se propagam. Por conseguinte, quanto maior a rigidez maior será a capacidade de propagação do som. Materiais pouco rígidos muitas vezes apresentam uma elevada dissipação interna, e tendem a dissipar a onda sonora num efeito similar a um amortecedor, enquanto que materiais rígidos, por não se deformarem facilmente, e usualmente não terem um elevado amortecimento interno, não provocam esse efeito de amortecimento da onda mecânica, facilitando sua propagação por uma maior distância de sua fonte.

### 2.3.3 Sistemas Absorventes

Em geral, considera-se que há três grandes tipos de sistemas absorventes, sendo esses os materiais porosos, as membranas ressonantes e os ressonadores de cavidade. Na Figura 2.6 é possível ver a diferença entre a absorção de cada tipo de sistema.



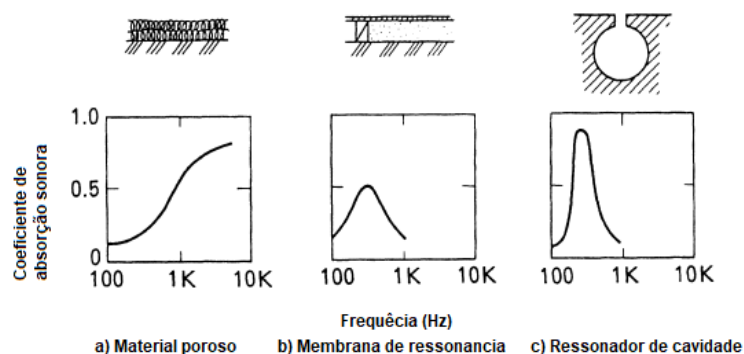


Figura 2.6 - Mecanismos de absorção sonora (Maekawa, Z., & Lord, 2011)

### 2.3.3.1 Materiais Porosos

Os materiais porosos correspondem a materiais em que a parte sólida ocupa apenas uma fração do volume da estrutura, sendo o resto formado por pequenos espaços abertos preenchidos normalmente com o ar atmosférico e umidade, os chamados “vazios”. A interação entre os materiais porosos e as pressões sonoras ocorre com a variação da pressão propagando-se nos pequenos intervalos entre espaços sólidos e vazios. Por conta da pequena dimensão em que se dá tal fenômeno, a viscosidade do ar acaba tornando-se um fator importante na degradação da energia acústica. Tal degradação ocorre na transformação desta para energia térmica, fazendo com que as ondas sonoras percam energia e se atenuem com o tempo. Outro fenômeno responsável pela atenuação é o atrito interno do material sólido. (Silva, 1978)

Durante o processo da propagação das ondas sonoras nos materiais porosos é observada uma maior absorção em frequências altas, portanto é possível aumentar a absorção nas baixas frequências com um aumento da espessura. Alguns dos materiais que são considerados como porosos são: lãs minerais, alcatifa, aglomerado de cortiça, fibras minerais ou alguns materiais plásticos. (Domingues, 2005)

### 2.3.3.2 Membranas Ressonantes

As membranas ressonantes são estruturas finas, em que a forma de absorção e dissipação do som se verifica através de um sistema vibratório interno, quando a onda sonora incide sobre o material esse atenua através da sua vibração. Este tipo de material possui uma absorção sonora maior nas baixas frequências, e para obter uma maior absorção sonora nas altas frequências é preciso colocar um material entre a membrana e a estrutura rígida, sendo ela teto ou parede. (Maekawa, Z., & Lord, 2011)

### 2.3.3.3 Ressonadores de Cavidade

As formas mais comuns de ressonadores de cavidade são os do tipo de Helmholtz, e os painéis com membrana. Essas estruturas são comumente utilizadas no tratamento de salas de baixa frequência (normalmente inferiores a 500 Hz) e em silenciadores de equipamentos como os de ventilação. Na Figura 2.7 estão representados os dois tipos de estruturas mais comuns.

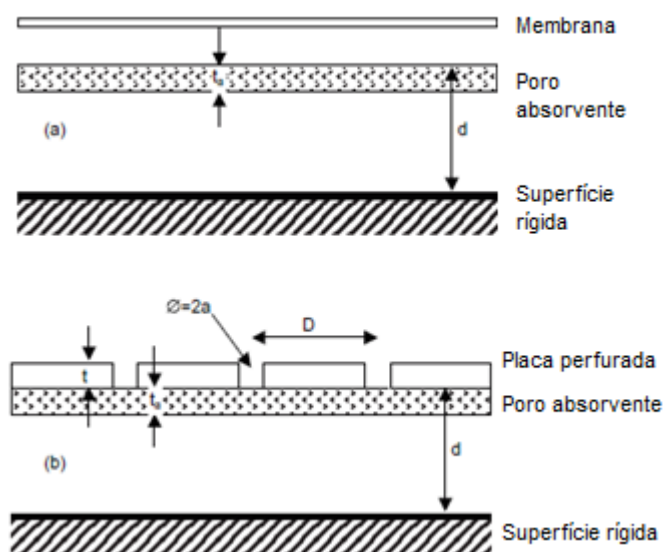


Figura 2.7 - Típica disposição para (a) membrana, e (b) Helmholtz. (Cox, Trevor J., 2009)

Os absorventes ressonantes de membrana, são caracterizados pela fixação de um painel poroso e flexível posicionado próximo a uma superfície rígida, sendo o amortecedor o próprio ar contido entre a membrana e a placa rígida. Quando o painel é excitado por uma pressão sonora ele vibra, sendo que tal vibração alcança amplitude máxima na frequência de ressonância. Quando tal onda sonora incide sobre a placa, as frequências correspondentes à ressonância do material serão absorvidas, e, por conseguinte, a maior absorção será dada nas frequências correspondentes à frequência ressonante do material. Todas as restantes frequências sofrerão uma absorção bastante inferior. A mudança da massa dessa membrana altera sua frequência de ressonância natural, sendo possível dessa maneira sintonizar a frequência desejada a ser absorvida. (Cox, Trevor J., 2009)

Como o som é uma forma de manifestação de energia, as placas têm função amortecedora, transformando essa energia da onda sonora em vibração mecânica, fazendo com que essa energia seja perdida em forma de atrito, enquanto outra parte se dissipa em forma de calor.

Quanto aos sistemas baseados em ressonadores de Helmholtz, estes geralmente baseiam-se num fenômeno físico semelhante ao observado ao soprar uma garrafa de vidro. Nessa

situação, o sistema dinâmico correspondente é similar a um sistema massa-mola, em que a massa é o ar contido no gargalo, e a mola é o ar preso dentro da própria garrafa. A oscilação do ar do gargalo, e os fenômenos de dissipação termo-viscosa que ocorrem no contacto com as paredes da garrafa, geram uma dissipação de energia sonora, e um pico de absorção na frequência de ressonância do sistema. Estes dispositivos podem encontrar-se na construção na forma de painéis perfurados, juntando ainda material absorvente no seu interior, associando os comportamentos de ressoador e de material poroso/fibroso num mesmo sistema. (Domingues, 2005)

#### **2.3.3.4 Sistemas Híbridos**

Os sistemas híbridos possuem comportamentos acústicos que se localizam entre difusores puramente absorventes e não-absorventes, portanto a característica de absorção parcial é inerente no *design* destes sistemas. Superfícies híbridas possuem também a característica de aumentar a performance acústica de tecidos tradicionalmente empregados em invólucros absorventes, podendo dessa maneira cobrir uma maior gama de frequências altas, sendo geralmente utilizados em projetos que visam o controle da refletividade acústica.

Sua empregabilidade em projetos arquitetônicos tem sido cada vez mais frequente, visto que a sua construção é de baixa complexidade e pouco custosa. Os painéis de sistemas híbridos funcionam bem na substituição de tradicionais máscaras metálicas perfuradas, que eram frequentemente utilizadas por arquitetos em soluções estéticas, porém as superfícies híbridas possuem boa aparência, favorecendo o aspecto visual no interior da edificação e adicionando propriedades acústicas ao ambiente. O painel híbrido pode ser confeccionado utilizando uma gama abrangente de materiais, desde que possuam características rígidas e não-absorventes.

Um bom exemplo destes sistemas é o *BAD - Binary Amplitude Diffisorber* que é constituído por uma superfície lisa com características tanto absorventes quanto difusivas. Em frequências médias e altas o painel provê a difusão do som, possuindo comportamentos absorsores em determinadas frequências. Na Figura 2.8 é possível ver as camadas de materiais encontradas em uma placa híbrida BAD, onde notamos que a primeira camada consiste em um tecido decorativo com funções puramente estéticas; no centro existe uma placa com furos aleatórios e dentro dos furos há um material vibrante que promove o deslocamento da curva de absorção para baixo, causando uma maior absorção em baixas frequências. Nas superfícies sólidas dessa placa há uma reflexão do som em altas e médias frequências que causa uma diminuição do coeficiente de absorção nas altas frequências; a última camada é constituída por fibra de vidro semi-rígida.

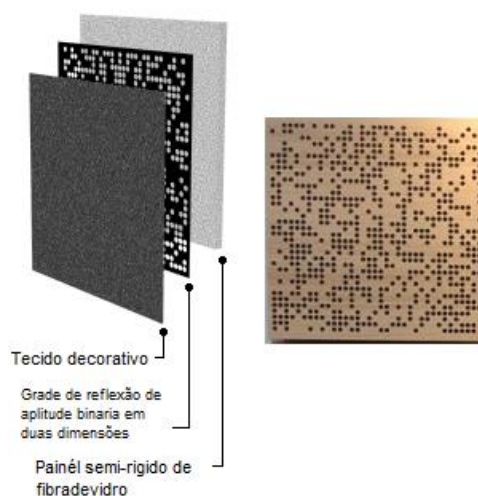


Figura 2.8 - Sistema BAD - <http://www.rpgeurope.com/products/product/bad.html>

## 2.4 Difusão Sonora

### 2.4.1 Conceito

A difusão é uma característica fundamental para a distribuição sonora dentro de um ambiente, esta é nada mais que uma distribuição aleatória de uma onda sonora em relação a uma superfície. Tal fenômeno ocorre quando comparamos as ondas sonoras em relação às profundidades das superfícies dos materiais que revestem a situação estudada. Durante a difusão não é interrompido o som, pelo contrário, este muda a direção da onda sonora incidente. Caso esta não seja feita corretamente o ambiente apresentará defeitos acústicos, como a presença de ecos. (Cox, Trevor J., 2009)

Para quantificar a performance de um difusor é observado como a energia sonora é distribuída quando dispersa, como se mostra na Figura 2.9. Essa distribuição espacial é dada por respostas polares em terços de oitava. (Isbert, 1998)

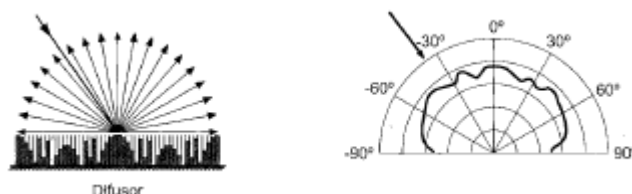


Figura 2.9 - Efeitos de difusão do som (Cox, Trevor J., 2009)

Em relação aos mecanismos de dispersão do som, segundo (Rathsam, J., & Wang, 2006) podem ser consideradas de três formas, sendo a primeira condicionada pela rugosidade da superfície do material, fazendo com que as ondas acústicas sejam espalhadas em todas as direções. A segunda forma é em relação à difração nos bordos dos materiais, e ocorre quando a onda sonora encontra uma mudança no material na superfície refletida. Por fim, a terceira forma é através do efeito de difusor numérico, sendo que o seu condicionante é a utilização de um difusor que possui cavidades de larguras iguais mas com profundidades variáveis; neste caso, as ondas sonoras propagam-se no interior das cavidades e retornam com uma fase diferente, sendo que, assim, cada abertura torna-se uma fonte sonora individual.

## **2.4.2 Difusores Acústicos Geométricos**

### **2.4.2.1 Superfícies Planas**

No caso das superfícies planas com dimensões finitas rígidas e sem rugosidade, qualquer dispersão sonora gerada será devida à dispersão nos bordos do material. A dispersão do material vai variar em relação ao comprimento da superfície plana em relação ao comprimento de onda; quando analisados um painel plano em relação às baixas frequências e o comprimento de onda é muito maior que o tamanho da superfície, não ocorrerá a dispersão da energia sonora. Já em relação às altas frequências, o comprimento de onda é pequeno quando comparado com o tamanho da superfície do painel, ocorrendo uma forte reflexão especular. (Cox, Trevor J., 2009)

### **2.4.2.2 Superfícies Triangulares e Piramidais**

Em relação às superfícies triangulares e piramidais, estas têm a capacidade de gerar reflexões especulares ou reflexões difusas, dependendo da angulação entre as placas e sua disposição; esta diferença em relação à geometria pode ser vista na Figura abaixo na parte superior, sendo na parte inferior demonstrada a dispersão de sua respectiva geometria. (Cox, Trevor J., 2009)

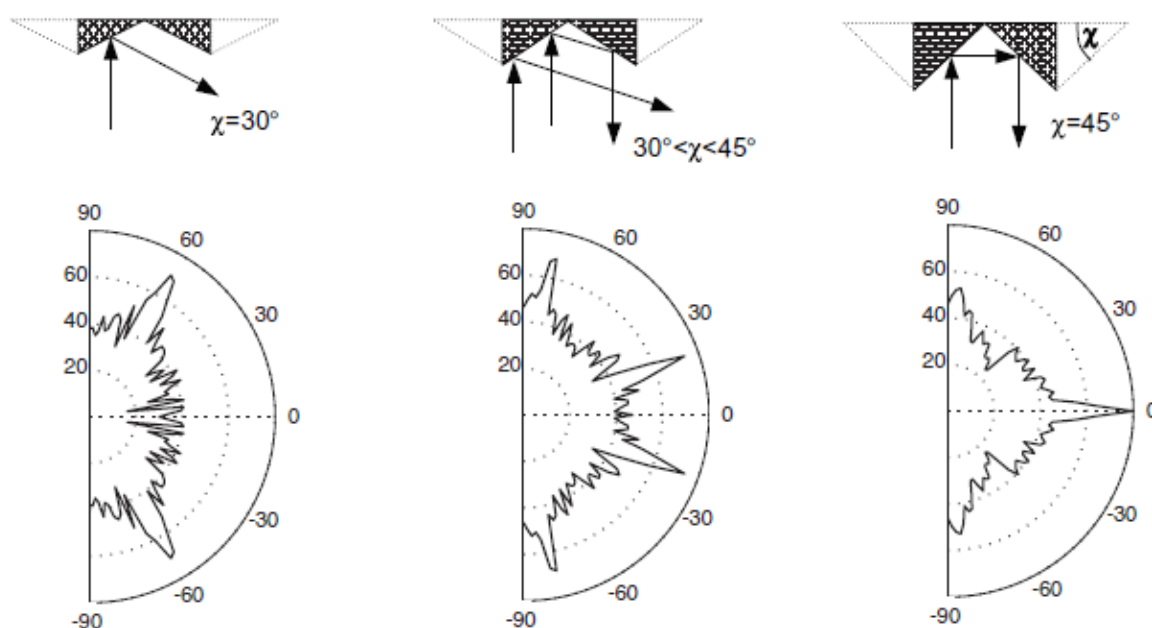


Figura 2.10 - Nível de dispersão sonora do centro de dois triângulos para três angulações,  $\chi=30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$  respectivamente. (Cox, Trevor J., 2009)

É possível verificar na Figura 2.10 que as relações geométricas dos triângulos, como a variação angular, têm influência direta na forma como a estrutura irá dispersar a energia sonora, sendo assim difusores com este tipo de configuração podem gerar dispersão, reflexões especulares e direcionamento sonoro. Essas estruturas, quando aplicadas de forma correta, podem reduzir a energia refletida em determinadas direções.

No estudo de (Yokota, T., Sakamoto, S., & Tachibana, 2002) foram consideradas estruturas triangulares, com a configuração representada na parte inferior da Figura 2.11, nas paredes de uma sala rectangular, para analisar o efeito de dispersão do som devido ao uso deste tipo de estrutura. Foram utilizados quatro tipos de soluções, sendo as três primeiras com configurações semelhantes e a quarta solução sendo um difusor bidirecional. Com isso é possível verificar que o efeito da dispersão depende do tamanho dos difusores e da disposição dos elementos.

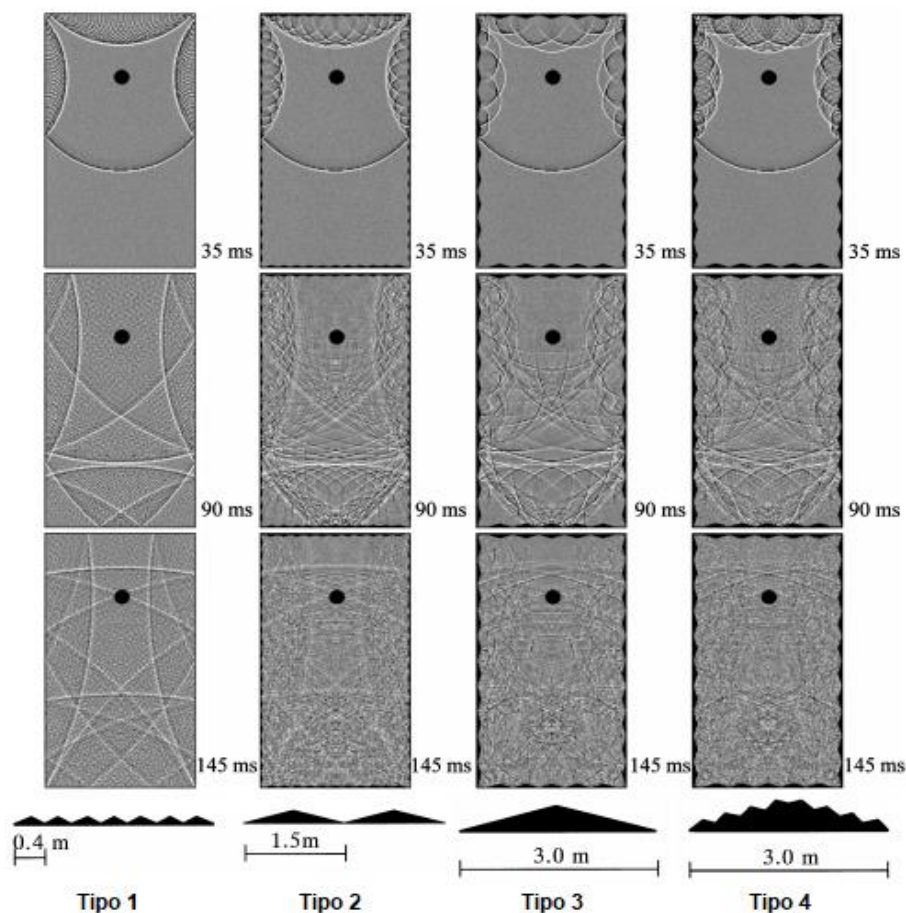


Figura 2.11 - Comparação da propagação na sala retangular com quatro tipos de tratamentos difusos (Yokota, T., Sakamoto, S., & Tachibana, 2002)

#### 2.4.2.3 Superfícies Curvas

As superfícies curvas são as mais utilizadas como difusores, podendo ser tanto côncavas como convexas, sendo estas as mais utilizadas.

As superfícies côncavas, quando utilizadas de forma incorreta, acabam gerando focalização do som em determinados locais, levando a uma distribuição desigual da energia sonora na sala. Para que este tipo de solução não cause problemas é preciso que o foco da superfície esteja longe da plateia. Caso seja inevitável a utilização de um arco côncavo, deve ser tratada a superfície com um material absorvente ou difusor, no caso da solução absorvente são usados para remoção de reflexão e no caso os difusores são utilizados para dispersar o foco. (Cox, Trevor J., 2009)

Já as superfícies convexas podem ser semicilindros e semiesferas, sendo as primeiras mais eficientes na dispersão de um som num plano, enquanto as segundas são mais eficientes na

dispersão hemisférica. Em relação à incidência normal o semicírculo dispersa bem o som enquanto que, na situação onde o semicírculo é achatado, o desempenho é pior. A forma de se obter uma boa difusão com este tipo de solução é através da utilização de um conjunto de cilindros e da forma com que estes estão arranjados.

Na Figura 2.12 é possível ver os desempenhos quando se utilizam tetos côncavos e convexos, sendo que na letra a) é possível ver claramente a focalização do som, o que torna a distribuição pobre, já no caso da letra b) é possível verificar que, quando se utiliza um teto convexo, é conseguida uma maior difusão do som no espaço acústico. (Maekawa, Z., & Lord, 2011)

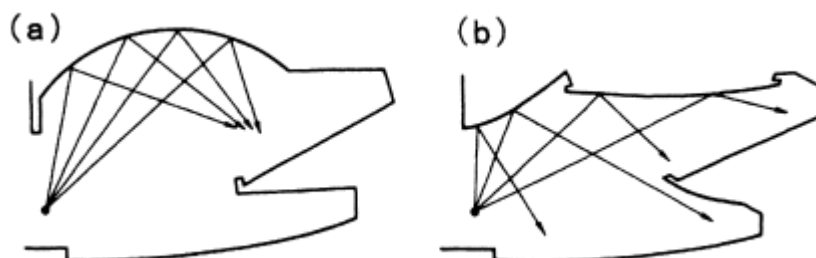


Figura 2.12 - Seção longitudinal de um auditório: (a) teto côncavo ; e (b) teto convexo (Maekawa, Z., & Lord, 2011)

## 2.5 Parâmetros de Qualidade Sonora

### 2.5.1 Tempo de Reverberação

Por definição, o Tempo de Reverberação ( $T_r$ ) equivale ao intervalo necessário para se verificar um decaimento do nível sonoro de 60 dB logo após a paragem da fonte sonora, como é demonstrado na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Decaimento do tempo de reverberação



Sabine demonstrou que o tempo de reverberação pode ser calculado a partir do volume da sala e da área equivalente de absorção. Esta área de absorção é calculada através dos coeficientes de absorção sonora de cada elemento que reveste interiormente o espaço analisado e das suas respectivas áreas, sendo para tal utilizada a equação 3:

$$T_r = 0,163 \frac{V}{A} \quad (2)$$

sendo

$$A = \sum_{i=1}^N S_i \alpha_i \quad (3)$$

onde:

Tr - tempo de reverberação, em s;

V - o volume da sala, em m<sup>3</sup>

A - Absorção de absorção sonora média, em m<sup>2</sup>

S - área do material, em m<sup>2</sup>

$\alpha$  - Coeficiente de absorção sonora do material

O campo de propagação sonora e distribuição de energia são considerados homogêneos, e, para os cálculos utilizando a fórmula de Sabine, é admitido que a redução da densidade de energia é proporcional ao valor dessa densidade. Na prática, a fórmula de Sabine oferece bons resultados quando os materiais que revestem o espaço possuem coeficientes de absorção pequenos e estão distribuídos de forma uniforme.

O parâmetro mais utilizado na avaliação acústica em espaços fechados é o Tempo de Reverberação. Este é um dos fatores determinantes para se saber qual será a utilização do ambiente, uma vez que, para o caso de oratória, são utilizados Tempo de Reverberação baixos, para se poder ter uma melhor inteligibilidade das palavras, enquanto que, para ambientes destinados à música, são utilizados valores por volta de 1,5 a 2 s, uma vez que é preciso criar ambientes mais “vivos”, com uma maior difusão. Na figura abaixo é possível ver os valores considerados ideais para cada tipo de uso do ambiente e com a variação do volume da sala. (Egan, 1988)

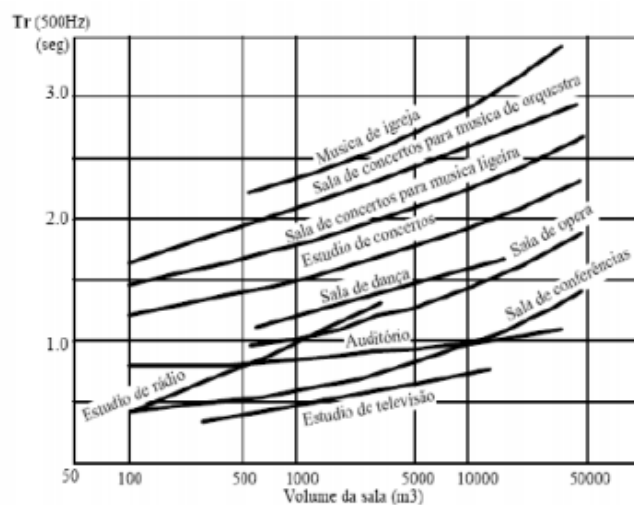


Figura 2.14 - Tempo de reverberação para diversas ambientes x volume do ambiente  $m^3$

Na figura 2.15 é possível analisar quais são os tempos de reverberação ótimos relacionados com o tipo de utilização do ambiente.

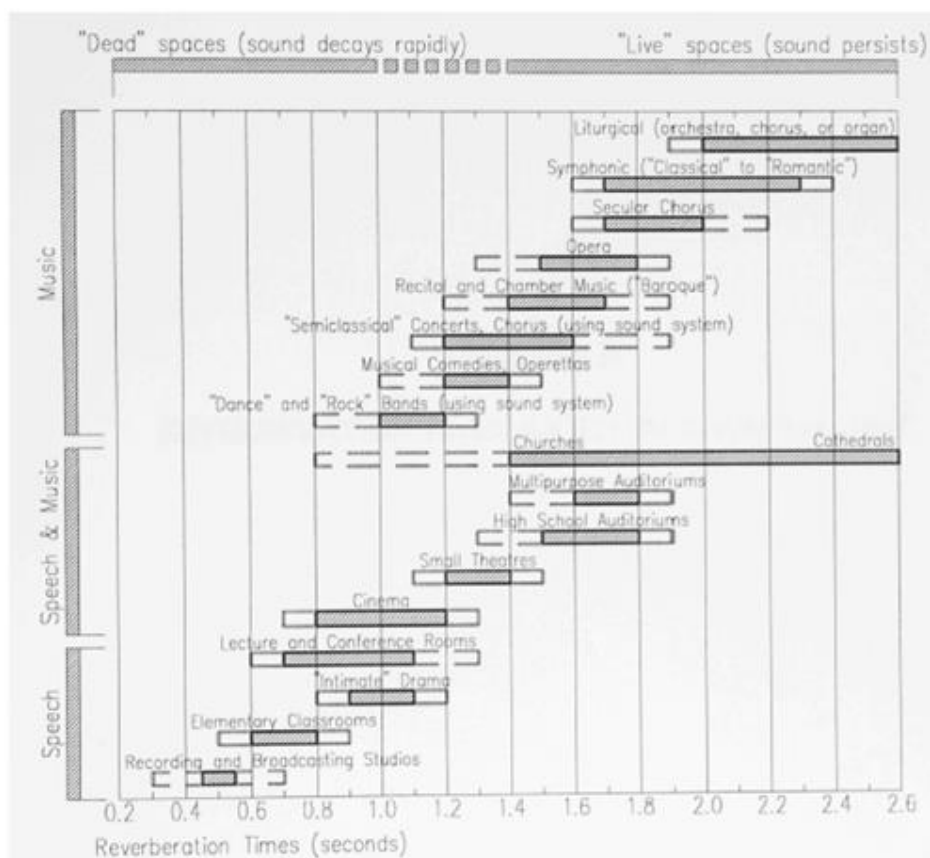


Figura 2.15 - Tempos de reberação ideais em diversos ambientes nas frequências médias (Egan, 1988)

Do ponto de vista legal, Portugal dispõe de regulamentação que limita os valores do tempo de reverberação, designadamente através do (*Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) - Decreto - Lei n.º 96, 2008*). Segundo o artigo 7º, dedicado a Edifícios escolares e similares, e de investigação, os tempos de reverberação médios nas bandas de oitava de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz devem satisfazer a equação 4:

$$T \leq 0,15 \times V^{1/3} \quad (4)$$

sendo V o volume do recinto em metros cúbicos.

### 2.5.2 Tempo de Reverberação mais Curto - EDT

O tempo de reverberação mais curto é definido como o tempo inicial de decaimento correspondente ao decaimento dos primeiros 10 dB a partir do nível sonoro máximo. Segundo (Jordan, 1969), EDT é uma medida relacionada com as alterações da geometria da sala. Em situações onde a maior parte das primeiras reflexões são direcionadas para a plateia e a menor para a região do palco, os valores de EDT tendem a ser menores que o tempo de reverberação; já no caso em que o campo sonoro é mais difuso na sala como um todo, o tempo de reverberação mais curto tende a ter valores mais próximos do tempo de reverberação.

### 2.5.3 Índice de Transmissão da Linguagem - STI

Conforme a norma internacional (*IEC 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index Equipements, 2003*), STI é o parâmetro utilizado para quantificar a deterioração da inteligibilidade da fala. Os valores são expressos entre 0 e 1 com base em contribuições ponderadas de um intervalo de bandas de frequência presentes na fala. A avaliação subjetiva desse parâmetro pode ser visto no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Avaliação Subjetiva STI

STI	Avaliação Subjetiva
0 - 0,3	Ruim
0,3 - 0,45	Pobre
0,45 - 0,6	Aceitável
0,6 - 0,75	Boa
0,75 - 1	Excelente

(*IEC 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index Equipements, 2003*)

### 2.5.4 Definição - D50

O parâmetro Definição é referente à definição da palavra, e este é descrito pela razão entre a energia total do som direto e a energia inicial que chega a um dado ponto da sala durante os primeiros 50 ms (*ISO 3382-1:2008 - Medição de parametros de acustica de salas parte 1*, 2015). Os valores são considerados de forma percentual. São considerados valores adequados para salas de conferências e para um bom entendimento da fala, quando D50 se encontra acima de 65% (Custódio, M. F., & Gerges, 2006). A Equação 5 descreve esse parâmetro.

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (5)$$

### 2.4.5 Índice de Claridade - C50

O índice de claridade C50 está correlacionado com os valores de D50 (*ISO 3382-1:2008 - Medição de parametros de acustica de salas parte 1*, 2015). Os valores de C50, para serem considerados bons para a claridade da palavra, devem ser superiores a 0.

$$C_{50} = 10 \log \left( \frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \text{ dB} \quad (6)$$

Para o autor (Marshall, 1994), as frequências de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz contribuem de maneiras distintas para a compreensão da fala humana, sendo que para cada frequência há um peso diferente, suas contribuições são de 15%, 25%, 35% e 25% respectivamente. O valor final após a aplicação dos pesos em cada frequência, é denominado de Índice de Claridade da Fala, sendo representado por C50.

$$C50 = 0,15 \times C50(500\text{Hz}) + 0,25 \times C50(1\text{kHz}) + 0,35 \times C50(2\text{kHz}) + 0,25 \times C50(4 \text{ kHz}) \quad (7)$$

em dB.

Os valores de C50 obtidos a partir da expressão acima, podem ser classificados posteriormente conforme a Figura 2.16, sendo que (Barron, 2009), afirma que valores de C50 minimamente aceitos para a inteligibilidade devem ser acima de 0 dB, como pode ser visto na escala apresentada na Figura 2.16.

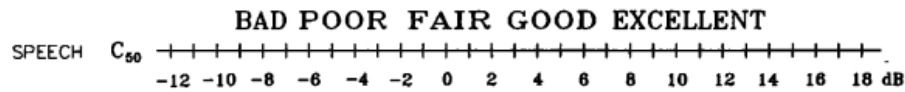


Figura 2.16 - Parâmetro de qualidade do índice de claridade (Marshall, 1994)

### 2.5.6 Níveis de Pressão Sonora - SPL

O nível de pressão sonora estabelece a relação entre o valor total de pressão sonora flutuante e a pressão sonora de referência, sendo tal valor expresso em Decibel. A equação 7 representa o cálculo deste parâmetro:

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{rms}}{p_0} \right) \quad (7)$$

O SPL dá a sensibilidade da intensidade com que o som chega ao ouvinte. Fisicamente, 0 dB corresponde à ausência de som, e 135 dB corresponde ao umbral em que o ouvinte sente dor. Em relação à percepção da variação entre os níveis sonoros, é preciso pelo menos 5dB de diferença para que esta diferença seja perceptível pelo ouvinte. (Ginn, 1978) (Isbert, 1998)

### 3 ACÚSTICA VARIÁVEL

Em algumas situações, pretende-se garantir a flexibilidade no usufruto dos espaços, com desempenho acústico adequado, para um conjunto distinto de atividades. Estas poderão requerer distintas respostas acústicas das soluções e dos espaços, de modo a adaptar o desempenho acústico para fazer face a exigências próprias de diferentes utilizações. Nestas circunstâncias, faz sentido recorrer ao conceito de acústica variável, que tem sido explorado por alguns projetistas de salas multifuncionais. Trata-se de soluções acústicas que conseguem gerar distintos comportamentos acústicos dos espaços, por exemplo através da diferença nos coeficientes de absorção sonora e de difusão sonora, dependendo do modo como se pretende utilizar um ambiente com características polivalentes.

Uma forma prática de verificar se a solução oferece múltiplas opções de utilização é através da análise do tempo de reverberação determinado para as várias possibilidades de projeto; tal procedimento visa compreender se esse ambiente obtém uma mudança considerável com as configurações propostas para as soluções arquitetônicas, não excluindo o estudo dos outros parâmetros acústicos.

Estruturas de acústica variável são geralmente utilizadas em ambientes como teatros, uma vez que esses espaços são frequentemente também usados como salas para música sinfônica. Neste caso, aquelas utilizações requerem tempos de reverberação bem distintos; por exemplo, enquanto para teatros poderia ser de cerca de 1 segundo, para música sinfônica deveria ser em torno de 2 segundos. Assim, poderá ser necessário explorar o uso de técnicas que ofereçam esse tipo de solução de acústica variável, uma vez que um tempo de reverberação baixo favorece o grau de inteligibilidade da palavra, útil para a performance teatral, enquanto um tempo de reverberação alto afeta a vivacidade do ambiente, revelando-se benéfico apenas para a música. (Isbert, 1998)

O trabalho de (Aretz, M., & Orłowski, 2009) compreendeu um estudo sobre acústica variável em salas pequenas destinadas a música, tendo sido consideradas diferentes soluções de painéis e a colocação de cortinas acústicas. Foram medidos os tempos de reverberação, considerando a sala vazia e a sala com a solução proposta, ficando claro que existe uma correlação entre a intensidade do som e o tempo de reverberação nas salas. Deste modo, através da utilização dos recursos acima referidos, foi possível ajustar o tempo de reverberação numa gama alargada de frequências.

Existem essencialmente duas formas de se obter uma variação no tempo de reverberação do ambiente. Uma possibilidade é através da análise de modificações em relação às características ou parâmetros considerados na fórmula de Sabine, designadamente o volume

do recinto (influenciado pela geometria ou arquitetura do espaço), a absorção das soluções propostas e a correspondente área de aplicação, condicionando estes últimos a área absorção equivalente das superfícies envolventes do espaço. Outra forma de conseguir alcançar mudanças consideráveis no tempo de reverberação é através da utilização de sistemas eletroacústicos.

### 3.1 Soluções Baseadas na Variação do Volume da Sala

As soluções mais simples que se baseiam na variação do volume do recinto apresentam muitas vezes limitações devido ao espaço disponível para tal aplicação, que em geral se situa em torno de 10 a 20%, seja no teto ou nas paredes. (Maekawa, Z., & Lord, 2011)

Os sistemas que assentam na variação de volume do recinto fazem uso, essencialmente, de quatro métodos: uma forma pode ser através da repartição do ambiente por uma estrutura vertical, outra alternativa pode ser a utilização de teto falso com sistema de abertura e de fechamento, uma terceira possibilidade corresponde à utilização de cavidades reverberantes acopladas à sala, e, por fim, há ainda a possibilidade de se instalar painéis móveis suspensos no teto. (Isbert, 1998)

No caso em que é possível mudar o volume do espaço, através da colocação de uma repartição móvel, deve ter-se em conta que, além de se observar uma redução do tempo de reverberação, verifica-se também uma redução de espaço útil do recinto. Há alguns inconvenientes na utilização deste tipo de intervenção, devido à eficiência do ponto de vista de isolamento sonoro da repartição, podendo restringir o uso de alguns espaços adjacentes, criados a partir da utilização da estrutura divisória. Na Figura 3.1 é possível verificar como esse tipo de estratégia altera o funcionamento acústico da sala, por exemplo no que se refere às reflexões nas superfícies envolventes. Assim, sem a estrutura divisória, a sala apresenta menor ocorrência de primeiras reflexões do que no segundo caso, devido ao encurtamento da distância entre a fonte e superfícies que possam causar reflexões mais significativas. (Isbert, 1998)

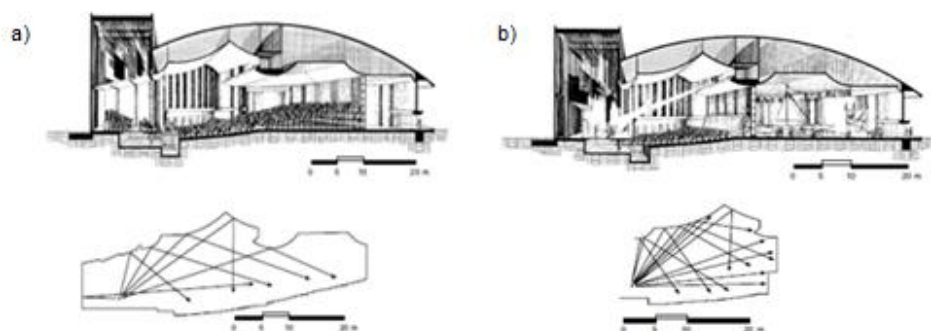


Figura 3.1 - Representação das primeiras reflexões sendo a) situação sem estrutura divisória, b) com estrutura divisória (Isbert, 1998)

O estudo de (Simões, G., Patrício, J., & Faria, 2014) pode ser aqui mencionado, envolvendo o mesmo tipo de intervenção e a realização de alguns ensaios. Sua pesquisa teve como foco principal o estudo preliminar de um protótipo modular com um rolamento integrado na sua base, que tem como função dividir espaços de escritórios, permitindo dessa maneira flexibilizar a sua utilização. Tal estrutura provou-se ser tão versátil que lhe é permitido baixar os módulos ou elevá-los. Seus resultados demonstram que esta solução possui grande valia em relação à versatilidade e ao desempenho acústico.

A solução de abertura e de fechamento do teto falso prova ser de grande utilidade, pois logo acima da sua estrutura encontram-se frequentemente ductos de ventilação e tubagens das instalações hidráulicas. Assim, a adição desse volume pode proporcionar ganhos úteis no tempo de reverberação. A experiência mostra que é necessário que a área aberta seja superior a 40% da área do teto para se ter uma melhoria significativa na resposta acústica da sala. O espaço acima do teto falso deve comportar-se como um espaço reverberante, não havendo benefícios na inclusão de material absorvente neste sistema. (Barron, 2009)

Os painéis móveis suspensos no teto têm como princípio reduzir o volume amplo da sala e, caso haja necessidade, poderá ser utilizado, por exemplo, para ocultar cadeiras localizadas no fundo do recinto. Os painéis suspensos poderão ser montados com uma inclinação adequada, conseguindo aumentar a energia relacionada às primeiras reflexões.

Um exemplo de aplicação deste tipo de solução é representado na Figura 3.2, em que no Teatro Bruce Mason, na Nova Zelândia, foram utilizados painéis articuláveis no teto, podendo a maioria ser aberta para aumentar o volume do ambiente. Quando todos os painéis estão planos, estes promovem fortes reflexões apropriadas para a oratória, enquanto que, quando apenas uma percentagem está aberta, estes proporcionarão reflexões gerais adequadas para a música. (Barron, 2009)





Figura 3.2 - Teatro Bruce Mason, Auckland, Nova Zelândia mostrando o uso de painéis articuláveis no teto (Barron, 2009)

Por último, pode referir-se a estratégia de solução acústica que recorre ao uso de câmaras reverberantes, acopladas à sala na zona perimetral e com a possibilidade de serem bloqueadas quando o seu uso não é necessário. Têm como objetivo essencial aumentar o volume total da sala principal, permitindo estes volumes reverberantes fazer a remoção de parte da energia do ambiente e retorná-la num momento posterior em um nível inferior. (Long, 2006). O público que está numa sala com este tipo de configuração, durante as pausas da performance quando o decaimento sonoro é perceptível, tem a sensação de que está em um ambiente maior do que a realidade.

### 3.2 Soluções Baseadas na Variação da Absorção da Sala

Nesta seção, serão abordados sistemas que utilizam painéis para a variação das propriedades acústicas de um ambiente. Tais sistemas consistem na utilização de painéis móveis em suas soluções, sendo geralmente empregados em ambientes de multi-propósito. Todavia, esses sistemas de acústica variável limitam-se a apenas alterar a área de absorção/difusão das superfícies laterais e/ou superiores de um ambiente. Há no entanto duas soluções oferecidas dentro do conjunto de possibilidades disponíveis que serão tratadas neste item, sendo elas o emprego de painéis móveis reflexivos e painéis giratórios.

Os painéis móveis (simultaneamente refletores e absorventes) são montados em frente a paredes de interesse selecionadas. Para que este tipo de sistema apresente um resultado relevante, pelo menos metade da área da parede deve estar revestida com módulos com grande capacidade de absorção sonora. O princípio de funcionamento desta estratégia baseia-se no deslocamento (reversível) dos painéis da sua posição original, tirando partido das características de absorção distintas das faces expostas dos painéis. Assim, quando houver necessidade de baixar o tempo de reverberação, deve expor-se a face absorvente dos painéis; ao invés, estes poderão apresentar a face refletora, quando se pretenda um valor mais elevado

do tempo de reverberação. A Figura 3.3 mostra o funcionamento deste tipo de modulação. (Isbert, 1998)

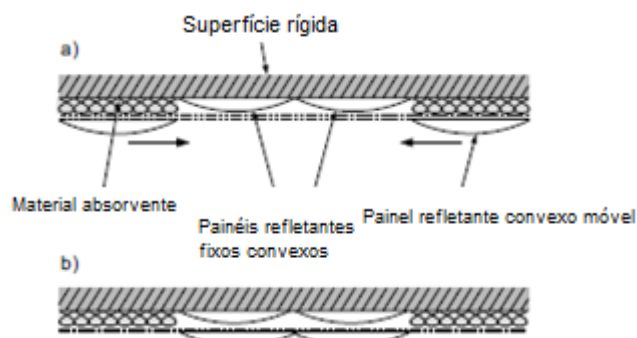


Figura 3.3 - Paineis móveis refletantes, sendo a) posição com mínima absorção, e b) com máxima absorção (Isbert, 1998)

Sistemas que utilizam painéis giratórios colocados nas paredes podem fornecer uma rotação de, por exemplo,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  ou  $360^\circ$ . No caso da rotação de  $90^\circ$ , os painéis refletores possuem uma forma convexa, para evitar possíveis ecos e facilitar uma melhor distribuição do som. Este tipo de solução é a que possui maior área de absorção, ilustrando-se na Figura 3.4, para melhor compreensão da estrutura, como são as disposições dos painéis. No caso da utilização de painéis giratórios de  $180^\circ$  apresenta duas configurações, sendo uma opção com toda estrutura absorvente, quando estiver toda aberta na parede, e, quando estiver fechada, apresenta comportamento refletor. Na Figura 3.4 na parte superior é possível ver a dinâmica da estrutura.

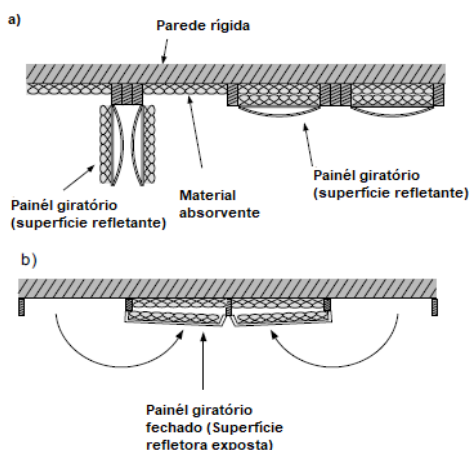


Figura 3.4 - a) sendo painéis giratórios de  $90^\circ$  e b) sendo painéis giratórios de  $180^\circ$  (Isbert, 1998)

Um exemplo de estrutura comercial que utiliza o conceito dos painéis giratórios de 180° é o Vic Totem. Este produto, comercializado pela Vicoustic, permite que os módulos sejam adaptáveis; cada totem possui três seções independentes, podendo-se mudar os tipos de revestimentos caso se pretenda uma absorção ou difusão maiores.

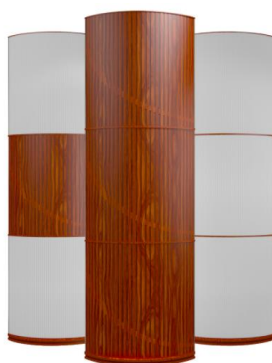
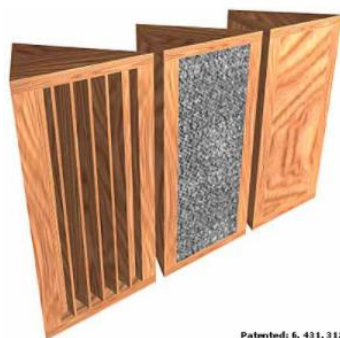


Figura 3.5 - produto Vic Totem da Vicoustic

Pode ainda referir-se uma última alternativa no caso dos painéis giratórios, nomeadamente aqueles que giram segundo o próprio eixo, ao longo de uma rotação completa 360°, permitindo exibir cada uma das três faces, com propriedades diferentes, sendo uma absorvente, outra refletora e uma difusora. Um exemplo deste tipo de produto é o Triffusor da RPG Acoustic, revelando-se altamente adaptáveis a qualquer solução de acústica variável.



Patented: 6, 431, 312

Figura 3.6 – produto Triffusor RPG Acoustic

### 3.3 Sistemas Eletroacústicos

Os sistemas eletroacústicos são utilizados quando a reverberação do espaço não atinge os valores desejados para os tempos de reverberação na situação estudada em projeto. Sem esse tipo de solução complementar, seria quase impossível que em grandes espaços e espaços abertos o público pudesse ter uma boa experiência acústica, uma vez que, nesses casos

específicos, a voz humana e os instrumentos musicais não alcançariam em toda a sala a intensidade suficiente para que fosse corretamente percebida pelo ouvido humano. De modo a conseguir corrigir a reverberação do espaço, são utilizados sistemas complementares compostos por microfones, amplificadores e alto-falantes; os microfones recebem os sinais sonoros e os alto-falantes irradiam o som amplificado.

Este tipo de solução, quando utilizado de forma correta, proporciona boa inteligibilidade da fala, fazendo com que o som seja direcionado ao público. No caso da utilização em espaços multiuso, é possível tornar a reverberação natural da sala suficientemente curta para ser considerada ótima no caso da oratória. Quanto à utilização do espaço para música, é igualmente possível reforçar a reverberação por meios eletroacústicos, conseguindo assim a solução adequada. (Kuttruff, 2009)

De maneira geral, podemos citar alguns exemplos comuns de utilização de eletroacústica, que são encontrados em igrejas ou teatros. Pela natureza da atividade que ali ocorre, há uma grande necessidade de que o espectador receba o som diretamente da fonte (seja ela o ator ou o líder religioso) para que posteriormente o som amplificado chegue aos ouvidos do espectador. Para alcançar esse objetivo, alguns sistemas adicionam propositadamente um “*delay*” entre o som original e o som amplificado, facilitando assim a localização do palestrante ou ator antes que o som mais potencializado alcance seus ouvidos. Ainda em relação aos teatros, existe uma outra preocupação; caso o som amplificado tenha origem fixa o movimento do ator no palco perde o impacto na atuação. Desta forma, alguns sistemas utilizam a estratégia de variação da sua intensidade e direção em função da localização espacial do ator, permitindo dessa maneira a experiência o mais próxima do natural possível. A este propósito, há dois exemplos de sistemas desenvolvidos, que é interessante mencionar. (Barron, 2009)

O sistema denominado de AR (*Assisted Resonance*), Ressonância Assistida em Português, foi implementado no Royal Festival Hall pelos engenheiros (Parkin, P. H., & Morgan, 1965), que, em 1964, publicaram os resultados de seus estudos com o sistema por eles desenvolvido. Tal solução visou resolver as questões relacionadas com o tempo de reverberação das baixas frequências do Royal Festival Hall. Na Figura 3.7 é possível visualizar, de forma gráfica e por bandas de frequência de uma oitava, a diferença que o sistema proporciona no tempo de reverberação.

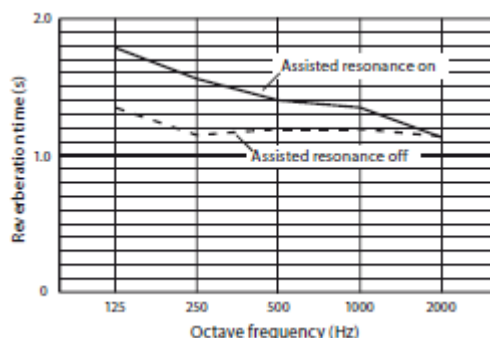


Figura 3.7 - Tempos de Reverberação medidos no Salão Principal, Universidade de York. A linha sólida representa o sistema ressonância assistida; A linha tracejada, representa o Tempo de Reverberação natural (Parkin, P. H., & Morgan, 1965)

No artigo publicado por aqueles autores é mencionado o trabalho experimental por eles realizado no Royal Festival Hall, onde 89 canais foram instalados, cobrindo as bandas de frequência entre 70 Hz até 340 Hz. No experimento a reverberação foi aumentada dentro da gama mencionada, sendo que o maior aumento se deu em 125 Hz onde houve um acréscimo no tempo de reverberação de 1,4 até 2,0 s em 80% do anfiteatro. Os autores mencionam que o experimento foi sendo implementado de maneira gradual, sem conhecimento do público ou dos atores, e que os mesmos não puderam dizer objetivamente a origem do som amplificado, provando dessa maneira que o sistema proporciona um som amplificado uniformemente distribuído.

Outro sistema interessante para ser mencionado é o MCR (*Multiple Channel Reverberation*), Reverberação de Múltiplos Canais, em português. Tal sistema consiste no posicionamento dos microfones diretamente na superfície das paredes e/ou do teto, proporcionando dessa maneira a captação de um conjunto maior de frequências, sendo que tal ferramenta é aplicada quando a situação apresenta uma maior concentração das altas frequências. (Koning, De, 1983)

A arquitetura do sistema tem como objetivo produzir um aumento no nível sonoro, assim como um incremento do tempo de reverberação. Por exemplo, para alcançar um incremento de nível de pressão sonora em 3 dB, revela-se necessária a utilização de 100 canais.

### 3.4 Estruturas Ajustáveis de Acústica Variável

As estruturas ajustáveis de acústica variável surgem em um momento de grande necessidade de adequação dos ambientes aos seus diversos propósitos. Além de trazer um melhor conforto acústico para seus ocupantes, as estruturas ajustáveis podem ajudar edificações a conquistarem selos de conforto de ambiente junto a órgãos reguladores. Entretanto, tem sido crescente o aumento do interesse dos arquitetos para algumas estruturas que possuam, para além das propriedades acústicas requeridas, uma boa aparência condizente com a solução

proposta. Visando isso, o número de pesquisas e desenvolvimento de soluções acústicas baseadas em formas comumente encontradas na tradição japonesa dos origamis, cresceu consideravelmente.

A palavra Origami tem origem japonesa e provém de duas palavras, *Oru* que significa dobrar e *Kami* que significa papel. Esta arte consiste em formas geométricas em duas ou três dimensões, como, por exemplo, os origamis simples, que são formados a partir da dobragem de um único papel, ou os origamis compostos que são obtidos a partir da união de vários origamis simples, e, por fim, os origamis modulares, que consistem em um origami composto onde todas as peças são geometricamente iguais.

Os origamis passaram a despertar interesse no meio tecnológico e artístico, tanto no ramo da arquitetura quanto na engenharia, devido à facilidade em alterar a funcionalidade da estrutura para cada necessidade. Os exemplos incluem estruturas espaciais, robôs auto-dobráveis, dispositivos biomédicos, esculturas dinâmicas e diversos outros. (Badagavi, Pratik, 2017) Todavia a aplicação da estrutura de origami no ramo de acústica variável é ainda incipiente, porém ainda que se tenha pouco conteúdo produzido nessa área, a integração da acústica variável nos *smart buildings* é inevitável, visto que há estudos na área de *Internet of Things* desenvolvidos por engenheiros de grandes empresas de tecnologia datando já do início dos anos 2000, onde sistemas rudimentares de para rastreamento dos usuários dentro da edificação em tempo real já existiam. (Paramvir, 2000). Hoje em dia com um maior uso de *Smartphones* a coleta de dados dos usuários será ainda mais fácil, portanto sistemas que visam a adaptação do ambiente às necessidades de seus ocupantes, é uma tendência já perceptível.

### 3.4.1 Estudos Relacionados a Estruturas de Origami

Grande parte dos estudos disponíveis na área de estrutura de origami, provém principalmente de duas fontes distintas, nomeadamente os departamentos de arte e arquitetura ou, em alternativa, os departamentos de física e engenharia mecânica. Entretanto, consoante a origem, o enfoque é geralmente distinto, explorando primeiros as percepções humanas no que concerne ao aspeto visual e auditivo, enquanto os segundos se têm preocupado com as suas aplicabilidades em diversos ramos, desde bioengenharia até robótica. Deve referir-se que apenas uma pequena parcela desses estudos se foca na relação entre a estrutura e as suas propriedades acústicas. Portanto, nesta seção, serão explorados três estudos relevantes dentro do campo das estruturas de origami aplicadas no âmbito da acústica.

Assim, inicialmente, refira-se os trabalhos (Thün, Geoffrey, 2012) (Thün, G., Velikov, K., Sauvé, L., & McGee, 2012). Tais trabalhos têm como ideia principal ser uma estrutura que envolva o conceito do origami e a acústica variável. Este estudo explora as potencialidades de

uma estrutura dinâmica, que tem a capacidade de tornar o ambiente onde se encontra instalada em um espaço multiuso.

O protótipo possui estrutura geométrica flexível formada por triângulos, permitindo um certo grau de liberdade. Este sistema é constituído por painéis eletroacústicos que oferecem amplificação do som, refletores, e absorventes, em polipropileno expandido poroso, possuindo ainda um sistema eletrônico de microcontroladores que são utilizados para realizar os movimentos da estrutura. O sistema funciona com um *loop* pré-programado, fazendo com que a estrutura opere em três tipos de configuração, que se representam na Figura 3.9. Este estudo está ainda em desenvolvimento, designadamente sobre a automatização da estrutura com a utilização de sensores, de modo a melhorar a capacidade da interação entre desempenho acústico e relação com o público em tempo real.



Figura 3.9 - Protótipo do ResonantChamber (Thün, Geoffrey, 2012)

Num segundo estudo, de (Yang, 2017), foi estudada uma estrutura de origami, que consegue alterar o tempo de reverberação de uma sala de reunião através da mudança de volume e da possibilidade de aumentar a absorção total. Para se conseguirem tais alterações é mudada a área exposta da estrutura através da contração do protótipo. Na Figura 3.10 podem observar-se duas possíveis configurações da estrutura.

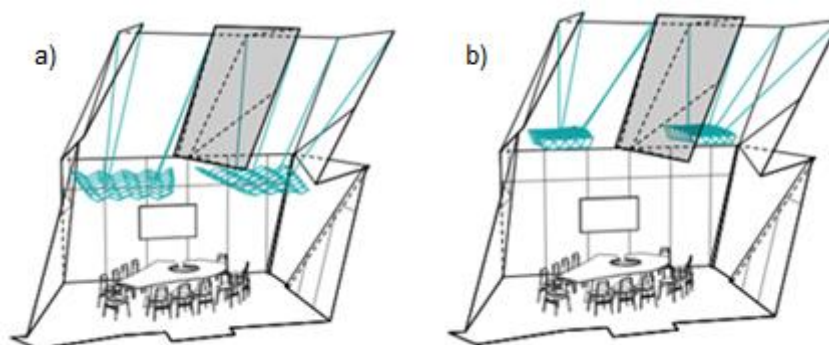


Figura 3.10 - Ajustamentos possíveis da estrutura, sendo a) deixados de forma mais expansiva, b) ocorre retração da configuração (Yang, 2017)

Este sistema é composto por placas absorventes, em madeira e espuma, integrando ainda um sistema de controle da estrutura utilizando uma plataforma Arduino. Neste caso, o padrão de origami utilizado designa-se por *Miura-ori*, recorrendo a placas quadrilaterais que, quando dobradas, convergem em direção ao centro de ambos os eixos x e y.



Figura 3.11 - Protótipo utilizando origami Miura –Ori (Yang, 2017)

Outro estudo referente a estruturas de origami voltadas para acústica é o (Olatte, C. I., & Hermosilla, 2017). Tal como os outros citados acima tem como objetivo adaptar o ambiente para cada tipo de solução, através da alteração da reverberação e da difusão, por meio de uma estrutura flexível e adaptável. Foram realizados ensaios com as configurações possíveis e foi verificado que esta tem de facto capacidade de fazer uma alteração no tempo de reverberação.

O tipo de estrutura, neste caso, foi o sistema articulado de Ron Resch. Este conceito se baseia em um sistema poliédrico articulado, composto por 16 paralelepípedos oblíquos, podendo variar as condições geométricas com o deslocamento e rotação dos volumes. Este tipo de geometria está representada na Figura 3.12, tendo sido utilizados três tipos de configurações.



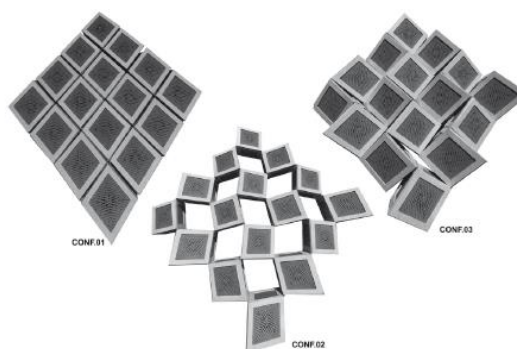


Figura 3.12 - Estrutura utilizada com configuração Ron Resch (Olatte, C. I., & Hermosilla, 2017)

Os materiais utilizados compreendem uma estrutura de MDF como base, e faces compostas de papelão com uma parte lisa e outra perfurada; além disso, as faces perfuradas são de duas configurações para absorver uma gama mais alargada de frequências. No interior da estrutura, foi utilizada fibra de poliéster. Na Figura 3.13 é possível visualizar a disposição desses elementos.

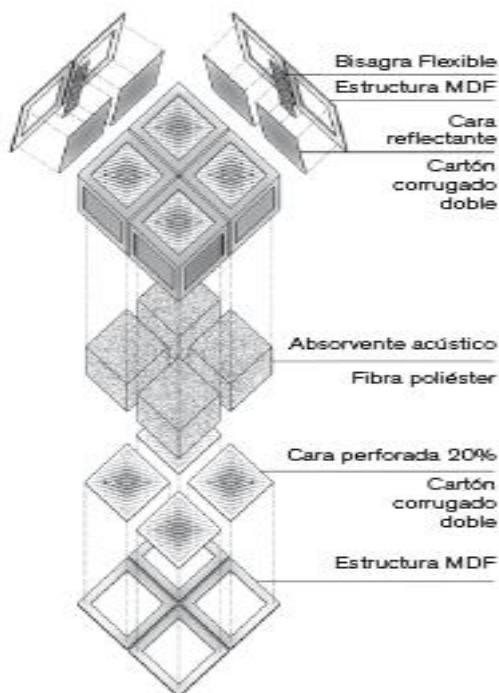


Figura 3.13 - Materiais utilizados na estrutura Ron Resch (Olatte, C. I., & Hermosilla, 2017)

### 3.4.2 Conceito da Geometria Estudada

Durante os últimos séculos as edificações sofreram inúmeras transformações estéticas e funcionais, o desenvolvimento tecnológico deu-se de maneira acelerada na qualidade dos materiais e processos construtivos, todavia em sua essência as edificações continuavam com sua característica primária de ser uma estrutura passiva, cuja principal função era prover

abrigo ao ser humano. Entretanto com a revolução tecnológica ocorrida no final do século XX e início do século XXI várias tecnologias foram introduzidas no cotidiano das pessoas, tais avanços mudaram a forma com que as pessoas interagem entre si e com seu entorno e apenas nas últimas décadas essa tendência atingiu o setor da construção civil nos principais centros de inovação do planeta Terra. Os primeiros *Smart Buildings* (edificações inteligentes em Português) coletavam dados para melhor gerenciamento energético e controle de ventilação natural, além do uso de água, porém conforme o conceito se desenvolvia a preocupação em controlar sistemas de arrefecimento e aquecimento para conforto interno para seus ocupantes tornava-se um tópico cada vez mais importante para empresas e edifícios públicos que percebiam que a melhoria do ambiente construído traduziria-se em colaboradores mais concentrados, motivados e menos propensos a síndrome conhecida como *Sick Building*. Entretanto o conforto interno não se resume a apenas qualidade térmica da edificação, há outros fatores importantes, tais como controle de qualidade interna do ar, acesso a luz natural e controle de ruído, portanto é muito importante promover a qualidade ambiental necessária aos ocupantes em função de seu número, posição e fatores climáticos.

Por conta do aumento do número de IPs (Protocolos de Internet) disponíveis graças à implementação do IPv6, soluções baseadas em IoT (Internet das Coisas) serão mais comuns e com isso será possível uma maior disponibilidade de dados que serão assimilados pelos *Smart Buildings*, isso abrirá caminho para uma edificação que responderá às necessidades de seus ocupantes em tempo real. Portanto é natural a tendência de edificações em um futuro próximo que se adaptarão às necessidades de seus ocupantes de qualidade ambiental, controlando dessa forma a temperatura, ventilação, ruído e luz natural de maneira otimizada. Pensando nisso a escolha da geometria teve como intenção utilizar uma estrutura que possa agregar ao ambiente diferentes configurações acústicas, além de harmonizar-se esteticamente a ambientes com multi-função, além de possibilitar posterior automação, fazendo com que a estrutura de acústica variável possa ser controlada por um computador central.

Durante o processo da seleção da geometria a estudar foram analisadas geometrias que já existem na literatura. O interesse era encontrar uma configuração que se assemelhasse à estrutura descrita em (Thün, Geoffrey, 2012). O objetivo era buscar uma estrutura capaz de proporcionar pelo menos três configurações diferentes, utilizando conjuntos de painéis refletores e absorventes. A estrutura encontrada, que forneceu tais características, baseou-se no conceito da estrutura designada por *Water Bomb*, encontrando-se na Figura 3.14 as fotografias da geometria primeiramente idealizada. Trata-se de modelos em escala reduzida, desenhados a partir daquela geometria e construídos com recurso a diferentes materiais, tendo permitido avaliar em modelo totalmente funcional os principais requisitos e dificuldades de montagem deste tipo de estruturas com geometria ajustável. Este modelo baseia-se essencialmente na combinação de peças com geometria triangular e quadrada, numa montagem em que as peças individuais se articulam, permitindo configurações geométricas variáveis que poderão revestir-se de interesse em superfícies tridimensionais com absorção e difusão sonoras variáveis.

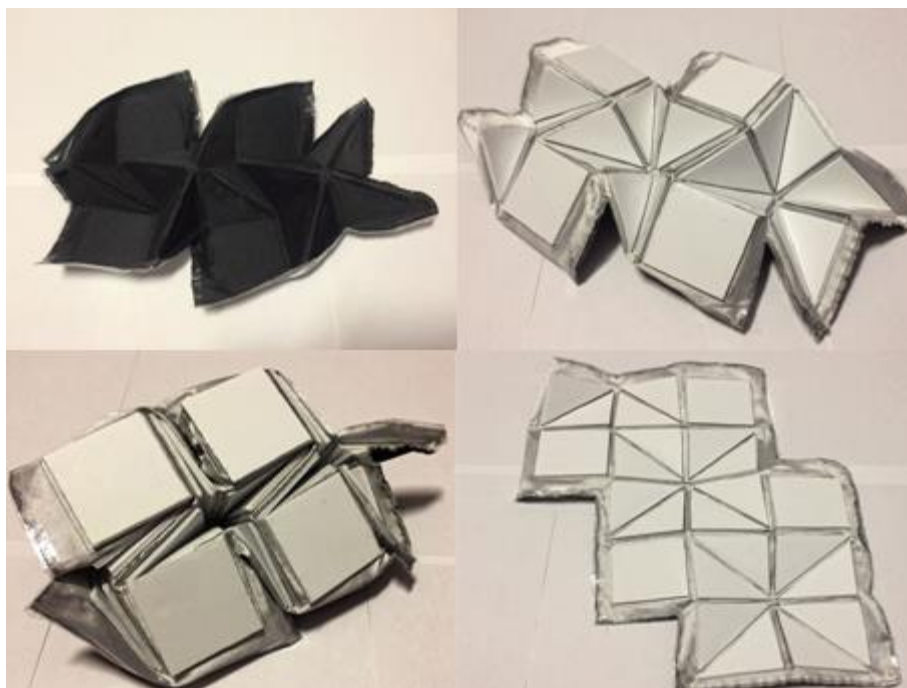
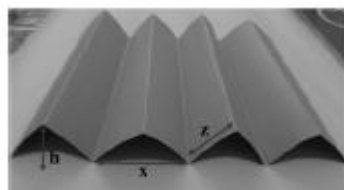


Figura 3.14 - Geometria idealizada pela autora utilizando a forma WaterBomb

Com o intuito de simplificar um futuro ensaio preliminar e levando em conta o tempo disponível de um mestrado, a estrutura acima não ainda foi considerada nesta fase, tendo sido utilizada, ao invés desta, uma estrutura geometricamente mais simples de ser estudada, concebida e montada. De facto, nesta primeira parte do trabalho, procurou-se compreender o funcionamento e as condicionantes desse tipo de solução utilizando o conceito de origami.

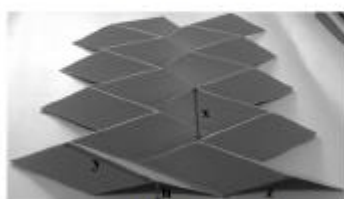
Deste modo, a simplificação daquelas configurações tridimensionais, tendo em vista a preparação e o ensaio de um protótipo laboratorial, baseou-se em dois estudos, (Hussein M., 2015)(Muarat e et al, 2014). Ambos os estudos referidos utilizaram uma geometria simples, porém constituída por um único material, sendo apresentadas na Figura 3.15.



Configuração 1



Configuração 2



Configuração 3

Figura 3.15 - Estruturas estudadas por (Hussein M., 2015)

Já no âmbito do desenvolvimento deste trabalho, foi igualmente utilizada uma geometria simples, combinando duas tipologias de painéis, pois o foco era estudar o impacto que a geometria tem no tempo de reverberação e absorção sonora, e verificar como seria a resposta desse tipo de estrutura em uma sala. Na Figura 3.16 é possível ver uma fotografia da geometria base considerada neste trabalho, já montada para ensaio na câmara reverberante. Foram nesta fase consideradas estruturas que formam triângulos, alternando conjuntos de painéis com diferentes superfícies expostas. Do ponto de vista da difusão do som em relação a este tipo de estrutura, alguns conceitos foram já analisados na secção 2.4.2.2.

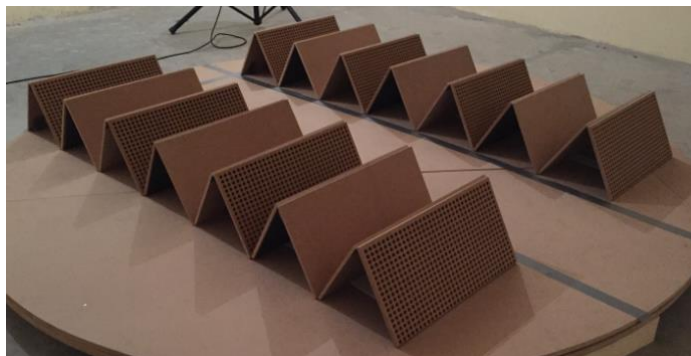


Figura 3.16 - Estutura estudada pela autora

Como foi referido, ao contrário dos dois artigos citados acima, nesta configuração adotada procedeu-se à combinação de dois tipos de materiais, tendo sido utilizados painéis refletoras em MDF liso e painéis acústicos absorventes perfurados em MDF (trata-se de uma solução de painel acústico comercial, disponível no mercado com a designação CF6 Plus - Pleno 40, da empresa Castelhana & Ferreira). A distribuição dos materiais do protótipo seguiu duas ideias, nomeadamente a possibilidade de se conseguir atingir pelo menos três configurações distintas (duas das quais correspondendo às configurações extremas, em que se considera i) somente área absorvente e apenas os painéis perfurados se encontram visíveis, e outra ii) com área totalmente refletora e apenas deixando expostos os painéis lisos refletoras, e ainda uma ou mais configurações intermédias, em que ambas as tipologias de painéis intercalados ficam visíveis). O segundo conceito envolvido diz respeito ao efeito de área de absorção; segundo (Egan, 1988) quando os painéis absorventes e refletoras são usados em conjunto existe uma maior absorção sonora do que quando estão dispostos em um padrão xadrez, onde teriam em uma cobertura uniforme. O motivo para tal se deve à difração da energia sonora em torno dos perímetros dos painéis de absorção sonora e a absorção adicional proporcionada pelas bordas expostas dos painéis.

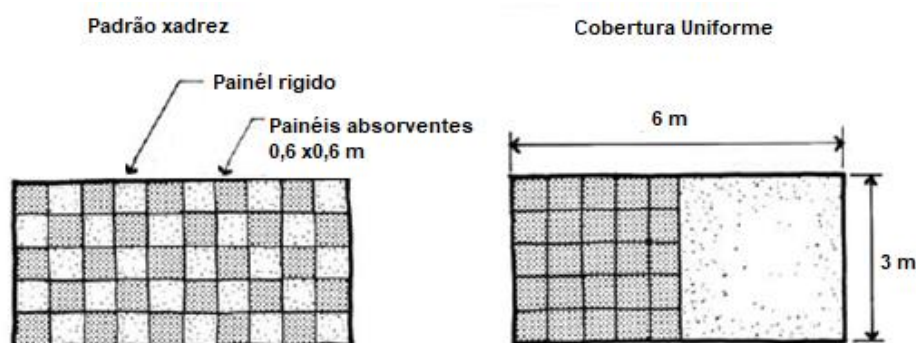


Figura 3.17 - Padrões de absorção sonora de painéis quanto a distribuição das áreas (Egan, 1988)

## 4 SIMULAÇÃO ACÚSTICA

### 4.1 CATT-Acoustic®

Foi realizado um conjunto de simulações computacionais, usando a versão do CATT-Acoustic® v9.1b (build 1.03) - demo version, que possui algumas restrições para a realização das simulações. Estas restrições são o número máximo de 5000 raios para a predição “SxR” e “Map measures”, e a difração ser limitada a primeira ordem. O software utilizado para a modelagem consiste em dois ramos principais o CATT-A e o TUCT, sendo o primeiro aplicado principalmente para a modelagem e a previsão geométrica, enquanto o segundo executa a previsão da acústica do ambiente e a auralização. O CATT-A fornece também estimativas do tempo de reverberação utilizando Sabine e Eyring. A utilização do software deu-se principalmente pela sua confiabilidade, com mais de 30 anos de desenvolvimento. Outro ponto forte é a utilização do método *Ray Tracing*, visto que tal método é importante para a compreensão dos fenômenos acústicos.

### 4.2 Acústica Geométrica - Método Estocástico

Dentro do campo de modelagem da propagação do som há três métodos utilizados, sendo eles os Algoritmos Baseados na Onda, a Geometria Acústica e Métodos Artificiais. Dentro da Acústica Geométrica há duas subdivisões, sendo elas o Método Estocástico e os Métodos Determinísticos. No caso do Software CATT-Acoustic® o método utilizado é o Método Estocástico denominado *Ray Tracing*. Neste método, os raios descrevem uma linha reta até que um obstáculo force o raio a seguir uma outra trajetória. Na concepção do método a linha descrita pelo raio transporta a energia acústica entre dois pontos. (Vorländer, 2007)

O método *Ray Tracing* representa a fonte de ondas sonoras como um ponto contido no centro da esfera de propagação, porém ao contrário dos métodos determinísticos que descrevem todos os raios omnidirecionalmente, onde as linhas são distribuídas uniformemente ao redor do ponto, o método *RayTracing* distribui de maneira randômica. Tais valores randômicos variam de  $-\frac{\pi}{2}$  até  $\frac{\pi}{2}$  no caso do ângulo de elevação e de 0 até  $2\pi$  para o ângulo do azimute. Na Figura 4.1 é possível visualizar a diferença de disposição dos raios entre o método determinístico e o método estatístico. (Kulowski, 1985)

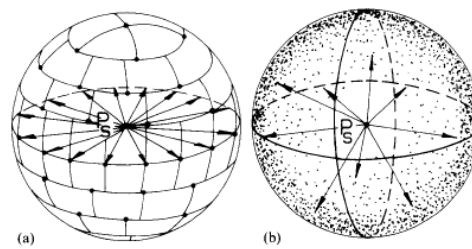


Figura 4.1 - sendo a) método determinístico , b) método estatístico (Vorländer, 2007)

No método *Ray Tracing* a energia dissipada pode ser representada de duas maneiras. A primeira, em cada reflexão multiplica a energia incidente por  $(1-\alpha)$ , sendo que esse fator é responsável por reduzir o valor da energia incidente em função do coeficiente de absorção dos obstáculos  $\alpha$ . A segunda maneira, por aniquilação aleatória de partículas. As duas opções produzem resultado similares, diferindo apenas com relação ao tempo de computação e acurácia.

No caso do método de absorção com a multiplicação pelo fator  $(1-\alpha)$ , a energia no início é representada por  $e_0$  e é acompanhada até o tempo máximo denominado por  $t_{max}$  ou até o valor inicial da energia alcançar o valor mínimo representado por  $e_{min}$ . Na Figura 4.2 é possível visualizar o fluxograma que representa o algoritmo acima descrito.

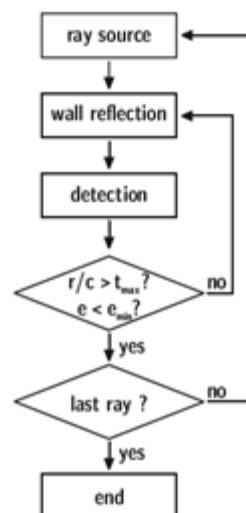


Figura 4.2 - Diagrama do *Ray tracing* (Vorländer, 2007)

Para o método de eliminação por absorção, um número randômico  $z$  contido no intervalo de 0 até 1 é comparado com o coeficiente de absorção do material, representado por  $\alpha$ , e caso  $z$

seja menor que  $\alpha$  a partícula então é eliminada e o próximo raio é acompanhado. (Vorländer, 2007)

### 4.3 Modelação dos Casos de Estudo

O ponto principal desta modelação no software é realizar uma primeira análise de como a estrutura estudada se comportaria em duas situações diferentes, sendo um caso uma sala de aula e o outro uma sala de reunião. As configurações dos ambientes foram consideradas de uma forma genérica, uma vez que o foco principal não é o ambiente em si, mas a análise dos benefícios que a estrutura pode oferecer em relação aos parâmetros de qualidade sonora.

No caso da geometria da sala, foi considerada a mesma nas duas situações. Suas dimensões são 6x12x3,5m. O ponto em que realmente ocorre uma mudança em relação à configuração do ambiente em si é o mobiliário. No caso da sala de aula são consideradas cadeiras de anfiteatro com assentos rebatíveis que possuem palmatórias em MDF, totalizando 64 unidades; já no caso da sala de reunião foram consideradas 22 cadeiras estofadas e uma mesa de madeira com dimensões de 1,5x 7m. Na Figura 4.3 estão representadas a disposição dos itens apresentados.

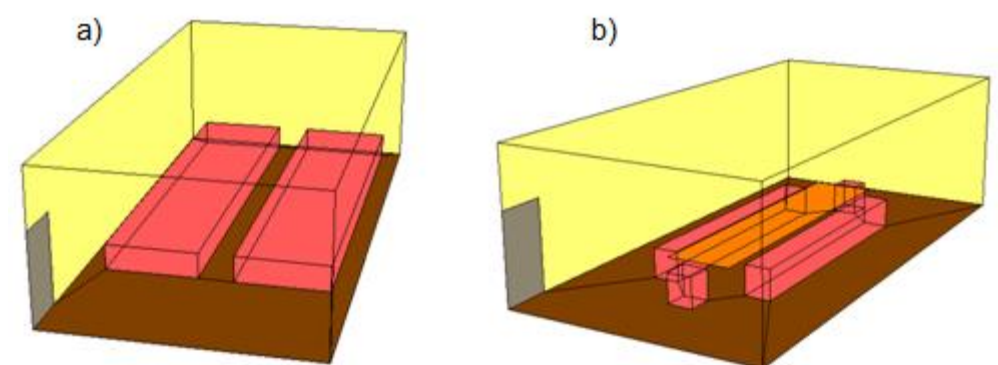


Figura 4.3 – Salas consideradas na simulação, sendo a) sala de aula e b) sala de reunião

As estruturas relevantes ao estudo são três módulos que foram colocados nos tetos das salas representadas na Figura 4.3. Essas estruturas são conjuntos de painéis absorptivos e de painéis refletantes flexíveis, que variam o ângulo interno entre as placas, alterando dessa maneira suas propriedades acústicas. No cenário de sala de aula foram consideradas cinco tipos de configurações, enquanto que na sala de reunião foram consideradas três tipos de configurações. Todas essas configurações, independentemente da modelação, correspondem a uma mesma área de superfície das placas. Essas configurações foram escolhidas para ter-se uma maior sensibilidade da forma com que a estrutura pudesse se comportar.



### *Situações propostas para as salas de aula:*

Na Figura 4.4 encontra-se a primeira forma de configuração adotada; neste caso, serão analisados as situações extremas da solução a respeito da utilização dos painéis de forma plana, sendo a Figura 4.4 a) mostrada quando são considerados apenas os painéis absorventes expostos, enquanto na Figura 4.4 b) é mostrado o caso extremo oposto, onde os painéis teriam propriedade apenas de reflexão do som.

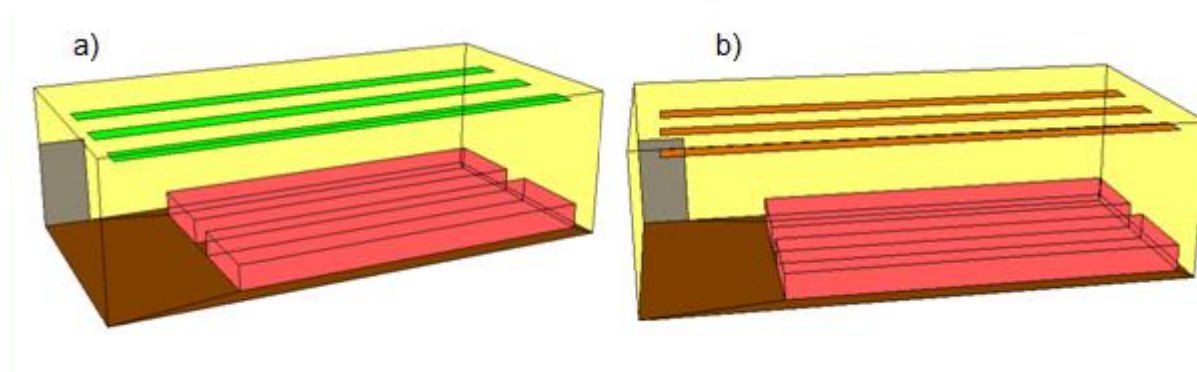


Figura 4.4 - a) e b) painéis na configuração plana, sendo a) correspondente aos painéis CF6 PLUS- Pleno 40, enquanto que b) corresponde aos painéis em MDF

As soluções adotadas como algo intermediário entre os painéis planos, são representadas na Figura 4.5. Nestes casos, os painéis estão dispostos em forma triangular, ao longo do mesmo espaço disponível que os painéis planos. Neste tipo de situação, são consideradas as propriedades, refletoras e absorventes, dos materiais dos painéis trabalhando em conjunto. Na situação da Figura 4.5 b), foi considerado o painel plano na área da fonte sonora, a fim de se verificar se esta situação se comportaria melhor na difusão do som.

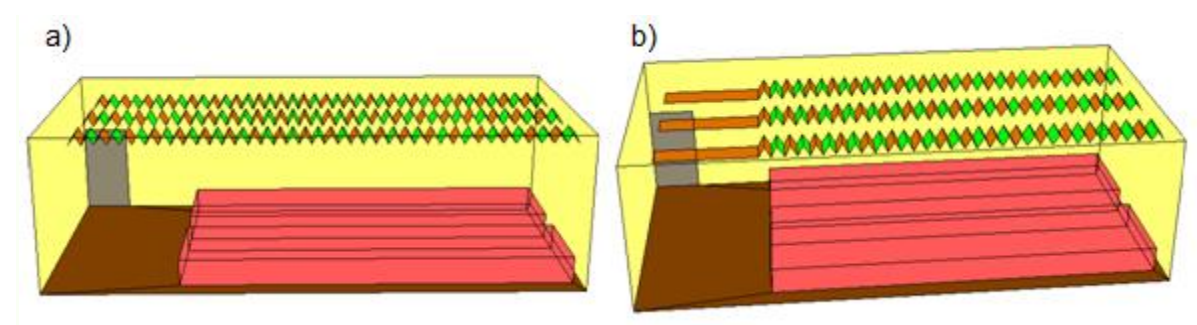


Figura 4.5 - a) e b) painéis com formação triangular com característica de isósceles, sendo a) correspondente aos painéis com a configuração triangular considerando tanto os painéis CF6 PLUS –Pleno 40 quanto os painéis em MDF, enquanto que b) possui a mesma configuração

A última configuração analisada está representada na Figura 4.6. Esta possui dois tipos de angulações nos painéis, sendo que os painéis CF6 PLUS - Pleno 40 estão mais expostos nos módulos. Este tipo de estratégia foi considerada para verificar se existe uma mudança nos valores dos parâmetros de qualidade acústica em relação à estrutura triangular citada na Figura 4.5 a).

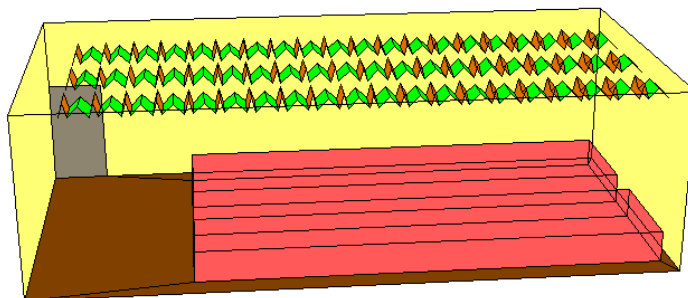


Figura 4.6 - Painéis dispostos considerando duas angulações diferentes

#### *Situações propostas para sala de reunião:*

No cenário da sala de reunião foram considerados apenas casos extremos e um caso intermediário de configuração dos módulos. Na Figura 4.7, são mostradas as situações em que os painéis ou estão com total absorção ou total reflexão, e no caso da Figura 4.8 é demonstrada a situação intermédia.

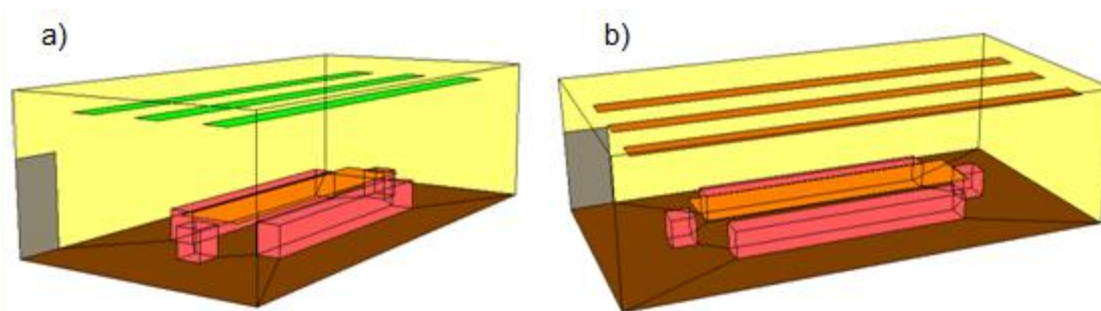


Figura 4.7 - a) e b) painéis na configuração plana, sendo a) correspondente aos painéis CF6 PLUS- PLENO 40, enquanto que b) corresponde aos painéis em MDF.

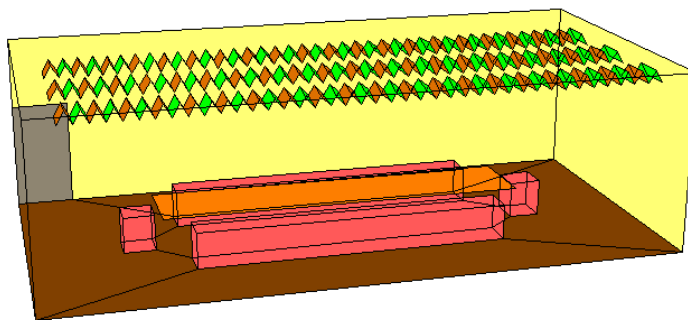


Figura 4.8 - Painéis com formação triangular com característica de isósceles, onde os painéis com a configuração triangular consideram tanto os painéis CF6 PLUS -PLENO 40 quanto os painéis em MDF

#### 4.3.1 Definição das Posições do Emissor e dos Pontos Receptores

Na situação da sala de aulas foram considerados nove pontos receptores, apenas ao longo de um dos conjuntos das cadeiras pelo fato da sala ser simétrica. Em relação às fontes sonoras foram consideradas duas posições. Na Figura 4.9 e no Quadro 4.1 encontram-se representadas essas disposições e medidas.

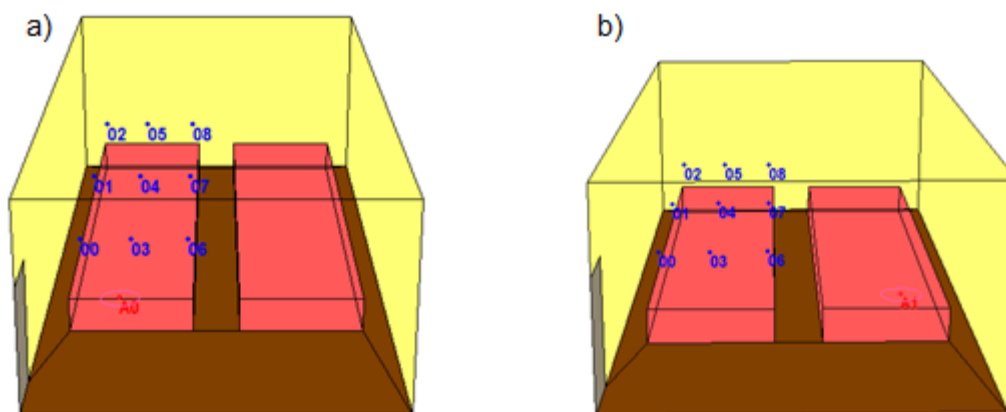


Figura 4.9 - a) pontos receptores e fonte na posição 0; b) pontos receptores e fonte na posição 1

Quadro 4.1 - Distâncias dos pontos receptores e fontes sonoras

		Distância (m)		
		x	y	z
Receptores	0	0,6	4,0	1,3
	1	0,6	7,4	1,3
	2	0,6	11,0	1,3
	3	1,5	4,0	1,3
	4	1,5	7,4	1,3
	5	1,5	11,0	1,3
	6	2,5	4,0	1,3
	7	2,5	7,4	1,3
	8	2,5	11,0	1,3
Fontes	0	1,5	1,0	1,5
	1	4,5	1,0	1,5

No caso da sala de reuniões, foram considerados quatro pontos receptores ao longo das cadeiras. Também são consideradas duas posições de fontes sonoras. Na Figura 4.10 e no Quadro 4.2 são representadas essas disposições e medidas.

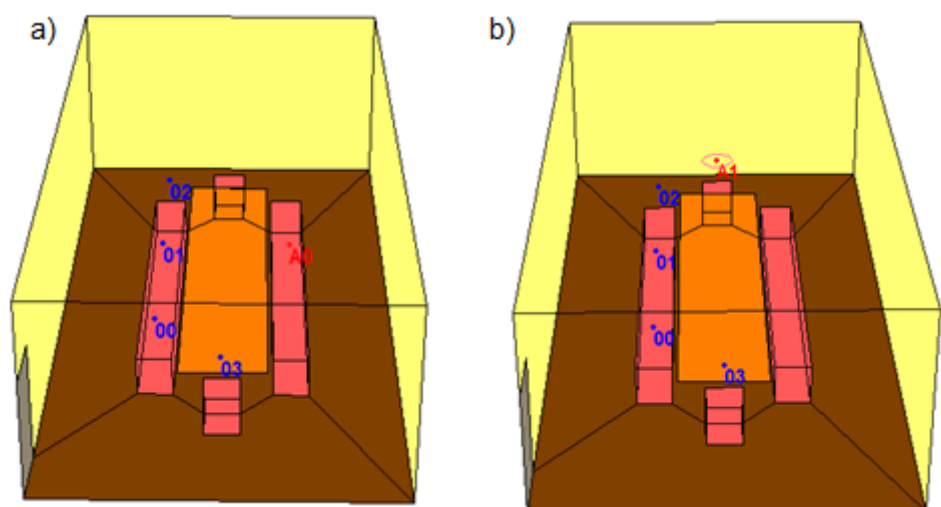


Figura 4.10 - a) pontos receptores e fonte na posição 0; b) pontos receptores e fonte na posição 1

Quadro 4.2 - Distâncias dos pontos receptores e fontes sonoras

		Distância (m)		
		x	y	z
Receptores	0	1,9	3,3	1,3
	1	1,9	6,0	1,3
	2	1,9	8,7	1,3
	3	3,0	2,1	1,3
Fontes	0	4,2	6,0	1,3
	1	3,0	9,9	1,3

### 4.3.2 Definição dos Materiais

A definição dos materiais deu-se de forma a favorecer o estudo a respeito da estrutura. Foram considerados materiais com pouca propriedade de absorção a fim de saber o maior impacto possível que os módulos poderiam oferecer. Os valores dos coeficientes de absorção sonora foram retirados de (Domingues, 2005) e da Tabela de Coeficientes de Absorção Sonora do Laboratório de controle Ambiental do Departamento de Tecnologia da FAU/UnB; os valores dos coeficientes de absorção sonora do Painel CF6 Plus - Pleno 40 foram disponibilizados pela própria empresa, o maior valor considerado foi 0,99 devido a funcionalidade do software.

Nos Quadros 4.3 e 4.4 a seguir estão todos os valores correspondentes a cada material nos dois cenários modelados.

Quadro 4.3 - Coeficientes de absorção sonora das soluções da Sala de aula

Sala de aula Soluções	Coeficiente de absorção, $\alpha$					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Parede rebocada	0,33	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05
Pavimento de madeira	0,15	0,12	0,10	0,07	0,06	0,07
Teto em gesso cartonado	0,16	0,12	0,1	0,08	0,06	0,06
Porta de madeira	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Cadeiras com assento rebatível, almofada revestida a plástico, vazia	0,18	0,32	0,27	0,27	0,27	0,23
Painel CF6 PLUS PLENO 40	0,13	0,66	0,99	0,69	0,42	0,32
Painel em MDF	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05

Quadro 4.4 - Coeficientes de absorção sonora das soluções da Sala de reunião

Sala de reunião Soluções	Coeficiente de absorção, $\alpha$					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Parede rebocada	0,33	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05
Pavimento de madeira	0,15	0,12	0,10	0,07	0,06	0,07
Teto em gesso cartonado	0,16	0,12	0,1	0,08	0,06	0,06
Porta de madeira	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Cadeiras almofadadas revestidas a plástico, vazia	0,13	0,16	0,20	0,20	0,20	0,16
Mesa de madeira	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Painel CF6 PLUS PLENO 40	0,13	0,66	0,99	0,69	0,42	0,32
Painel em MDF	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05

Para os coeficientes de absorção sonora das cadeiras a introduzir no software de modelação, foram feitos ajustes em cada uma das frequências, apresentando-se os valores no Quadro 4.5. Para isso, foi utilizada a Equação 8:

$$\%Abs = abs \times \frac{[\text{número de cadeiras}]}{[\text{área total das cadeiras}]} \quad (8)$$

Quadro 4.5 - Correção dos valores de absorção sonora das cadeiras

	Coeficiente de absorção, $\alpha$						Área (m <sup>2</sup> )	Cadeiras (unidades)
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz		
Cadeiras sala de aula	0,18	0,32	0,27	0,27	0,27	0,23	63,7	64
Cadeiras sala de aula corrigido	0,18	0,32	0,27	0,27	0,27	0,23		
Cadeiras sala de reunião	0,19	0,23	0,28	0,28	0,28	0,23	29,76	22
Cadeiras sala de reunião corrigido	0,14	0,17	0,21	0,21	0,21	0,17		

Em relação aos coeficientes de dispersão, foram considerados nas paredes, pavimento e cadeiras, os valores arbitrados são recomendados pelo Manual do CATT-acoustic.

Quadro 4.6 - Coeficientes de dispersão considerados

Sala de aula / reunião Soluções	Coeficiente de dispersão, $s$					
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Parede rebocada	10	12	15	15	15	15
Pavimento madeira	10	12	15	20	20	20
Cadeiras nos dois cenários	30	40	50	60	70	70

## 4.4 Dados e Análises das Simulações

As análises dos dados das simulações serão divididas nos dois cenários, sala de aulas e sala de reuniões. Como em ambas situações foram consideradas duas posições de fontes serão apresentados os valores correspondentes à Fonte 0, encontrando-se em anexo os valores correspondentes à Fonte 1. No entanto, e como exemplo, será apresentado para as fontes o Tempo de Reverberação.

### 4.4.1 Sala de Aula

#### 4.4.1.1 Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação,  $T_r$ , corresponde ao intervalo necessário para que o nível de pressão sonora em um ambiente fechado diminua 60 dB, logo após a interrupção de emissão da fonte sonora.

No estudo em questão, este parâmetro foi calculado com base no decaimento de energia sonora entre -5 dB e -25 dB, e extrapolado para 60 dB de decaimento (T-20), foi necessário realizar essa consideração, visto que a situação simulada não possuía superfícies de absorção suficientes, o software CATT - Acoustic não possibilitava a coleta de dados T-30.

O valor do Tempo de Reverberação, segundo o RRAE, para o caso do volume da sala de 252 m<sup>3</sup> deve ser :

$$T \leq 0,15 \times 252^{1/3} \leq 0,95 \text{ s}$$

em que T corresponde ao tempo de reverberação médio, obtido a partir das bandas de oitava de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 são representados os valores médios de tempo de reverberação de cada tipo de configuração para a Fonte 0 e para a Fonte 1. Foi realizada uma média aritmética entre todos os receptores em cada banda de frequência. Note-se que devido ao fato de ter-se utilizado a versão demo do software, a quantidade de raios fica limitada, fazendo com que o valor do tempo de reverberação varie a cada nova solicitação do cálculo de uma situação.

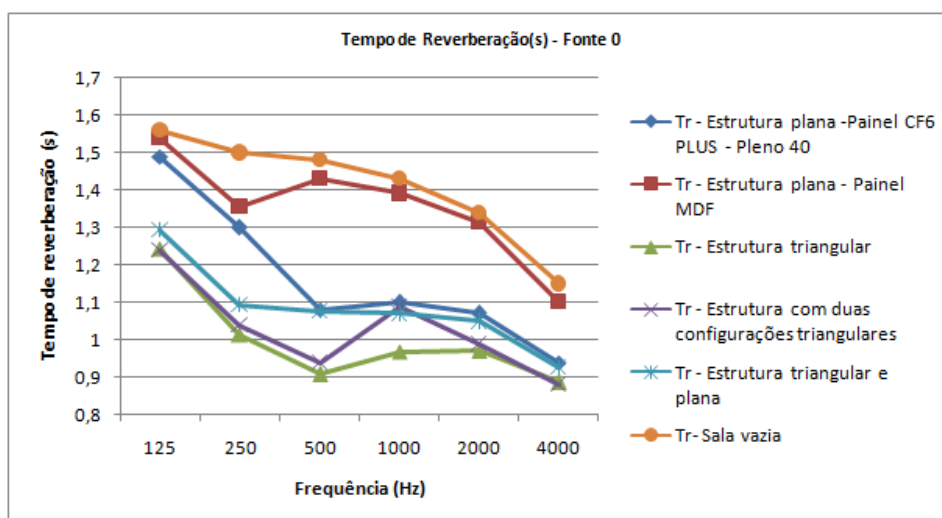


Figura 4.11 - Tempo de Reverberação - sala de aula – Fonte 0

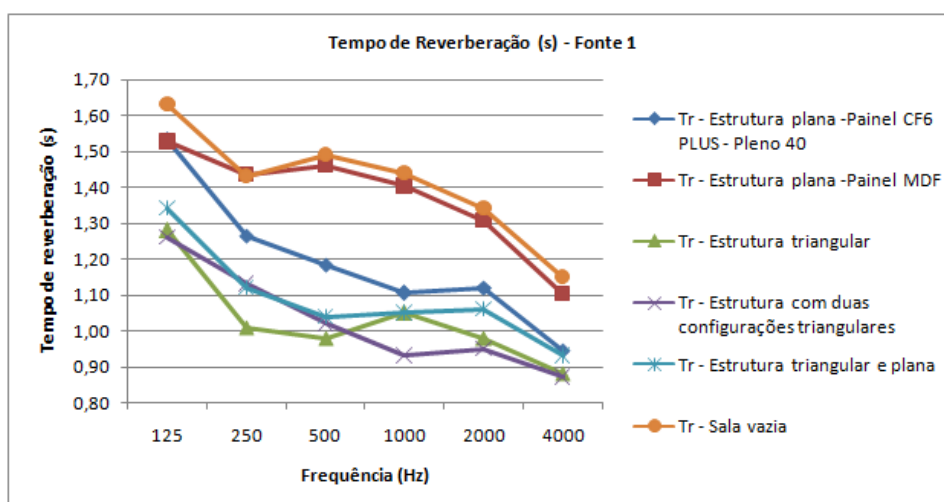


Figura 4.12 - Tempo de Reverberação - sala de aula - Fonte 1

A partir das Figuras 4.11 e 4.12 correspondentes à Fonte 0 e Fonte 1, é possível analisar o comportamento do tempo de reverberação de cada tipo de solução. A configuração onde o painel de MDF é plano se comporta quase igual ao da Sala vazia, o que já era esperado uma vez que o MDF tem pouca absorção sonora. A solução que mostrou menor tempo de reverberação, e assim mais absorção sonora, é a configuração da estrutura triangular, uma vez que esta tem uma maior absorção sonora nas médias e altas frequências. A configuração com dois tipos de triângulo tem valores próximos dos da solução triangular, sendo a diferença que esta possui um pouco menos de absorção. A configuração triangular e plana funciona como



intermediária entre a solução triangular e a solução plana do painel CF6 Plus - Pleno 40. Já a solução onde se tem os painéis planos é a configuração que acabou tendo um maior tempo de reverberação quando comparada com as soluções absorventes.

No Quadro 4.7 estão os valores médios do tempo de reverberação correspondentes a Figura 4.11. Foi calculada a média entre os tempos de reverberação nos 500,1000 e 2000 Hz. Estes valores devem ser comparados com a exigência regulamentar de  $T \leq 0,73$  s.

Quadro 4.7 - Valores médios do tempo de reverberação - sala de aula - Fonte 0

Configuração - Fonte 0	Frequência (Hz)						Tr médio (s) - 500Hz : 2000Hz
	125	250	500	1000	2000	4000	
Estrutura plana - Painel CF6 Plus - Pleno 40	1,49	1,30	1,08	1,10	1,07	0,94	1,08
Estrutura plana - Painel MDF	1,54	1,36	1,43	1,39	1,31	1,10	1,38
Estrutura triangular	1,24	1,01	0,91	0,97	0,97	0,89	0,95
Estrutura com duas configurações triangulares	1,23	1,04	0,94	1,09	0,99	0,88	1,01
Estrutura triangular e plana	1,29	1,09	1,08	1,07	1,05	0,93	1,07
Sala vazia	1,56	1,50	1,48	1,34	1,34	1,15	1,39

O software também faz o cálculo do tempo de reverberação usando a fórmula de Sabine, mas por ser um método mais simplificado há diferenças nos valores quando comparados com os fornecidos pelo método de *Ray Tracing*. Mesmo tendo diferenças quanto aos valores, estes mantêm a mesma lógica. Os valores mais altos e mais baixos de tempo de reverberação dos calculados por CATT e por Sabine são os mesmos.

Quadro 4.8 - Valores tempo de reverberação por Sabine - sala de aula

SABINE Configurações	Frequência (Hz)						Tr médio (s) - 500Hz : 2000Hz
	125	250	500	1000	2000	4000	
Estrutura plana - Painel CF6 Plus - Pleno 40	0,99	0,58	0,52	0,64	0,77	0,78	0,64
Estrutura plana - Painel MDF	1,1	0,95	1,15	1,18	1,15	1,01	1,16
Estrutura triangular	0,96	0,57	0,52	0,64	0,77	0,75	0,64
Estrutura com duas configurações triangulares	0,94	0,56	0,51	0,62	0,75	0,74	0,63
Estrutura triangular e plana	0,98	0,62	0,58	0,7	0,82	0,79	0,70
Sala vazia	1,16	1,0	1,2	1,23	1,2	1,07	1,21

Como antes foi já referido, este estudo não tem como fim fazer com que a sala seja adequada ao RRAE, mas sim utilizar o seu dado como uma base para ter-se uma sensibilidade do que está acontecendo nos casos estudados. Sendo assim, se formos comparar estes valores com a exigência regulamentar, nenhum é adequado, porém com algumas alterações na sala ou até mesmo com a utilização de painéis com mais absorção pode ser possível conseguir atingir tal parâmetro.

#### 4.4.1.2 Tempo de Reverberação Mais Curto – EDT

Na Figura 4.13 podemos observar que os valores máximos e mínimos de Early Decay Time (Tempo de Reverberação mais Curto) variam pouco entre as várias estruturas na frequência de 125 Hz, onde tal diferença não ultrapassa os 0,25 segundos. Já nas frequências de 250 Hz, 500 Hz e 1000 Hz, as diferenças entre o valor máximo e mínimo de EDT entre as estruturas são respectivamente 0,55 s, 0,55 s, 0,50 s, 0,40 s e 0,40 s. Considerando que as simulações foram realizadas em ambientes onde a expressão oral é muito importante, podemos notar que as configurações estrutura triangular, estrutura com duas configurações triangulares, estrutura plana - painel CF6 plus - Pleno 40 e Estrutura triangular e plana, ofereceram melhores resultados de EDT. Valores baixos de EDT são diretamente relacionados com melhor compreensão oral entre os ocupantes do ambiente. É importante notar também que a estrutura plana - painel MDF teve um comportamento parecido com a sala vazia por não haver absorção, tal semelhança já era esperada e veio a confirmar o melhor desempenho dos painéis com angulação, cuja maior diferença de EDT entre elas foi de apenas 0,10 segundos.

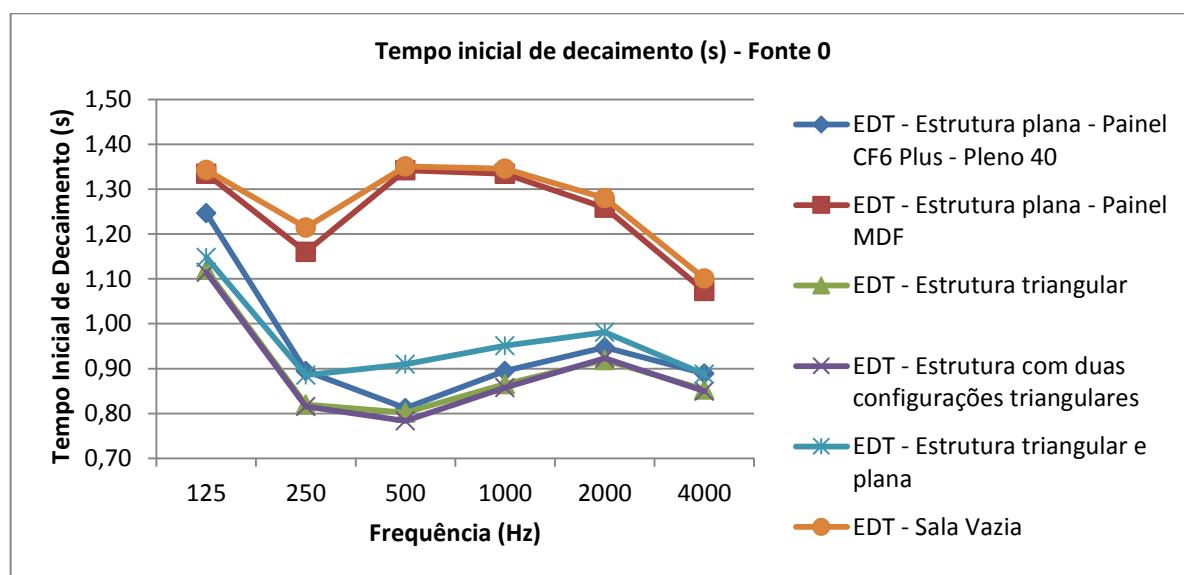


Figura 4.13 - Tempo Inicial de decaimento - sala de aula – Fonte 0

#### 4.4.1.3 Índice de Transmissão da Linguagem – STI

Os Quadros 4.9 e 4.10 apresentam o cálculo do índice de transmissão da linguagem para oratória, considerando todas as configurações da estrutura para Fonte 0. No Quadro 4.9 estão representados por ponto receptor enquanto que no Quadro 4.10 se apresenta uma média entre

os pontos receptores. Assim, é possível verificar que não houve uma mudança representativa no índice em relação às estruturas nas suas diversas configurações, mas essas se enquadram como boa na avaliação subjetiva, enquanto que as soluções de sala vazia e com estrutura plana de MDF estão enquadradas como aceitáveis.

Quadro 4.9 - Valores médios do Índice de Transmissão de Linguagem STI - sala de aula

Configuração - Fonte 0	STI - média 500.2000Hz								
	Receptor 0	Receptor 1	Receptor 2	Receptor 3	Receptor 4	Receptor 5	Receptor 6	Receptor 7	Receptor 8
Estrutura plana - Painei CF6 Plus - Pleno 40	0,63	0,61	0,62	0,63	0,61	0,62	0,62	0,61	0,62
Estrutura plana - Painei MDF	0,54	0,52	0,55	0,53	0,52	0,54	0,53	0,52	0,53
Estrutura triangular	0,63	0,60	0,61	0,63	0,60	0,62	0,62	0,60	0,63
Estrutura com duas configurações triangulares	0,61	0,58	0,61	0,61	0,59	0,60	0,60	0,58	0,60
Estrutura triangular e plana	0,61	0,58	0,61	0,61	0,59	0,60	0,60	0,58	0,60
Sala vazia	0,61	0,58	0,61	0,61	0,59	0,60	0,60	0,58	0,60

Quadro 4.10 - Avaliação subjetiva do Índice de Transmissão de Linguagem - sala de aula

Configuração - Fonte 0	STI - 500Hz ; 2000Hz	Avaliação subjetiva
Estrutura plana - Painei CF6 Plus - Pleno 40	0,62	Boa
Estrutura plana - Painei MDF	0,53	Aceitável
Estrutura triangular	0,61	Boa
Estrutura com duas configurações triangulares	0,60	Boa
Estrutura triangular e plana	0,60	Boa
Sala vazia	0,53	Aceitável

#### 4.4.1.4 Definição - D50

Uma configuração que fornece valores baixos de Definição geralmente está com excesso de reverberação. Valores considerados adequados são superiores as 50%. No caso da Fonte 0 é possível verificar que as configurações estrutura plana-painel de MDF e sala vazia possuem valores abaixo de 50%, enquanto que as outras soluções estão todas acima do mínimo aceitável. No entanto, é possível verificar que, na frequência de 125 Hz, os valores para todos os tipos de soluções acabam por ser os piores.

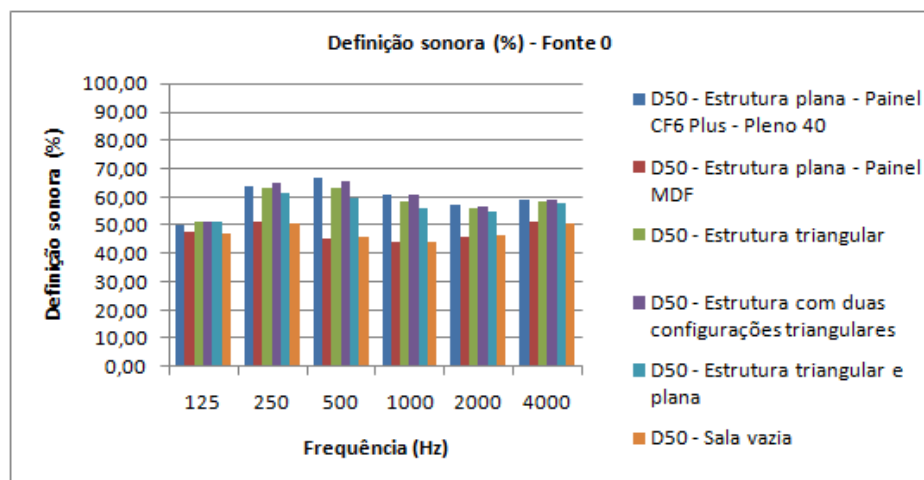


Figura 4.14 - Definição Sonora - sala de aula - Fonte 0

#### 4.4.1.5 Índice de Claridade - C50

Na Figura 4.15 indica os valores médios de C50 para cada uma das bandas de oitava situadas entre 125 Hz e 4 kHz. Estes valores são obtidos através da média aritmética dos dados obtidos de todos os receptores. Vale a pena lembrar que o Índice de Claridade C50 possui correlação com D50, pois é possível verificar que, quando os valores de D50 estão abaixo de 50%, os valores de C50 são negativos. Esta correlação é claramente compreendida através da Equação 9.

$$D = \frac{1}{1 + 10^{-C50/10}} \quad (9)$$

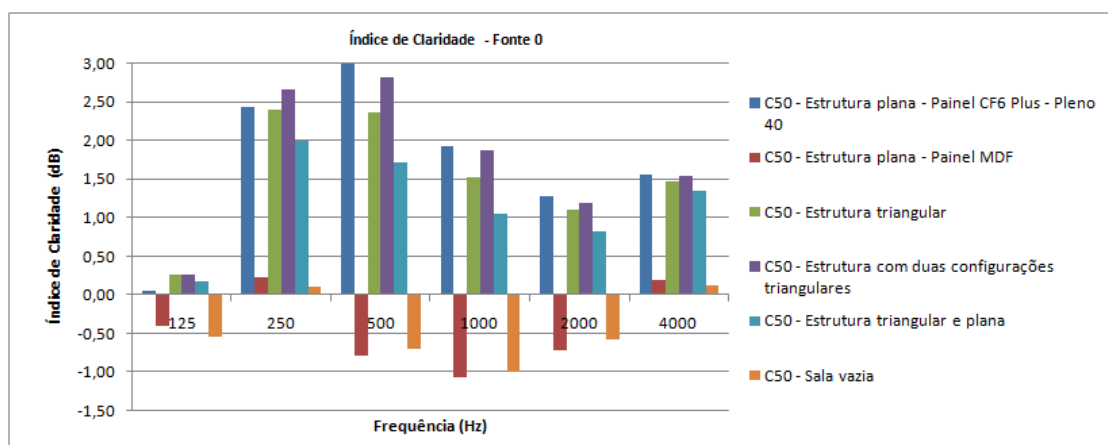


Figura 4.15 - Índice de Claridade (dB) - sala de aula - Fonte 0

As médias aritméticas dos vários receptores para cada tipo de configuração são representadas no gráfico abaixo. A partir desses dados foram calculados os valores de Índice de Claridade para cada configuração utilizando a Equação 7.

$$C50 = 0,15 \times C50(500\text{Hz}) + 0,25 \times C50(1\text{kHz}) + 0,35 \times C50(2\text{kHz}) + 0,25 \times C50(4\text{ kHz})$$

Todos os valores em dB.

Quadro 4.11 - Média dos Índices de Claridade - sala de aula - Fonte 0

Configurações	C50 dB(500Hz a 4000Hz)
Estrutura plana - painel CF6 Plus - Pleno 40	1,8
Estrutura plana - Painel MDF	-0,6
Estrutura triangular	1,5
Estrutura com duas configurações triangulares	1,7
Estrutura triangular e plana	1,1
Sala vazia	-1

Como podemos no Quadro 4.11 a estrutura plana - painel MDF e sala vazia possuem valores abaixo de 0, portanto considerados abaixo do recomendável. Todavia todas as outras configurações possuem valores entre aceitáveis e bom.

#### 4.4.1.6 Níveis de pressão sonora – SPL

O mapa de cores SPL apresenta a dispersão do ruído emitido pela fonte sonora. A Figura 4.16 apresenta a estrutura triangular com a fonte 0 na frequência de 1000 Hz.

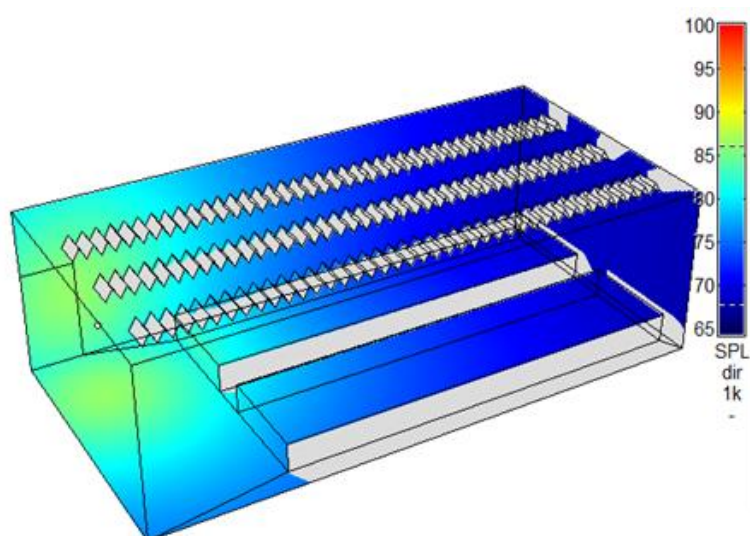


Figura 4.16 - Mapa de cores SPL para 1000 Hz - sala de aula - Fonte 0 – Estrutura triangular

Os valores dispostos nas Figuras 4.17 e 4.18 representam os níveis de pressão sonora da fonte 0. Tais níveis foram calculados em dois receptores, sendo o receptor 3 posicionado a 3 metros de distância da fonte e o receptor 5 a 10 m da fonte. O valor mínimo para que o ser humano perceba alguma diferença sonora é de 1 dB e no caso de uma mudança claramente percebida seria de 5 dB.

É possível notar que a variação dos níveis de pressão sonora possui uma maior diferença entre as configurações quando são avaliados receptores próximos da fonte, sendo que as maiores discrepâncias de valores que concernem a diferentes configurações dos painéis, ocorrem entre a estrutura triangular e plana e estrutura plana - painel CF6 plus-pleno 40, enquanto que na situação onde são apresentados os dados do receptor 5, não houve variações perceptíveis entre as configurações.

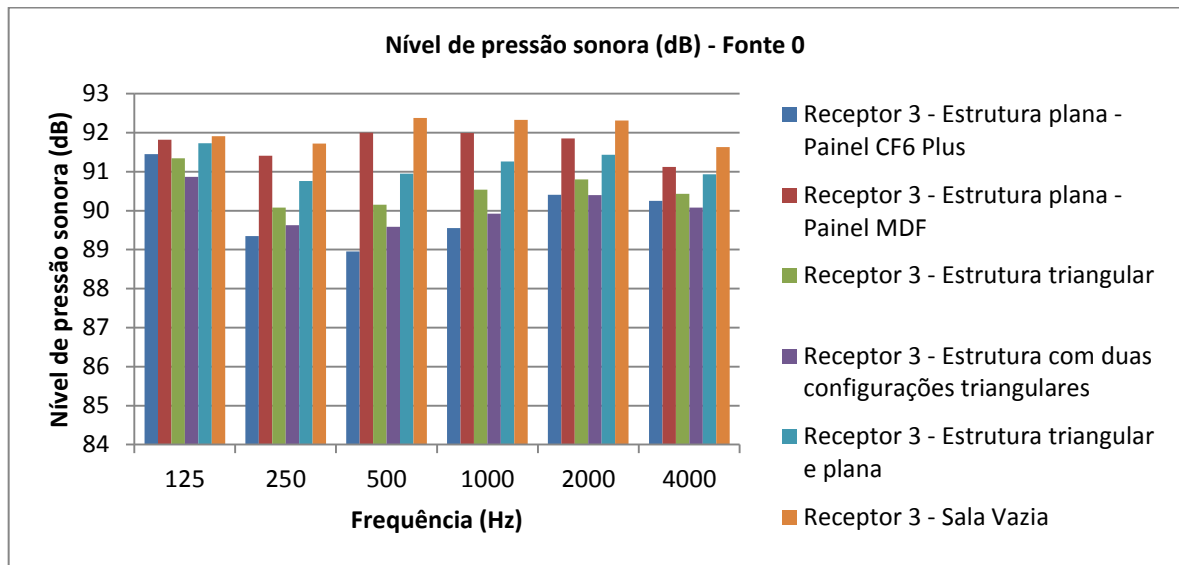


Figura 4.17 Nível de pressão sonora (dB) - sala de aula - Fonte 0 - Receptor 3

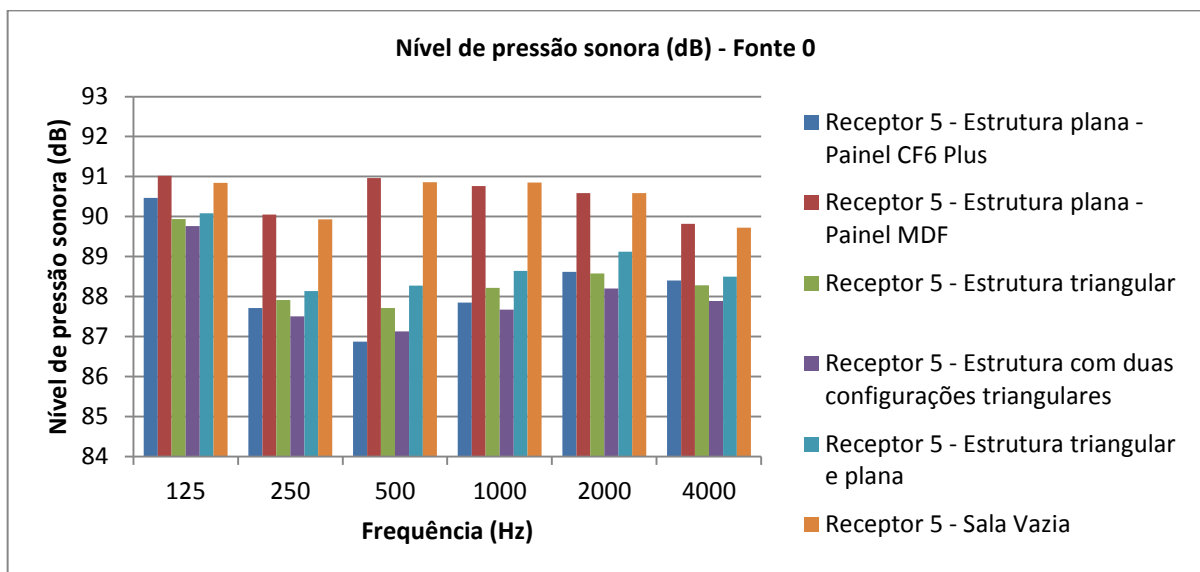


Figura 4.18 - Nível de pressão sonora (dB) - sala de aula - Fonte 0 - Receptor 5

#### 4.4.1.7 Absorção Média da Sala ( $\alpha$ )

A absorção sonora da sala influencia todos os outros parâmetros de qualidade sonora. Os valores obtidos do CATT foram calculados a partir da fórmula de Sabine. Na Figura 4.19 estão representadas todas as cinco configurações mais a absorção média da sala sem os

módulos. A estrutura que possui maior absorção é a estrutura plana - painel CF6 plus - pleno 40. Ainda é possível verificar que a estrutura triangular e a estrutura com duas configurações triangulares não possuem diferença, a angulação não foi suficiente para criar uma diferença significativa.

Quando comparamos as estruturas triangular e a triangular e plana é possível verificar que há uma diferença maior na frequência de 500 Hz, sendo que a estrutura triangular possui mais absorção.

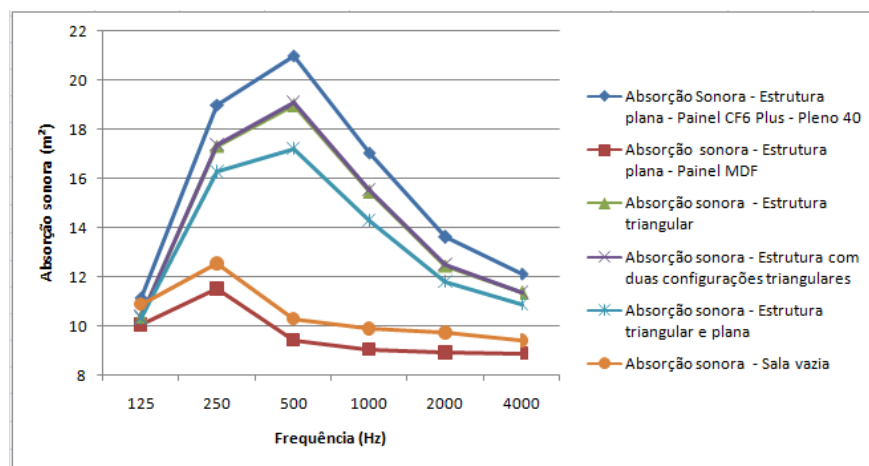


Figura 4.19 - Absorção sonora da sala de aula

## 4.4 2 Sala de Reunião

### 4.4.2.1 Tempo de Reverberação

A forma de análise adotada para este cenário é a mesma do ponto 4.5.1.1. Nas Figuras 4.20 e 4.21 são representados os valores médios de tempo de reverberação de cada tipo de configuração para a Fonte 0 e a Fonte 1. Como pode ser percebido, a maior diferença de valores entre as soluções estrutura triangular e estrutura plana- painel CF6 plus- Pleno 40 está nas baixas frequências, sendo que a estrutura triangular demonstra ter a maior absorção entre todas as soluções. A configuração onde o painel de MDF é plano se comporta quase igual ao da sala vazia, o que já era esperado uma vez que o MDF liso tem pouca absorção sonora.



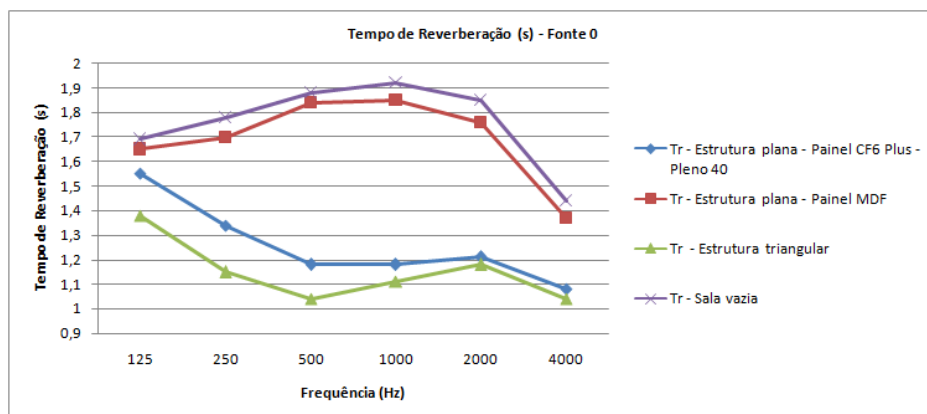


Figura 4.20 - Tempo de Reverberação – sala de reunião – Fonte 0

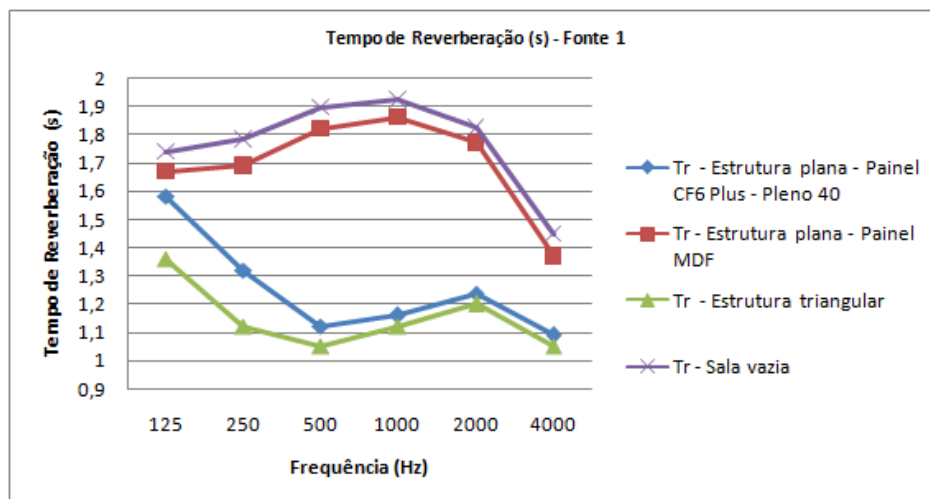


Figura 4.21 - Tempo de Reverberação – sala de reunião – Fonte 1

No Quadro 4.12 estão os valores médios do tempo de reverberação correspondentes a Figura 4.20. Foram calculadas as médias entre os tempos de reverberação 500,1000 e 2000 Hz. Estes valores são comparáveis ao  $T \leq 0,95$  s.

Quadro 4.12 - Tempo de Reverberação médio – sala de reunião – Fonte 0

Configuração - Fonte 0	Frequência (Hz)						Tr médio (s) - 500Hz : 2000Hz
	125	250	500	1000	2000	4000	
Estrutura plana - Paineis CF6 Plus - Pleno 40	1,55	1,34	1,18	1,18	1,21	1,08	1,19
Estrutura plana - Painel MDF	1,65	1,70	1,84	1,85	1,76	1,37	1,82
Estrutura triangular	1,38	1,15	1,04	1,11	1,19	1,04	1,11
Sala vazia	1,69	1,78	1,88	1,92	1,85	1,44	1,88

Fez-se também o cálculo do tempo de reverberação por Sabine, que por ser um método mais simplificado apresenta diferenças nos valores quando comparados com os fornecidos pelo método de *Ray Tracing*. Mesmo tendo diferenças quanto aos valores estes mantêm a mesma lógica. Os valores mais altos e mais baixos de tempo de reverberação dos calculados por CATT e por Sabine são os mesmos.

Quadro 4.13 - Tempo de Reverberação Sabine – sala de reunião

SABINE Configuração - Fonte 0	Frequência (Hz)						Tr médio (s) - 500Hz : 2000Hz
	125	250	500	1000	2000	4000	
Estrutura plana - Painel CF6 Plus - Pleno 40	1,11	0,75	0,62	0,79	1,0	0,96	0,80
Estrutura plana - Painel MDF	1,24	1,42	1,6	1,71	1,67	1,31	1,66
Estrutura triangular	1,08	0,74	0,62	0,79	0,99	0,93	0,80
Sala vazia	1,29	1,49	1,66	1,78	1,74	1,39	1,73

É possível perceber uma melhoria clara com a utilização das estruturas tanto triangular quanto plana quando comparamos com a sala vazia ou na situação da configuração com a estrutura plana - painel MDF.

#### 4.4.2.2 Tempo de Reverberação Mais Curto – EDT

Podemos observar na Figura 4.22 que, assim como na sala de aula, o EDT da sala de reunião com a utilização de diferentes geometrias possui valores muito próximos na frequência de 125 Hz e 4000 Hz, sendo que todos os valores distam uns dos outros aproximadamente no máximo 0,35 s e 0,40 s respectivamente para cada estrutura, entretanto quando observamos as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz os valores divergem mais, sendo a diferença máxima de 0,60 s, 0,90 s, 0,90 s e 0,70 s respectivamente.

A estrutura plana - painel MDF e a sala vazia possuem comportamentos semelhantes nos EDTs, tal comportamento já era esperado, por outro lado a estrutura triangular e a estrutura plana - painel CF6 plus comportaram-se de maneira muito semelhante, sendo a maior diferença entre as duas de aproximadamente 0,05 s. Portanto, para ambientes estudados onde procura-se um tempo de reverberação menor, é aconselhável essas duas estruturas que produzem um EDT também menor.

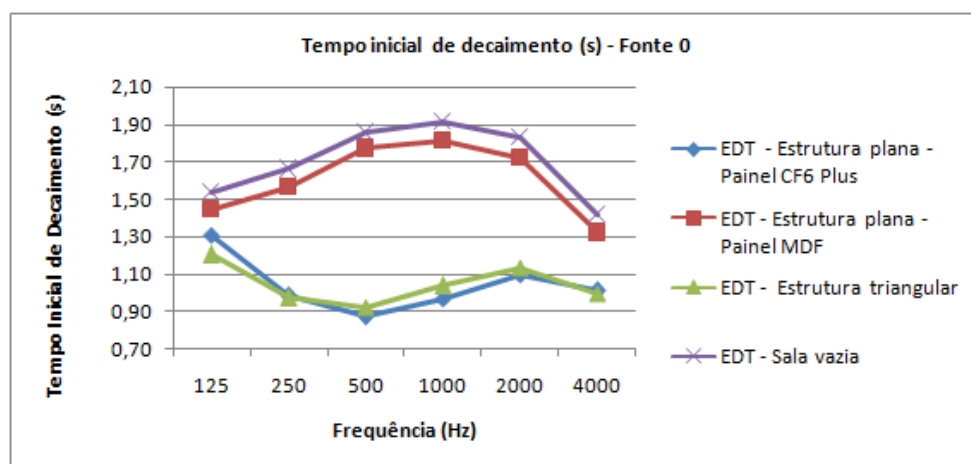


Figura 4.22 - Tempo inicial de decaimento – sala de reunião – Fonte 0

#### 4.4.2.3 Índice de Transmissão da Linguagem – STI

O Quadro 4.14 apresenta as médias entre 500 Hz e 2000 Hz para cada receptor considerado na sala. De acordo com a avaliação subjetiva é possível verificar que a única solução que é considerada boa é a estrutura plana- painel CF6 plus - pleno 40, enquanto que as outras se enquadram em aceitáveis.

Quadro 4.14 - Índice de Transmissão da Linguagem - STI – sala de reunião - Fonte 0

Configuração - Fonte 0	STI - média 500;2000Hz				STI - 500Hz ; 2000Hz	Avaliação subjetiva
	Receptor 0	Receptor 1	Receptor 2	Receptor 3		
Estrutura plana - Painel CF6 Plus - Pleno 40	0,61	0,60	0,60	0,59	0,60	Boa
Estrutura plana - Painel MDF	0,49	0,49	0,49	0,47	0,48	Aceitável
Estrutura triangular	0,59	0,60	0,58	0,59	0,59	Aceitável
Sala vazia	0,47	0,47	0,47	0,46	0,47	Aceitável

#### 4.4.2.4 Definição - D50

Em relação ao parâmetro D50 assim como no item 5.4.1.4 a solução para ser considerada adequada deve ter valores acima de 50%. Como pode ser analisado na Figura 4.23, a estrutura triangular e a estrutura plana - painel CF6 plus - Pleno 40 possuem valores acima de 50% em todas as bandas de frequência. Já a solução Estrutura plana - painel MDF por ter muita reverberação acaba tendo valores abaixo do adequado.

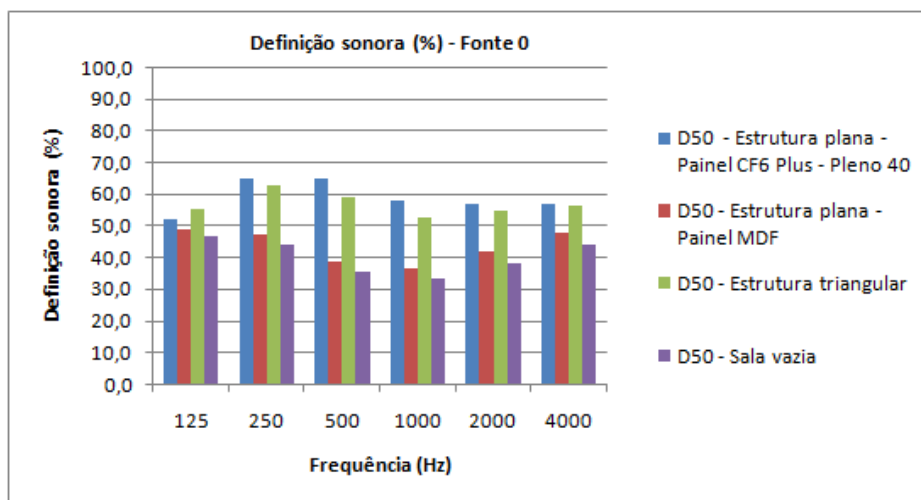


Figura 4.23 - Definição Sonora – sala de reunião - Fonte 0

#### 4.4.2.5 Índice de Claridade - C50

Na Figura 4.24 estão os valores médios obtidos através de média aritmética dos dados obtidos de todos os receptores nas bandas de oitava situadas entre 125 Hz e 4000 Hz. Da mesma forma que é analisado no item 4.5.1.5 é possível verificar a correlação entre os parâmetros D50 e C50, onde todos os valores abaixo de 50% em D50 são negativos em C50.

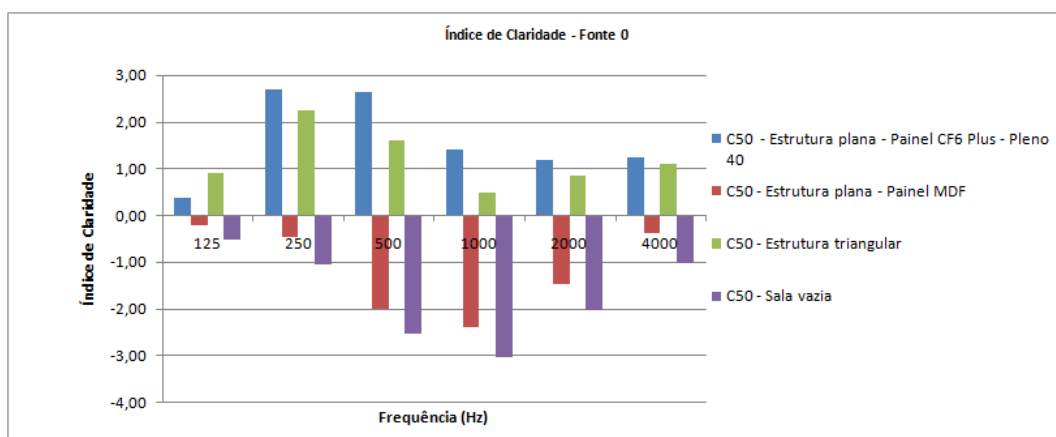


Figura 4.24 - Índice de Claridade – sala de reunião - Fonte 0

As médias aritméticas dos receptores para cada tipo de configuração, são representadas acima. A partir desses dados foram calculados os valores de Índice de Claridade para cada configuração utilizando a Equação 7.

$$C50 = 0,15 \times C50(500\text{Hz}) + 0,25 \times C50(1\text{kHz}) + 0,35 \times C50(2\text{kHz}) + 0,25 \times C50(4\text{kHz})$$

Todos os valores em dB.

Quadro 4.15 - Índice de Claridade – sala de reunião

Configuração - Fonte 0	C50 dB(500Hz a 4000Hz)
Estrutura plana - Painel CF6 Plus - Pleno 40	1,5
Estrutura plana - Painel MDF	-1,5
Estrutura triangular	0,9
Sala vazia	-2,1

Como podemos observar acima a “estrutura plana - painel MDF” e sala vazia possuem valores abaixo de 0, portanto considerados abaixo do recomendável. Todavia todas as outras configurações possuem valores entre aceitáveis.

#### 4.4.2.6 Níveis de Pressão Sonora – SPL

O mapa de cores SPL apresenta a dispersão do ruído emitido pela fonte sonora. A Figura 4.25 apresenta a estrutura triangular com a fonte 0 e com a fonte 2 na frequência de 1000 Hz.

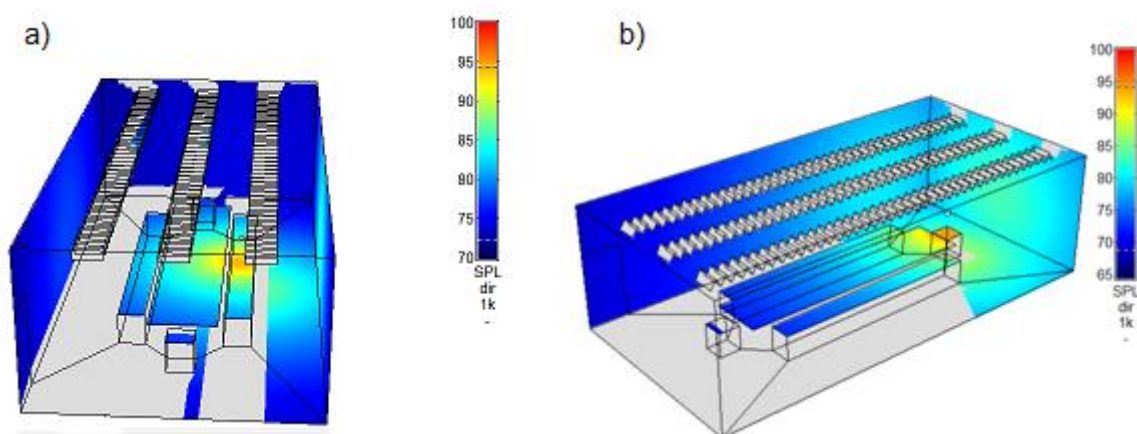


Figura 4.25 - Mapa da de cores SPL– sala de reunião, sendo a) Fonte 0 e b) fonte 1

Os valores dispostos nas Figuras 4.26 e 4.27 representam os níveis de pressão sonora da fonte 0; tais níveis foram medidos em dois receptores, sendo o receptor 2 posicionado a 3,55 m de distância da fonte e o receptor 3 a 4,07 m da fonte. O valor mínimo para que o ser humano perceba alguma diferença sonora é de 1 dB e no caso de uma mudança claramente percebida seria de 5 dB.

É verificado que na comparação entre as diferenças de níveis sonoros quando comparadas entre configurações que possuem absorção não há diferença perceptível ao ouvido humano. Porém quando comparamos as soluções absorventes em relação as soluções mais difusoras é possível ver uma maior diferença na frequência de 500 Hz, a diferença é de 5 dB.

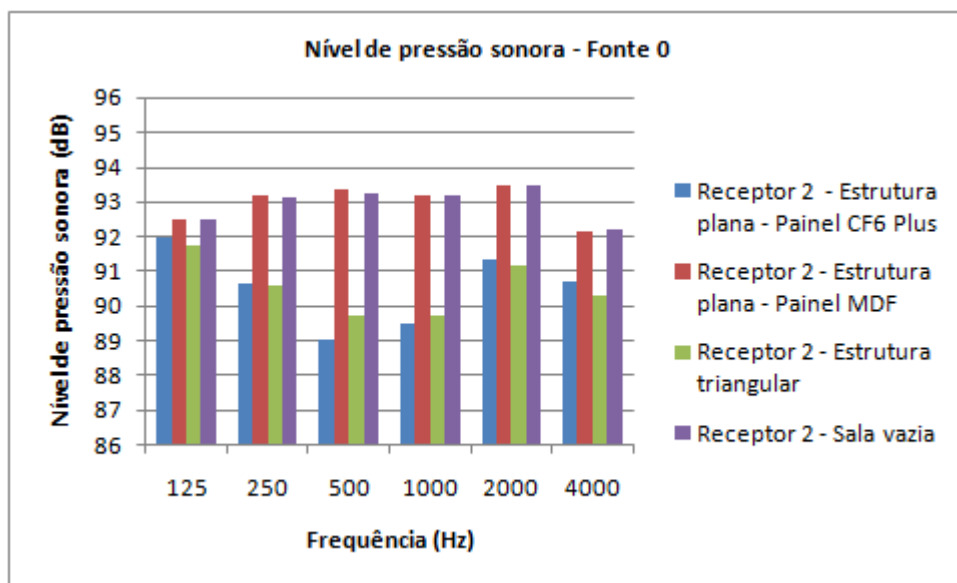


Figura 4.26 - Nível de Pressão Sonora (dB) – sala de reunião - Fonte 0 - Receptor 2

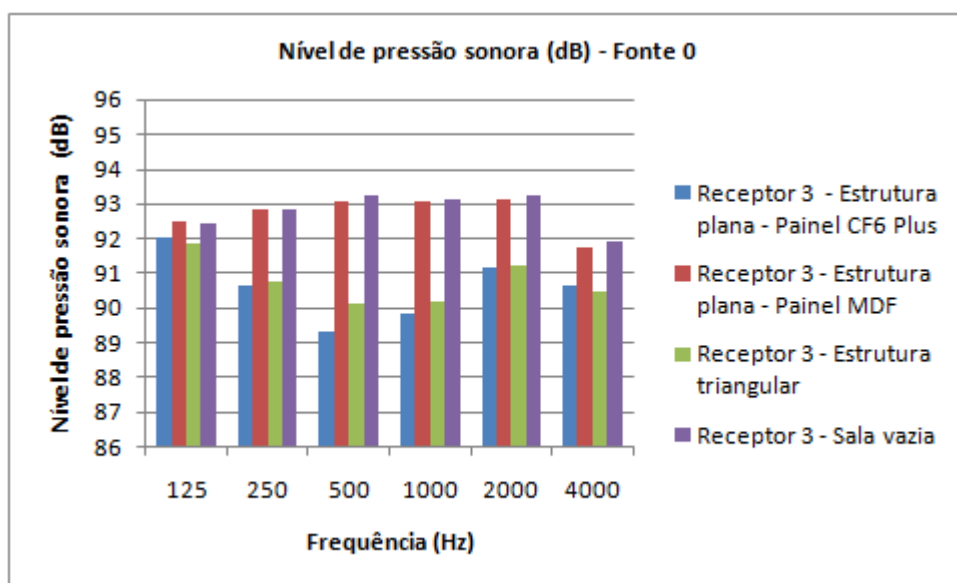


Figura 4.27 - Nível de Pressão sonora (dB) – sala de reunião – Fonte 0 – Receptor 3

#### 4.4.2.7 Absorção Média da Sala $\alpha$

Assim como no item 4.4.1.7 foram realizadas as mesmas considerações em relação a absorção sonora nesta situação. Os valores da Figura 4.28 são valores médios entre os receptores em cada banda de frequência. É possível verificar que as soluções absorventes possuem a maior variação entre elas nos 500 Hz. Na frequência de 125 Hz é possível notar também que quase não há absorção sonora em todas as situações.

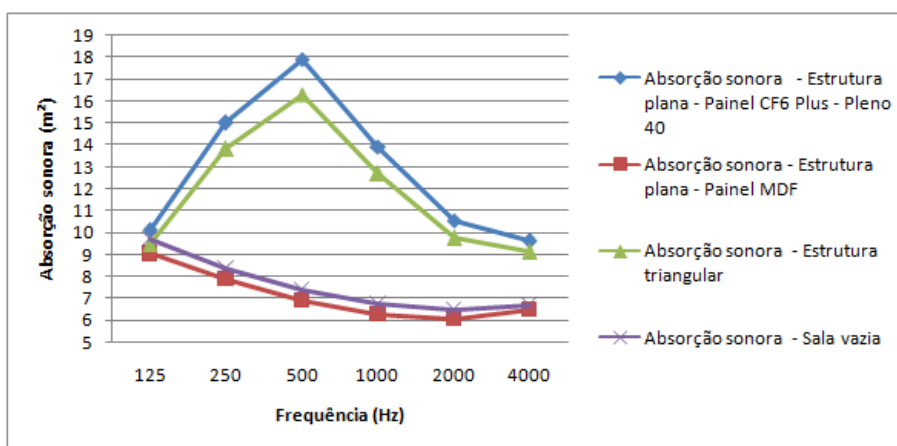


Figura 4.28 - Absorção sonora da sala de reunião

## 5 ANÁLISE LABORATORIAL PRELIMINAR

A segunda parte do trabalho a respeito da estrutura estudada se deu durante a realização de uma modelação laboratorial, cujos valores devem ser considerados de forma independente da modelação numérica utilizando o software *CATT-Acoustic*®, como foi discorrido no capítulo 4. O conceito utilizado no ensaio laboratorial preliminar relacionado com a geometria foi o mesmo, no entanto foram realizadas algumas simplificações para esse primeiro estudo, assim como foi realizado no caso da simulação da estrutura estudada no software *CATT-Acoustic*®. No caso da simulação computacional, a estrutura estava localizada na parte superior, enquanto que, no ensaio laboratorial, o protótipo da estrutura foi colocado no chão da Câmara Reverberante. A outra questão foi a área do elemento que foi estudado; como o ensaio era apenas para um estudo de comportamento inicial, foi utilizada uma área reduzida do protótipo. O ensaio laboratorial foi executado na Câmara Reverberante do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

### 5.1 Apresentação do Protótipo

A respeito da estrutura estudada, foram consideradas duas configurações angulares possíveis, tais configurações visam verificar se há alguma diferença considerável em relação ao tempo de reverberação e absorção sonora para cada formato escolhido. Os materiais utilizados na montagem do protótipo foram escolhidos por sua grande utilização comercial e fácil acesso, sendo eles o MDF, utilizado com a finalidade de refletir o som, e para a absorção sonora foi utilizado o painel acústico tipo CF6-Plus – Pleno 40 que possui véu acústico Plus – nonwoven Plus. As dimensões dos painéis de 60 x 30cm<sup>2</sup> foram escolhidas por sua melhor adequação à realidade das edificações. A distância considerada entre os dois módulos é de 60 cm.



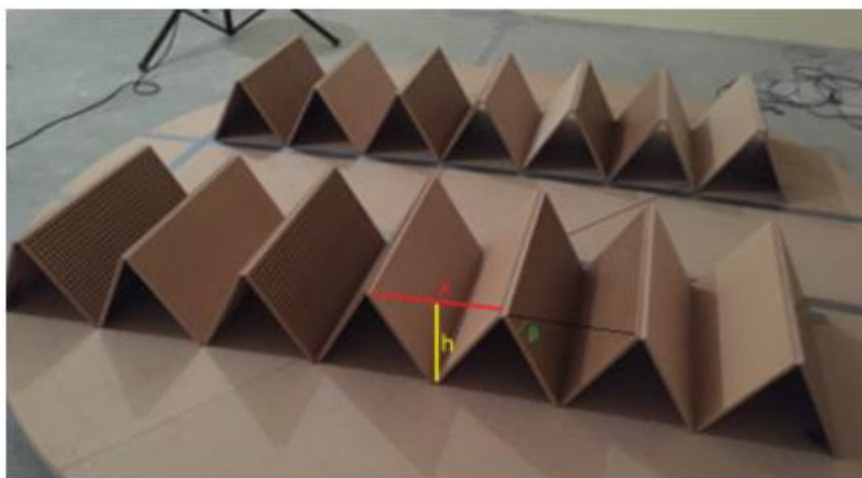


Figura 5.1 - Protótipo Configuração 1

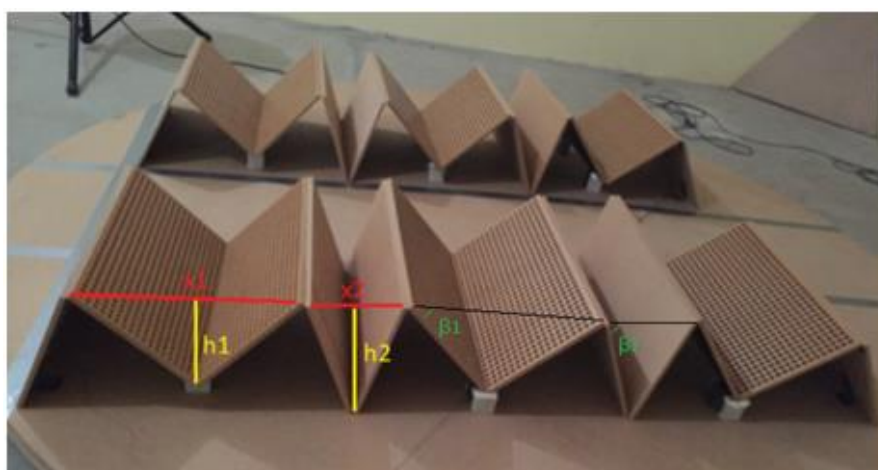


Figura 5.2 - Protótipo Configuração 2

Nas *Figuras 5.1 e 5.2 – Protótipo Configuração 1 e 2* é possível encontrar maiores detalhes a respeito do entendimento das dimensões adotadas nas configurações. Na Configuração 1, o valor de  $x$  corresponde a 30 cm,  $h$  a 26 cm. Pelo fato dos triângulos serem isósceles  $\beta$  corresponde ao valor de  $60^\circ$ . Em relação à Configuração 2, foi feita uma variação do ângulo para duas situações onde a soma do valor de  $x_1$  e  $x_2$  corresponde ao valor de dois  $x$  na configuração 1. Os valores correspondentes à Configuração 2 foram  $x_1$  igual a 42 cm,  $h_1$  igual a 21 cm com  $\beta_1$  igual a  $45^\circ$ , os valores referentes à outra configuração angular é  $x_2$  igual 18 cm,  $h_2$  igual a 28 cm e com  $\beta_2$  igual a  $72^\circ$ .

Outros detalhes que devem ser mencionados é que na Configuração 2 foi necessário utilizar um meio que causasse um desnível para conseguir o formato desejado, para isso foram utilizados os blocos disponíveis no laboratório para alcançar uma altura de 7 cm em relação a plataforma. O material utilizado na colagem dos painéis para se conseguir uma maleabilidade de trabalho foi o uso de fita adesiva.

## 5.2 Equipamentos

Quanto aos equipamentos manuseados durante o procedimento experimental, deve referir-se que foi utilizado um calibrador, um microfone sustentado por um tripé, uma fonte de ruído omnidirecional, também sustentada por um tripé, uma placa de aquisição Symphonie, um amplificador e o software dBbati32.



Figura 5.3 - Equipamentos utilizados durante o ensaio, da esquerda para a direita Fonte sonora omnidirecional, Microfone, Symphonie

## 5.3 Metodologia

A Norma utilizada durante a modelação laboratorial preliminar foi a *ISO 354:2007 Medição da Absorção Sonora em Câmara Reverberante*. O propósito desta Norma é a especificação da medição do coeficiente de absorção sonora de materiais que são utilizados no tratamento de paredes, tetos ou absorção sonora de objetos. Com os dados obtidos é possível realizar estudos para projetos referentes a condicionamento acústico e controle de ruído.

O ensaio laboratorial preliminar se deu dentro da Câmara Reverberante do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, que possui um volume de 111 m<sup>3</sup> e se encontra preparada de forma a apresentar um campo sonoro suficientemente difuso.

Primeiramente, foi realizada a montagem do protótipo correspondente à Configuração 1, seguindo o Anexo B, *B.2 Montagem Tipo A* da Norma ISO 354:2007. Segundo esta norma, os protótipos devem ser colocados diretamente sobre uma superfície da câmara, especificamente

sobre o pavimento, no entanto, para a presente campanha experimental, verificou-se a necessidade de realizar todos os ensaios montando os protótipos sobre uma plataforma giratória instalada no pavimento na câmara reverberante.

Outro ponto que a norma recomenda a respeito sobre a montagem do protótipo é que caso haja algum material de colagem ou fecho mecânico este deve ser informado sua localização, e que caso exista estes não podem deixar qualquer espaço de ar por detrás do protótipo. Neste caso as placas estão presas umas às outras com a utilização de fita adesiva em toda a extensão do encontro entre as placas.

No que se referente à fonte sonora, foram consideradas duas posições de uma mesma fonte, o procedimento foi realizado como um espaçamento mínimo de 3 m entre uma posição e outra, como a norma indica.

Em relação às posições do microfone, estes foram colocados em três posições para cada posição de fonte. A distância entre o microfone e as faces da câmara e do protótipo foi de 1 m, enquanto que a distância entre microfones foi de no mínimo 3 m, e o mesmo se deu em relação microfone e a fonte. Após a sua montagem foi realizada a calibração do microfone.

Para a coleta dos dados referentes ao Tempo de Reverberação foi utilizado o método do ruído interrompido. Este método se utiliza de um processo estatístico, onde é preciso fazer o cálculo de várias curvas de decaimento para posterior realização de média. É necessário considerar várias posições de fonte e microfone a fim de se obter um valor mais representativo. A fonte sonora é manualmente ligada e desligada, e como consta na norma o sinal de excitação deve ser suficientemente longo para a produzir níveis sonoros constantes nas várias frequências antes de ser interrompido.

Em cada canto da sala foi demarcado um ponto onde a posição do microfone foi variada três vezes enquanto a fonte sonora foi mudada duas vezes. Cada ponto em que o microfone foi colocado foram realizadas três medições simplesmente ligando a fonte e interrompendo após alguns segundos; durante o procedimento os dados foram processados em tempo real no software dBBA Ti32. Esse procedimento se deu em todas as posições de microfone para as duas posições de fonte sonora. Com isso foram obtidas 18 curvas de decaimento, considerando as duas posições de fonte sonora.

Após a finalização da coleta de dados para a Configuração 1, a estrutura foi remodelada a fim de obter as características da Configuração 2, a forma de montagem e de coleta de dados foi exatamente a mesma. Esta também gerou 18 curvas de decaimentos, sendo 9 para a posição de fonte 1 e 9 para a posição de fonte 2.

Com o término do ensaio das duas configurações, realizou-se o ensaio com a Câmara Reverberante vazia, repetindo dessa maneira o mesmo procedimento realizado com os protótipos. Este ensaio levou em consideração a existência da plataforma circular abaixo dos

protótipos, isso deu-se pela impossibilidade da retirada desta. A plataforma foi considerada tanto na sala vazia quanto na sala com o protótipo, dessa maneira o efeito da estrutura nos dados coletados foi minimizado.



Figura 5.4 - Sala vazia

#### 5.4 Tratamento dos Dados

Finalizada a coleta de dados das duas configurações da estrutura mais a sala vazia são então realizados os cálculos. Primeiramente, para o cálculo dos Tempos de Reverberação é necessário fazer uma média aritmética do número total de medições em cada banda de frequência, o que é feito para cada situação de forma independente. A respeito das frequências levadas em consideração, segundo a norma de ensaio a gama de frequências de medição é feita para as bandas de um terço de oitava, no entanto durante a análise foi verificada uma instabilidade dos valores abaixo de 200 Hz, por isso os valores que foram tratados estão entre 200Hz a 5000Hz.

Para fins de entendimento, consideremos  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  sendo respectivamente, tempo de reverberação médio sala vazia, tempo de reverberação com protótipo com a configuração 1 e tempo de reverberação com a configuração 2. Nos *Quadros 5.1 e 5.2 – Tempo de reverberação, fonte 1 e fonte 2 respectivamente* se encontram as médias para cada fonte sonora referente a todas as situações estudadas.

Quadro 5.1 - Tempo de Reverberação média correspondente a Fonte 1

TEMPO DE REVERBERAÇÃO (s) - FONTE 1 - MÉDIA			
FREQUÊNCIA (Hz)	T1 - SALA VAZIA	T2 - CONFIGURAÇÃO 1	T3 - CONFIGURAÇÃO 2
200	6,44	5,84	4,89
250	4,88	5,13	4,58
315	5,50	4,68	4,32
400	6,40	4,55	4,28
500	5,21	5,05	3,92
630	4,64	4,04	3,77
800	3,89	3,97	3,42
1000	4,08	3,35	3,27
1250	3,69	3,37	3,16
1600	3,23	2,91	2,96
2000	2,72	2,48	2,55
2500	2,36	2,10	2,18
3150	1,98	1,78	1,84
4000	1,66	1,52	1,51
5000	1,35	1,22	1,27

Quadro 5.2 - Tempo de Reverberação média correspondente a Fonte 2

TEMPO DE REVERBERAÇÃO (s) - FONTE 2 - MÉDIA			
FREQUÊNCIA (Hz)	T1 - SALA VAZIA	T2 - CONFIGURAÇÃO 1	T3 - CONFIGURAÇÃO 2
200	6,46	4,48	5,90
250	5,85	4,36	4,23
315	5,86	3,98	4,09
400	5,87	3,92	3,71
500	4,83	3,70	3,98
630	4,64	3,81	3,87
800	4,30	3,42	3,41
1000	3,98	3,28	3,40
1250	3,58	3,00	3,05
1600	3,24	2,84	2,88
2000	2,82	2,43	2,45
2500	2,37	2,09	2,11
3150	1,98	1,77	1,82
4000	1,66	1,49	1,54
5000	1,35	1,23	1,25

Foi calculada também uma média entre as duas posições de fonte a fim de deixar o valor mais expressivo, segue o *Quadro 5.3 – Tempo de Reverberação médio*.

Quadro 5.2 - Tempo de Reverberação média

TEMPO DE REVERBERAÇÃO (s) - MÉDIA			
FREQÜÊNCIA (Hz)	T1 - SALA VAZIA	T2 - CONFIGURAÇÃO 1	T3 - CONFIGURAÇÃO 2
200	6,45	5,16	5,40
250	5,37	4,75	4,41
315	5,68	4,33	4,20
400	6,13	4,24	3,99
500	5,02	4,38	3,95
630	4,64	3,92	3,82
800	4,09	3,70	3,42
1000	4,03	3,32	3,33
1250	3,63	3,19	3,10
1600	3,24	2,88	2,92
2000	2,77	2,46	2,50
2500	2,37	2,09	2,14
3150	1,98	1,77	1,83
4000	1,66	1,50	1,53
5000	1,35	1,23	1,26

Após a realização de todas as médias, foi criado um gráfico com a intenção de ser mais fácil analisar os valores obtidos. Como pode ser visto na Figura 5.5 – *Tempo reverberação médio em cada configuração*, há uma pequena diferença no tempo de reverberação entre as duas configurações nas baixas e médias frequências, esta pequena diferença pode ser devido ao fato de ter sido utilizado de uma área reduzida do protótipo, e o fato da angulação não ter sido grande o suficiente para gerar um impacto na estrutura. Outra consideração a fazer é que a Configuração 1 possui maior área do que a Configuração 2, isto se deu ao limite de espaço disponível devido a plataforma giratória que se encontrava dentro da câmara reverberante.

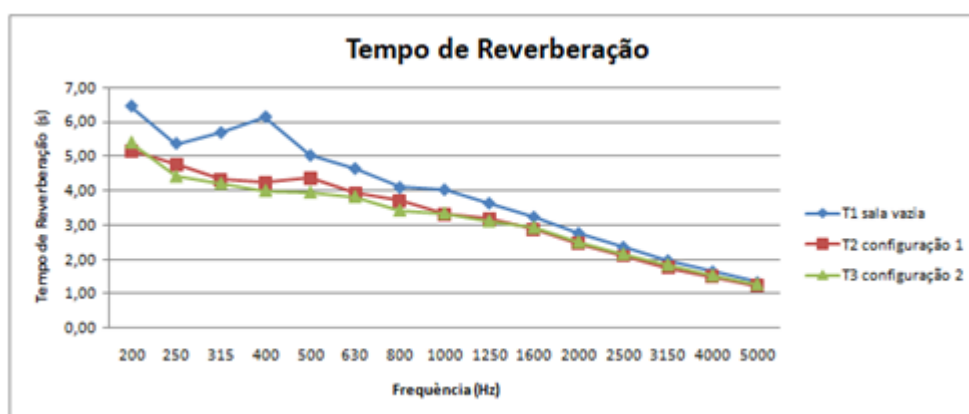


Figura 5.5 - Tempo de Reverberação

Para o cálculo da área de absorção sonora equivalente é utilizada a seguinte equação da norma:

$$A_1 = \frac{55,3 V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad (10)$$

onde:

$V$  é o volume da câmara reverberante vazia, em  $m^3$

$c$  é a velocidade de propagação do som no ar, em  $m/s$

$T_1$  é o tempo de reverberação da câmara vazia, em  $s$

$m_1$  é o coeficiente de atenuação devido à presença de ar, em metros recíprocos, calculado de acordo com a ISO 9613-1

Para a análise das áreas equivalentes das Configurações 1 e 2 é utilizada a mesma Equação 11:

$$A_2 = \frac{55,3 V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad (11)$$

Foi considerada uma simplificação devido ao fato dos ensaios ocorrerem todos no mesmo dia em um curto período de tempo. Por esse motivo, as condições que são influenciadas pela temperatura e humidade são canceladas.

Para se obter enfim o valor correspondente da Área de Absorção Sonora Equivalente em cada uma das configurações foi utilizada a equação 12:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3 V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) \quad (12)$$

A *Quadro 5.4 – Área de absorção sonora equivalente* contém os resultados do cálculo para cada configuração, lembrando que o volume da câmara reverberante considerado é de  $111 m^3$ , e os cálculos foram feitos entre a sala vazia e cada situação proposta.

Quadro 5.4 - Absorção sonora equivalente

ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE			
FREQUÊNCIA (Hz)	SALA VAZIA	Área de absorção	Área de absorção
		equivalente Configuração 1	equivalente Configuração 2
200	6,45	0,70	0,55
250	5,37	0,44	0,73
315	5,68	0,99	1,12
400	6,13	1,32	1,58
500	5,02	0,53	0,98
630	4,64	0,71	0,84
800	4,09	0,47	0,87
1000	4,03	0,96	0,93
1250	3,63	0,70	0,85
1600	3,24	0,70	0,61
2000	2,77	0,83	0,70
2500	2,37	1,00	0,79
3150	1,98	1,07	0,74
4000	1,66	1,11	0,94
5000	1,35	1,28	0,89

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora  $\alpha_s$  do conjunto de painéis distribuídos de forma regular, é utilizada a Equação 13:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (13)$$

onde:

$A_T$  corresponde à área de absorção sonora equivalente para cada protótipo, em  $m^2$ ;

$S$  é a área, em  $m^2$ , do protótipo de ensaio, este corresponde à área do pavimento revestida pelo protótipo de ensaio.

No caso da Configuração 1, a área do protótipo de ensaio corresponde a  $2,52 m^2$  enquanto na Configuração 2 a área do protótipo de ensaio corresponde a  $2,16 m^2$ . No Quadro 5.5 – *Coefficiente de absorção sonora* constam os valores obtidos referentes ao coeficiente de absorção sonora para as duas configurações estudadas.



Quadro 5.5 - Coeficiente de absorção sonora

COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA		
FREQUÊNCIA (Hz)	Coeficiente de absorção sonora Configuração 1	Coeficiente de absorção sonora Configuração 2
200	0,28	0,25
250	0,17	0,34
315	0,39	0,52
400	0,52	0,73
500	0,21	0,45
630	0,28	0,39
800	0,19	0,40
1000	0,38	0,43
1250	0,28	0,39
1600	0,28	0,28
2000	0,33	0,33
2500	0,40	0,37
3150	0,42	0,34
4000	0,44	0,43
5000	0,51	0,41

Por fim, foi realizado a Figura 5.6 - *Coeficiente de Absorção Sonora*, sendo possível observar que nas baixas e médias frequências é onde ocorre uma maior diferença na absorção; o que se deve ao fato da Configuração 2 a área dos material absorvente ser maior quando comparado com a Configuração 1. Com base nos resultados, os coeficientes de absorção variaram entre 0,1 e 0,25.

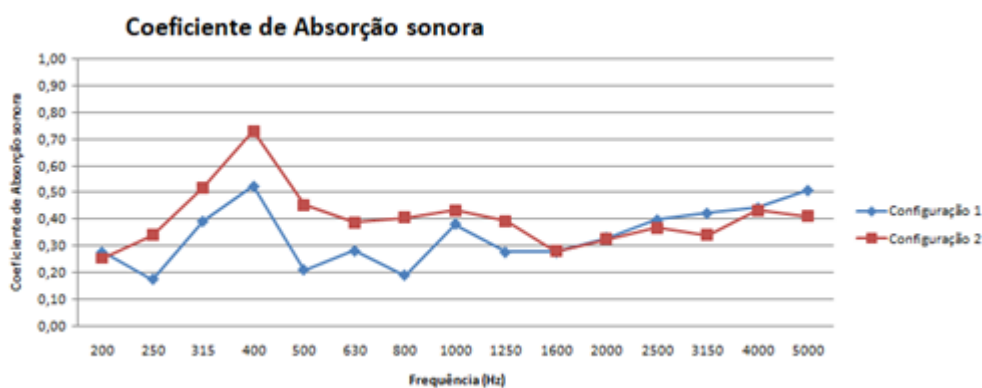


Figura 5.6 - Coeficiente de Absorção sonora, Configuração 1 e 2

Deve-se levar em conta que este é apenas um estudo preliminar, em um segundo momento seria interessante conseguir realizar os ensaios utilizando uma maior área para os protótipos e analisar outras configurações angulares.

## 6 CONCLUSÃO

Nesta dissertação procurou-se realizar um estudo preliminar de uma possível solução de acústica variável com possibilidade de ajuste em função do tipo de utilização do espaço onde está aplicada. Realizaram-se simulações numéricas sobre o conceito de estrutura desenvolvida, construiu-se e testou-se um protótipo laboratorial.

Levando em consideração os aspectos analisados, tanto nas simulações numéricas quanto nas análises laboratoriais, é possível compreender que há uma ampla gama de aplicações da geometria estudada. No caso das análises de simulação numérica, é possível perceber que há uma alteração significativa dos valores de Tempo de Reverberação e Absorção Sonora entre o cenário de sala vazia e os cenários utilizando as diferentes configurações da estrutura ajustável. As características geométricas e acústicas utilizadas durante a simulação foram de duas disposições que representassem o interior de uma sala de reuniões e uma sala de aulas, ambas hipotéticas. A simulação foi realizada levando em consideração o pior cenário para a característica acústica dos ambientes em relação ao tempo de reverberação, visto que as faces internas das salas eram superfícies refletoras, enquanto apenas as cadeiras e a estrutura estudada eram superfícies absorventes.

A análise numérica investigou um conjunto significativo de parâmetros relacionados com as diferentes configurações da estrutura em estudo; todavia, os parâmetros mais significativos para uma compreensão preliminar do comportamento acústico desta estrutura, são o Tempo de Reverberação e a Absorção Sonora, visto que estas características são fundamentais para projetos de acústica, pois as normas aplicáveis ao conforto de ambientes, estipulam valores mínimos de Tempo de Reverberação.

O modelo gerou dados de Tempo de Reverberação e de Absorção nas frequências de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz, sendo que a configuração “Sala Vazia” foi utilizada como parâmetro para comparação posterior do desempenho das estruturas de acústica variável estudadas. Nos casos relacionados, a absorção da estrutura plana com painéis absorvente mostrou proporcionar uma mais elevada área de absorção em termos absolutos, tanto na sala de reuniões quanto na sala de aulas; porém a estrutura Triangular apresentada dá ao ambiente um menor tempo de reverberação. Esses resultados mostram que a estrutura ajustável pode prover diferentes comportamentos ao ambiente, mudando sua configuração e as características acústicas de suas superfícies.

Na parte de ensaio laboratorial, a questão principal foi entender melhor as propriedades acústicas que a estrutura ajustável pode proporcionar. Foram ensaiadas duas configurações triangulares, sendo que estas mostraram pouca diferença em relação ao tempo de reverberação, enquanto que, no coeficiente de absorção sonora, foi notada uma variação maior nas baixas e médias frequências. Seria ainda necessário realizar mais ensaios com outros tipos de angulações e também com o painel na configuração plana, para se ter uma maior sensibilidade em relação às diferentes possibilidades de configurações, visando uma futura

otimização em função do propósito acústico em cada situação que fosse colocada. Neste momento do estudo, em relação ao ensaio laboratorial, o interesse é que a estrutura desempenhe o maior número possível de tempos de reverberação e absorção sonora, apenas variando a disposição dos painéis.

Portanto, este estudo é o primeiro passo fundamental para um posterior desenvolvimento de uma nova solução de acústica variável, porém visando sua incorporação a uma crescente geração de edificações inteligentes de multi-propósito, em que os dados coletados em tempo real levarão a otimização dos espaços e o melhoramento do conforto ambiental para seus ocupantes, trazendo desta maneira maior produtividade, maior concentração, melhor inteligibilidade e um aumento em sua qualidade de vida.

## 6.1 Estudos Futuros

Como foi visto anteriormente, em uma mesma situação as diferentes configurações da estrutura possibilitaram comportamentos variados em termos globais, isso mostra que futuros desenvolvimentos podem ser realizados. Alguns desenvolvimentos possíveis são a inclusão de micro controladores e pistões hidráulicos para que o usuário pudesse selecionar o propósito da sala e a estrutura ajustar-se de maneira otimizada de acordo com posições pré-programadas, além disso pode-se acoplar sensores de posicionamento para realizar o *tracking* do orador, para que a estrutura pudesse adquirir comportamento dinâmico, mudando suas configurações em tempo real para maximizar a qualidade e compreensão acústica no ambiente em função da fonte sonora. No que concerne ao material em si, como a estrutura plana nas simulações apresentou uma boa absorção, porém manteve um valor inferior no tempo de reverberação, talvez a combinação da estrutura triangular com diferentes tipos de ranhura nas placas e com diferentes tipos de conjuntos de materiais, pudessem alterar sua característica também no que diz respeito a absorção sonora, fazendo com que a estrutura triangular pudesse apresentar valores ótimos nos dois parâmetros principais. Outro ponto interessante que pode gerar estudos posteriores é a correlação do ângulo entre as placas e os dois fatores Tempo de Reverberação e Absorção Sonora, visto que a referência (Yang, 2017) conseguiu diferentes valores de absorção com placas planas, entretanto apenas alterando angulações entre elas.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aretz, M., and Orłowski, R. (2009). "Sound strength and reverberation time in small concert halls". *Applied Acoustics*, 70(8), 1099-1110.

Bahl, P., and Padmanabhan, V. N. (2000). "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system". In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE (Vol. 2, pp. 775-784)*. Ieee.

Barron, M. (2009). "Auditorium acoustics and architectural design". Routledge.

Cox, T. J., and D'antonio, P. (2009). "Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application". Crc Press.

Custódio, M. F., e Gerges, S. N. "Qualidade sonora através de ensaios experimentais em centros de convenções multiuso".

Custom Audio Designs. RPG B.A.D. Panel diffuser  
<http://www.customaudiodesigns.co.uk/rpg-bad-panel-diffuser.htm>

da Silva, P. M. (1978). "Acústica de edifícios" LNEC, Lisboa, Março de..

De Koning, S. H. (1983). "The MCR system-Multiple channel amplification of reverberation". *Philips Tech. Rev.*, 41(1), 12-23

Domingues, O. (2005). A acústica nos edifícios: materiais e sistemas absorventes sonoros: coeficientes de absorção sonora. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Egan, M. D., Quirt, J. D., and Rousseau, M. Z. (1989). "Architectural acoustics".

Ginn, K. B. (1978). "Architectural acoustics." Brüel & Kjaer.

Hussein, M , Muarat, N.F., Hamzah,R.I.R., Ahmad, Z. A., Mohamed, M., Zain, M. Z. M and Isa, N.M.(2015) "Acougamic: Dynamic Acoustical Control". *Recent Advances in Applied and Theoretica Mechanics*

IEC 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index Equipments

Isbert, A. C. (1998). "Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Vol. 4). Univ. Politèc. de Catalunya".

- Jordan, V. L. (1970). "Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 47(2A), 408-412.
- Kulowski, A. (1985). "Algorithmic representation of the ray tracing technique". *Applied Acoustics*, 18(6), 449-469.
- Kuttruff, H. (2016). "Room acoustics". Crc Press.
- Long, M. (2005). "Architectural acoustics". Elsevier.
- Maekawa, Z., Lord, P., and Rindel, J. H. (2011). "Environmental and architectural acoustics" (pp. 136-140). London: Spon Press.
- Mareze, P. H. (2013). "Análise da influência da microgeometria na absorção sonora de materiais porosos de estrutura rígida". Universidade Federal de Santa Catarina, 2013
- Marshall, L. G. (1994). "An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(4), 2251-2261.
- Muarat, N.F., Hussein, M., Hamzah, R.I.R., Ahmad, Z. A., Mohamed, M., Zain, M. Z. M and Isa, N.M.. "Experimental Investigation on the Effect of Origami Geometry on the Acoustic Characteristics". *Manufacturing Engineering, Automation Controls and Robotic*. World Scientific and Engineering Academy and Society (2014) 93-97.
- NP EN ISO 3225/1:1986 – "Acústica. Vocabulário. Parte: Definições Gerais"
- NP EN ISO 3382-1:2008 – "Medição de parametros de acustica de salas parte 1"
- NP EN ISO 354: 2007 – "Medição de absorção sonora em câmara reverberante"
- Olatte, C. I., and Hermosilla, A. H. (2017). "Prototipo acústico adaptable. Para espacios multifuncionales". *rita\_revista indexada de textos académicos*, (7), 160-167.
- Parkin, P. H., and Morgan, K. (1965). "Assisted resonance" in the Royal Festival Hall, London. *Journal of sound and vibration*, 2(1), 74-85.
- Rathsam, J., and Wang, L. M. (2006). "A Review of Diffuse Reflections in Architectural Acoustics". In *Building Integration Solutions* (pp. 1-7).
- Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) - Decreto - Lei n.º 96 - Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. (2008).
- Simões, G., Patrício, J., and Faria, P. (2014). "Preliminary study of the acoustic behavior concerning an innovative prototype for indoor modular partitioning".
- Tabela de Coeficientes de absorção sonora – LACAM Laboratório de Controle Ambiental

Departamento de Tecnologia – FAU / UnB – Março 2006 -  
<https://pt.scribd.com/doc/315100066/Tabela-de-Coefficientes-de-Absorcao-Sonora>

Thün, G., Velikov, K., Sauvé, L., and McGee, W. (2012). “Design Ecologies for Responsive Environments: Resonant Chamber, an Acoustically Performative System”. In Synthetic Digital Ecologies: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (pp. 373-382).

Vorländer, M. (2007). “Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality”. Springer Science & Business Media.

Yang, X.(2017) Adaptive Acoustic Origami. The University of Melbourne

Yokota, T., Sakamoto, S., and Tachibana, H. (2002). “Visualization of sound propagation and scattering in rooms”. Acoustical science and technology, 23 (1), 40-46.

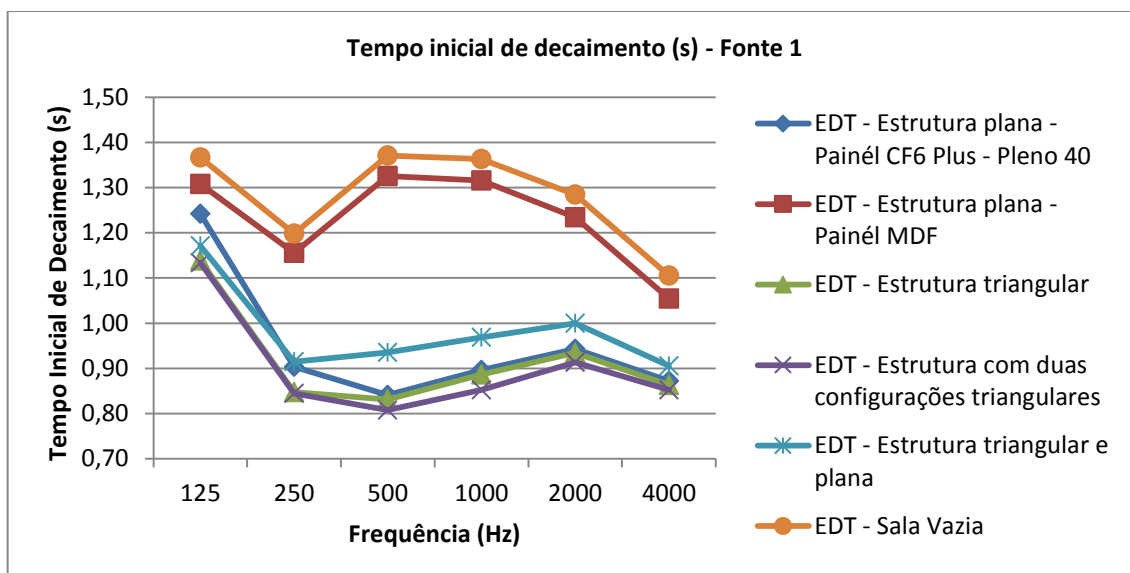
RPG® - BAD - Binary Amplitude Diffisorbor™  
<http://www.rpgeurope.com/products/product/bad.html>

Badagavi, P., Pai, V., and Chinta, A. (2017, May). “Use of Origami in Space Science and various other fields of science”. In Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), 2017 2nd IEEE International Conference on (pp. 628-632). IEEE.

## ANEXO A

### Sala de sala

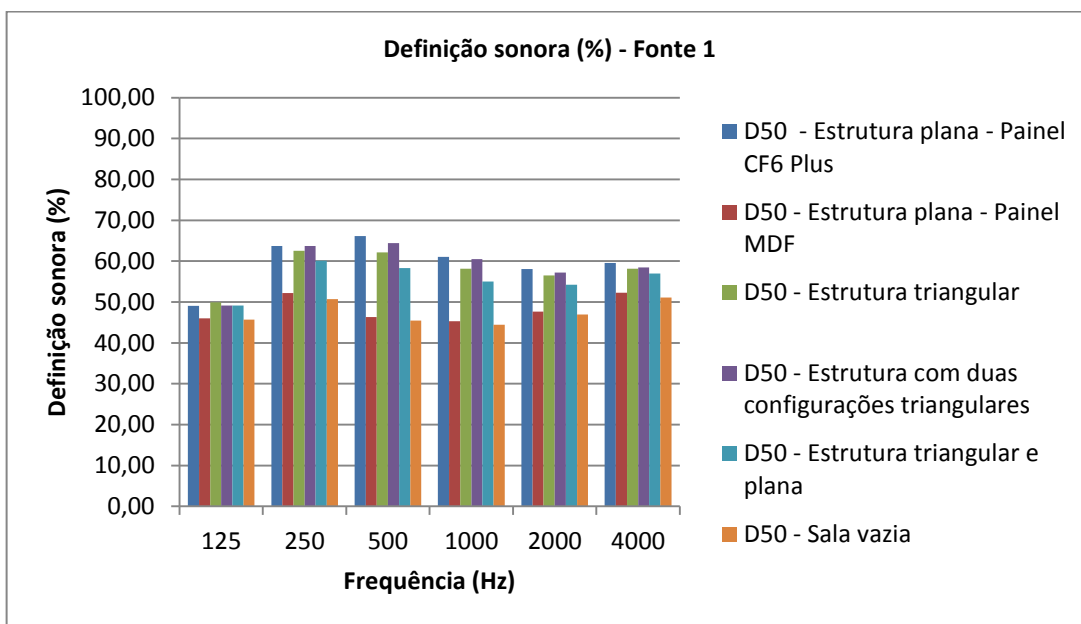
#### Tempo de Reverberação Mais Curto – EDT



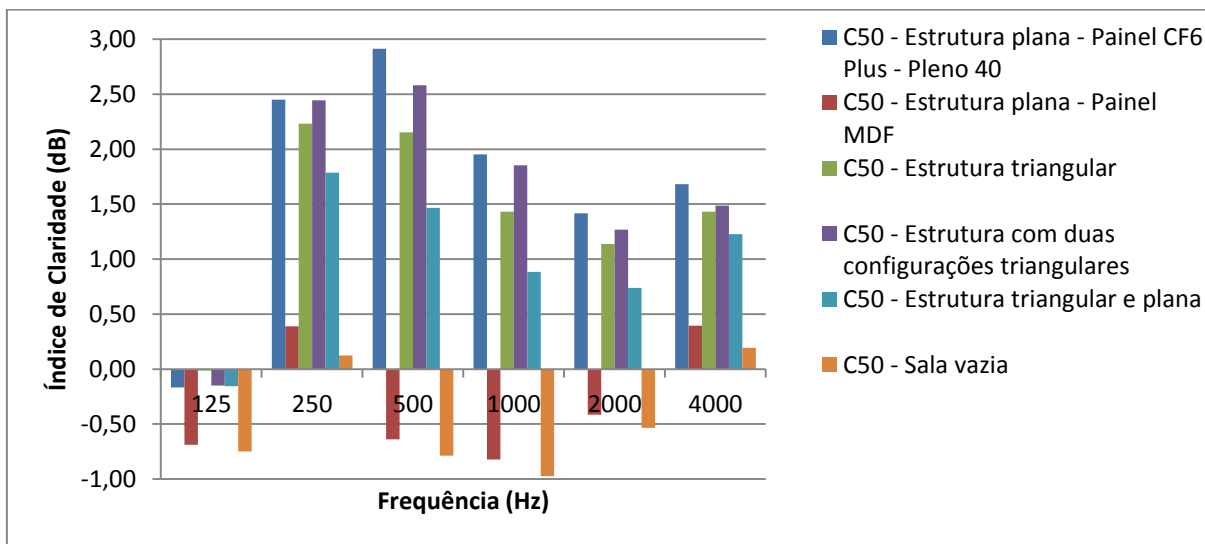
Configuração - Fonte 0	STI - média 500;2000Hz								
	Receptor 0	Receptor 1	Receptor 2	Receptor 3	Receptor 4	Receptor 5	Receptor 6	Receptor 7	Receptor 8
Estrutura plana - Painel CF6 Plus - Pleno 40	0,61	0,61	0,61	0,63	0,63	0,61	0,62	0,62	0,60
Estrutura plana - Painel MDF	0,53	0,53	0,54	0,54	0,54	0,55	0,53	0,52	0,54
Estrutura triangular	0,61	0,60	0,61	0,61	0,60	0,61	0,62	0,60	0,62
Estrutura com duas configurações triangulares	0,61	0,61	0,62	0,63	0,62	0,62	0,62	0,60	0,62
Estrutura triangular e plana	0,59	0,58	0,58	0,61	0,58	0,59	0,60	0,58	0,61
Sala vazia	0,53	0,52	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,55	0,53

Configuração - Fonte 0	STI - 500Hz ; 2000Hz	Avaliação subjetiva
Estrutura plana - Painel CF6 Plus - Pleno 40	0,61	Boa
Estrutura plana - Painel MDF	0,53	Aceitável
Estrutura triangular	0,61	Boa
Estrutura com duas configurações triangulares	0,61	Boa
Estrutura triangular e plana	0,59	Aceitável
Sala vazia	0,53	Aceitável

### Definição - D50



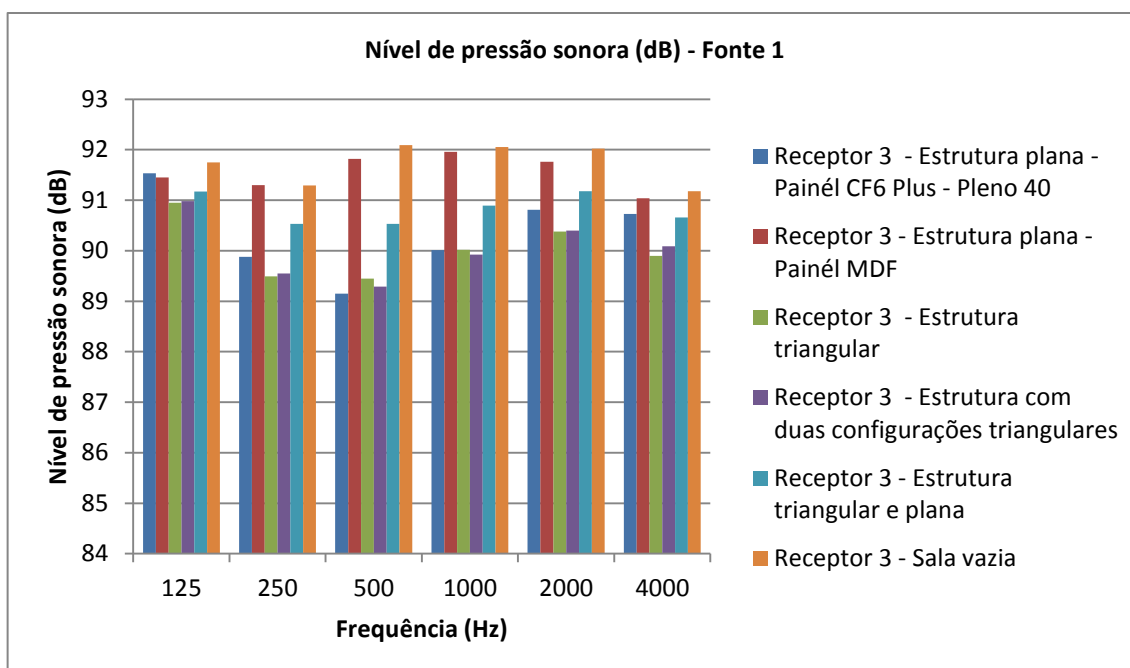
### Índice de Claridade - C50

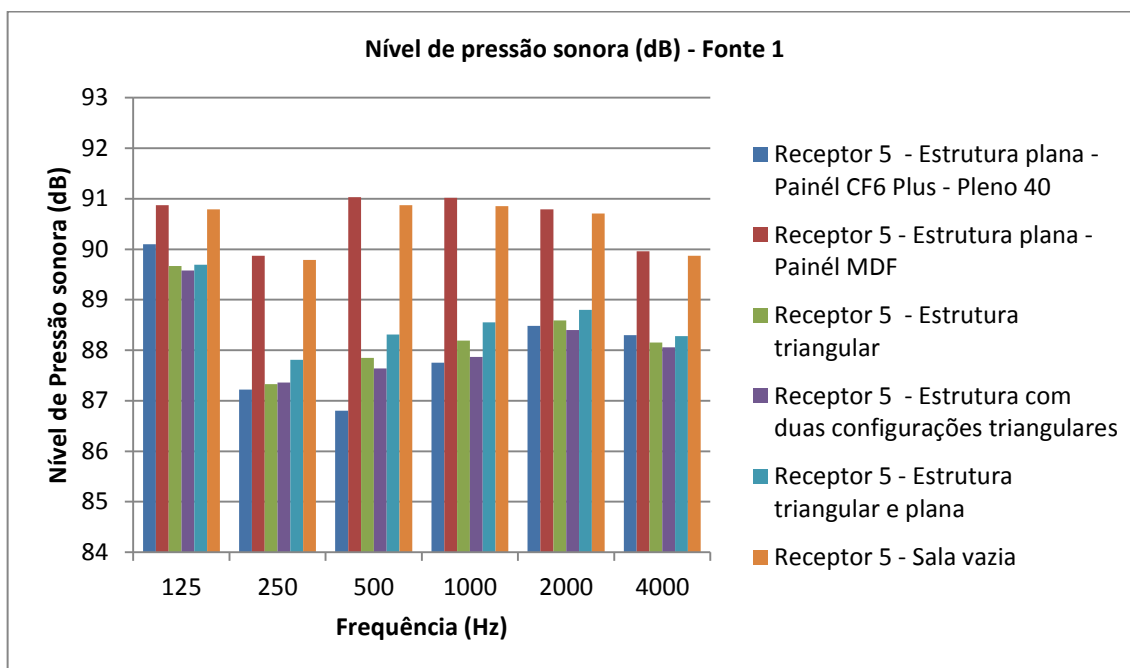




Configurações	C50 dB(500Hz a 4000Hz)
Estrutura plana - painel CF6 Plus - Pleno 40	1,8
Estrutura plana - Painel MDF	-0,3
Estrutura triangular	1,4
Estrutura com duas configurações triangulares	1,7
Estrutura triangular e plana	1,0
Sala vazia	-0,5

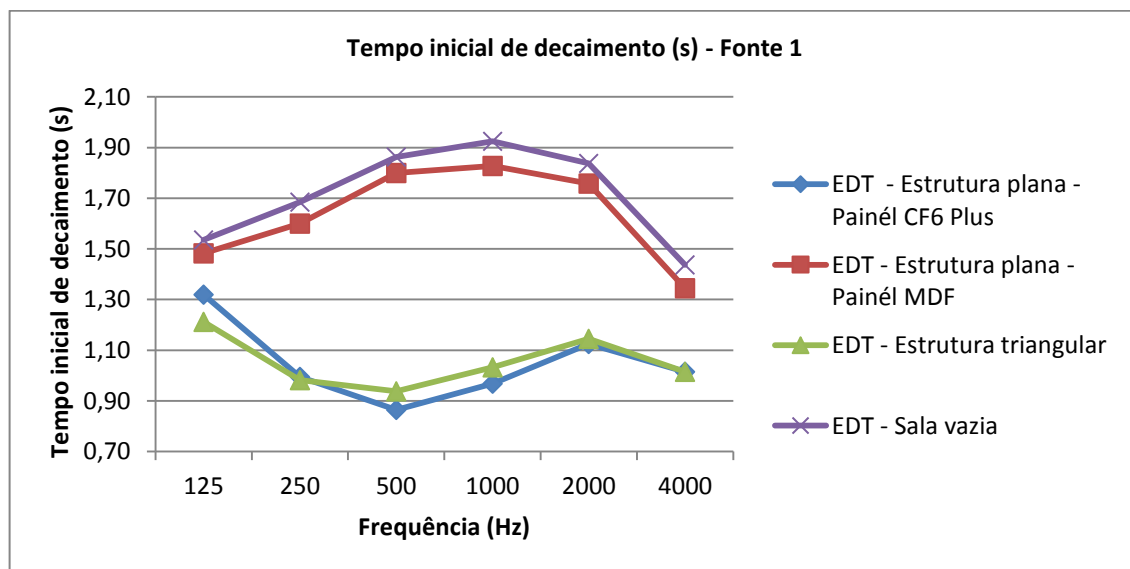
## Níveis de pressão sonora – SPL





## Sala de reunião

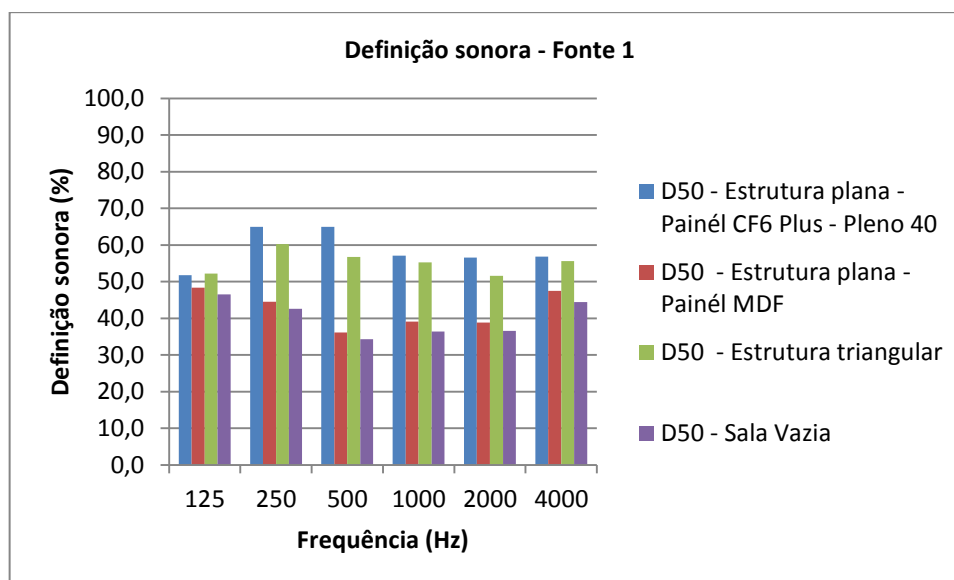
### Tempo de Reverberação Mais Curto – EDT



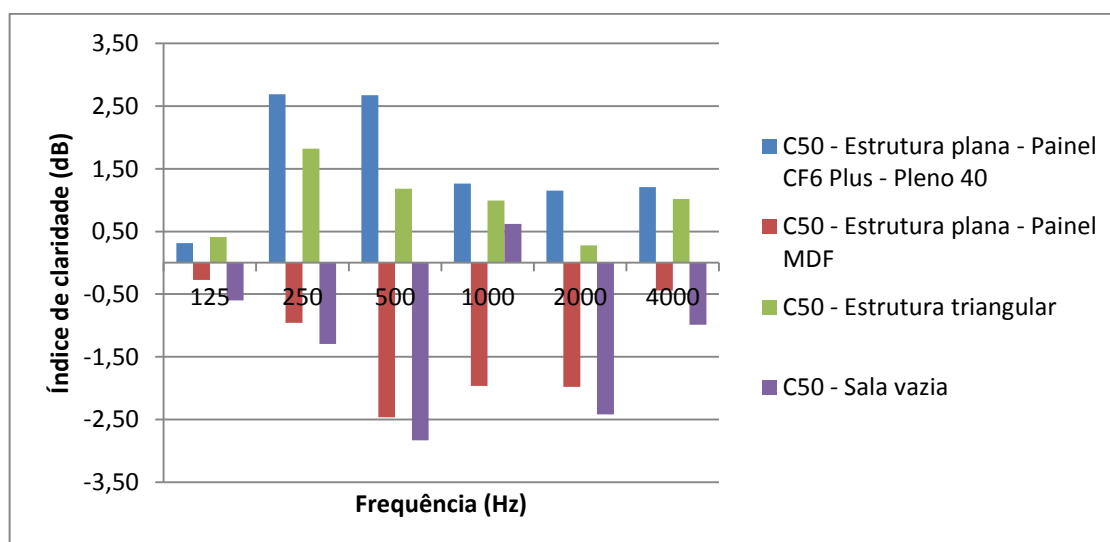
## Índice de Transmissão da Linguagem – STI

Configuração - Fonte 0	STI - média 500;2000Hz				STI - 500Hz ; 2000Hz	Avaliação subjetiva
	Receptor 0	Receptor 1	Receptor 2	Receptor 3		
Estrutura plana - Painel CF6 Plus - Pleno 40	0,60	0,60	0,60	0,59	0,60	Boa
Estrutura plana - Painel MDF	0,47	0,46	0,49	0,48	0,47	Aceitável
Estrutura triangular	0,57	0,58	0,60	0,57	0,58	Aceitável
Sala vazia	0,46	0,45	0,47	0,47	0,46	Aceitável

## Definição - D50



## Índice de Claridade - C50



Configuração - Fonte 1	C50 dB(500Hz a 4000Hz)
Estrutura plana - Painei CF6 Plus - Pleno 40	1,4
Estrutura plana - Painei MDF	-1,7
Estrutura triangular	0,8
Sala vazia	-1,4

## Níveis de pressão sonora – SPL

