



**Pró-Reitoria de Graduação
Curso de Física
Trabalho de Conclusão de Curso**

**CONFORTO ACÚSTICO EM TEMPLOS RELIGIOSOS:
UM ESTUDO DE CASO**

**Autor: Carlos Eduardo da Costa Gonçalves
Orientador: Dr. Sérgio Luiz Garavelli**

**Brasília - DF
2010**

Carlos Eduardo da Costa Gonçalves

Conforto Acústico em Templos Religiosos: Um Estudo de Caso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do Grau de Licenciado em Física pela Universidade Católica de Brasília.

Orientador:
Dr. Sérgio Luiz Garavelli

BRASÍLIA – DF

2010

CONFORTO ACÚSTICO EM TEMPLOS RELIGIOSOS: UM ESTUDO DE CASO

Resumo

Esse trabalho tem o objetivo de propor um projeto de melhoria acústica para um templo religioso, de forma que parâmetros acústicos como tempo de reverberação, inteligibilidade, clareza, claridade se adequem às condições de conforto acústico. Foram realizadas medidas do tempo de reverberação, intensidade sonora e ruído de fundo em um templo religioso. Um projeto de melhoria acústica e de eletroacústica foi realizado, com a sugestão de aplicação de alguns materiais para reduzir o tempo de reverberação e o correto posicionamento das caixas acústicas.

Palavras Chave: Acústica, Eletroacústica, Reverberação, Inteligibilidade

1 Introdução

1.1 Poluição Sonora

A vida moderna traz mais uma preocupação para as lideranças de igrejas: o nível de pressão sonora gerado pelos templos religiosos, não é raro encontrar reclamações de vizinhos insatisfeitos com esse tipo de contaminação ambiente gerados pelos templos.

Garavelli e Alves (2006) mostraram que boa parte das igrejas geram ruídos acima do permitido pela legislação. Além dos males que a poluição sonora pode causar nos frequentadores da igreja e nos vizinhos, há também o risco de prejuízo financeiro para a igreja, com a aplicação de multas.

Estudos realizados na Austrália (AES, 2006) mostram que a exposição a altos níveis de intensidade sonora pode antecipar problemas de audição. Jovens que são expostos a níveis de intensidade sonora podem apresentar aos 30 anos de idade problemas de audição que normalmente são encontrados em pessoas com 75 anos.

No Brasil, a NR 15 em seu anexo nº 1 (BRASIL, 2008) estabelece o tempo máximo de exposição diária permissível a um certo nível de intensidade sonora. A um nível de 85 dB (A) esse limite é de 8 horas, enquanto a 105 dB (A), o tempo máximo é de apenas 30 minutos.

1.1.1 Legislação

Pereira Júnior (2002) traz um resumo da legislação aplicada ao controle de ruído, no âmbito federal. No Distrito Federal, a lei 4092/2008 aborda o controle de poluição sonora e estabelece níveis máximos de intensidade sonora (DISTRITO FEDERAL, 2008). Essa lei estabelece

que os métodos de medições devem ser realizadas de acordo com a NBR 10.151 (ABNT, 2000). Os anexos I e II da referida lei trazem os níveis máximos de exposição, medidos pela curva de ponderação A, para ambientes externos e internos.

1.2 Conforto Acústico

Em relação aos parâmetros para conforto acústico, não há leis ou normas definindo os valores que devem ser encontrados. Apenas instruções de como realizar medidas ou cálculos e valores recomendáveis para uma certa situação. A preocupação com tais parâmetros fica restrita a grandes projetos.

Em geral, os templos religiosos tem um tempo de reverberação alto, o que prejudica diretamente a inteligibilidade naquele local. Por muitas vezes, para tentar compensar a inteligibilidade baixa, aumenta-se o volume, piorando ainda mais a situação (RANGEL, 2009).

Um projeto de acústica adequado ajuda a reduzir a pressão sonora gerada pelos membros das igrejas. Se os frequentadores conseguem entender com clareza o que está sendo falado ou cantado, a necessidade de intensidade sonora dentro da igreja será menor.

1.3 O trabalho

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é elaborar uma proposta de melhoria acústica para um templo religioso, de forma que os parâmetros acústicos, em especial o tempo de reverberação e a inteligibilidade, estejam de acordo as recomendações apresentadas em ABNT (2002) e Valle (2007).

1.3.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos deverão ser investigados. São eles:

- Medir o tempo de reverberação;
- Calcular o coeficiente de absorção com as medidas de TR_{60} do local;
- Calcular a clareza e claridade;
- Calcular a inteligibilidade;

- Avaliar diferentes materiais para absorção acústica;
- Estimar o tempo de reverberação e outros parâmetros acústicos com as melhorias propostas.

1.3.3 Organização deste trabalho

No capítulo 2 é feita uma revisão dos conceitos de acústica. No capítulo 3 é descrita a metodologia do trabalho. No capítulo 4 os resultados são discutidos. Encerra-se com uma conclusão no capítulo 5.

2 Teoria

2.1 Ondas Sonoras

Uma onda sonora é a vibração de moléculas de ar, causando variações de pressão (TIPLER, 2000). Assim como qualquer tipo de onda, uma onda sonora possui frequência e um comprimento de onda. A velocidade de propagação de uma onda é o produto entre a frequência e o comprimento de onda:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

O ouvido humano é sensível a sons de frequência entre 20 Hz e 20 kHz (OLIVEIRA, 2008). Algumas pessoas possuem audição limitada nas frequências mais altas do espectro sonoro.

2.2 Intensidade Sonora

A intensidade sonora é a potência média por unidade de área perpendicular à direção de propagação (TIPLER, 2000). É calculada por

$$I = \frac{P_{med}}{A} \quad (2.2)$$

O ouvido humano é capaz de perceber sons com intensidade de $10^{-12}W/m^2$ (limiar de audibilidade) a $1W/m^2$ (limiar de audição dolorosa).

2.3 Decibels

Em acústica, quando se fala de decibels geralmente estamos falando do nível de intensidade sonora. O Decibel é um décimo de Bel, unidade de comparação entre duas medidas de mesma grandeza. É definida por:

$$I_{dB} = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (2.3)$$

Onde I_0 é a intensidade de referência. Definindo I_0 como o limiar de audibilidade, temos que a menor intensidade sonora audível pelo ouvido humano é de 0 dB, e o limiar de audição dolorosa 120 dB.

2.4 Curvas de Ponderação

O ouvido humano não possui a mesma sensibilidade para as diferentes frequências do espectro sonoro da mesma maneira. Sons de baixa frequência precisam de mais energia para serem percebidos com a mesma intensidade do que sons mais agudos.

A figura 2.1 mostra o “nível de intensidade contra a frequência de sons que provocam sensações de sonoridade iguais no ouvido humano” (TIPLER, 2000).

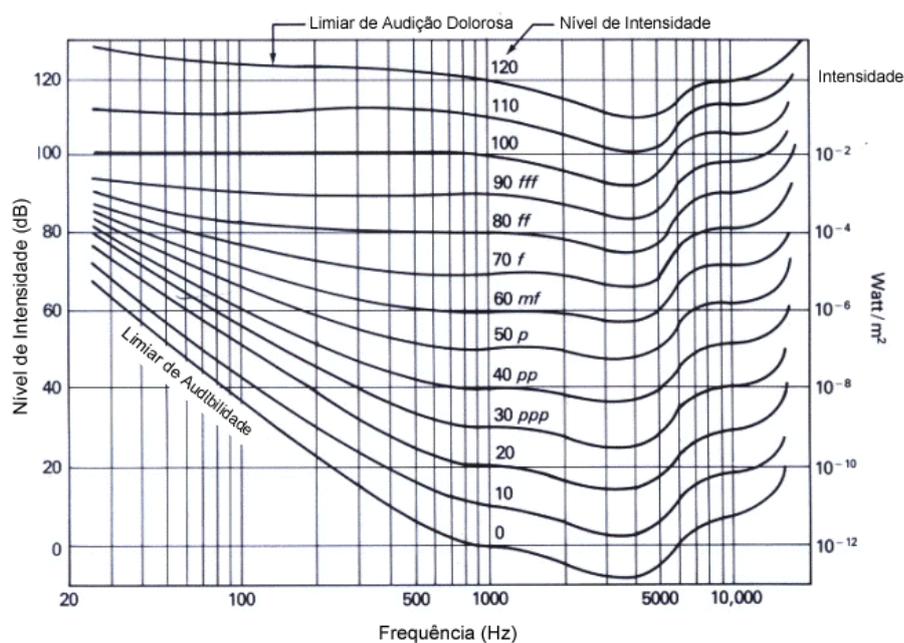


Figura 2.1: Curvas de Fletcher e Munson (DUIOPS, 2007).

Analisando a curva “50 *p*”, pode-se observar que um som com nível de 50 dB em 1000 Hz

é percebido com a mesma intensidade de um som de 70 dB em 50 Hz.

As curvas de ponderação (figura 2.2) são usadas para “modificar o espectro sonoro de acordo com a resposta do sistema auditivo às frequências contidas no som” (NORONHA, 2007).

A norma NBR 10.151 especifica que na medição dos níveis de ruído, deve ser aplicada a curva de ponderação A.

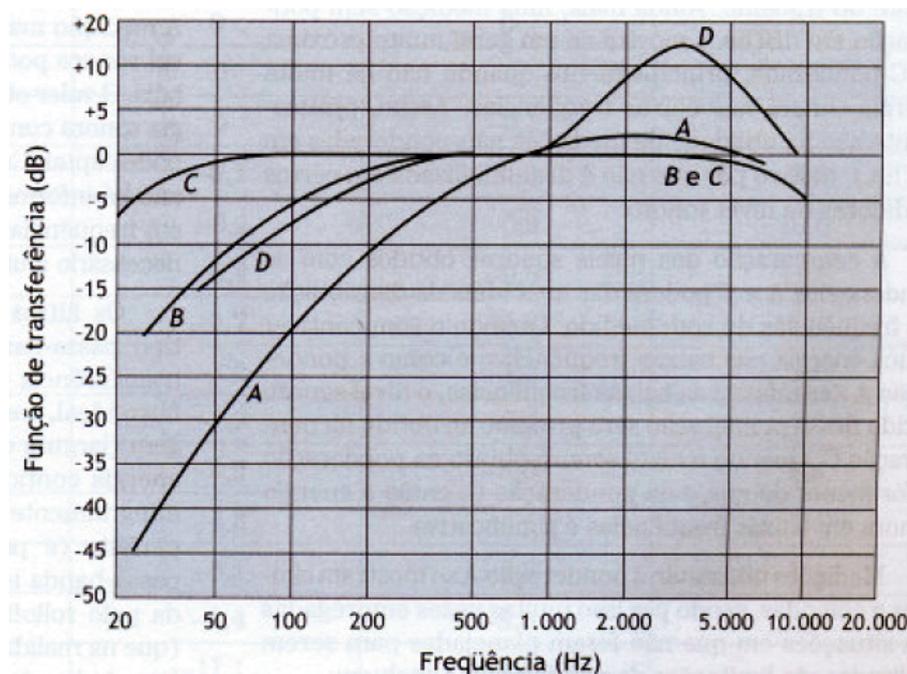


Figura 2.2: Curvas de Ponderação (BISTAFA, 2006).

2.5 Acústica

2.5.1 Absorção

A absorção em um ambiente depende dos materiais utilizados. Alguns materiais são bons absorvedores de sons graves, outros tem desempenho melhor nas frequências mais altas. Cada material possui um índice de absorção (α), que depende da frequência.

A absorção de um material em um ambiente é obtida multiplicando a área de sua superfície (s) pelo seu respectivo índice de absorção (a). A absorção total do ambiente (A), medida em sabines (sa), é a soma da absorção de cada material (VALLE, 2007):

$$A = \sum_{i=1}^n s_i \cdot a_i \quad (2.4)$$

A razão entre a absorção total e a superfície total é o índice médio de absorção (\bar{a}):

$$\bar{a} = \frac{A}{S} = \frac{s_1 \cdot a_1 + s_2 \cdot a_2 + s_3 \cdot a_3 + \dots + s_n \cdot a_n}{s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n} \quad (2.5)$$

2.5.2 Reverberação

A reverberação é um dos fenômenos mais importantes a serem observados na construção de um projeto acústico. A reverberação é “responsável por belezas enormes e por fracassos enormes também” (VALLE, 2007). A reverberação pode ser definida como:

Muitas reflexões em todas as áreas de um ambiente fechado ou semi-fechado (...). Essas reflexões acontecem em todas as direções, em intervalos de tempo muito curtos (milissegundos entre reflexões) e quase aleatórios, formando a difusão sonora (VALLE, 2007, p. 93)

A reverberação também pode ser definida como “o som residual que persiste no ambiente depois que a fonte tenha cessado sua emissão” (OLIVEIRA, 2008).

Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação (TR_{60}) é o tempo que o som leva para que um som difuso em um ambiente tenha sua intensidade reduzida em 60 dB (ISO, 1997).

Cálculo do Tempo de Reverberação

A equação para cálculo do TR_{60} foi desenvolvida por Wallace Sabine e é expressa abaixo:

$$TR_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{A} = \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot \bar{a}} \quad (2.6)$$

Onde V é o volume do ambiente e A a absorção total, calculada pela equação 2.4.

A equação de Sabine (2.6) apresenta um grande erro quando o TR_{60} se aproxima de zero. Quando o índice médio de absorção é igual a 1 (absorção total), o tempo de reverberação calculado deveria ser de 0 segundos, o que não acontece. Eyring (1930) aplicou uma correção ao índice médio de absorção:

$$\bar{a}_{Eyring} = -\ln(1 - \bar{a}) \quad (2.7)$$

A equação de Sabine com a correção de Eyring é:

$$TR_{60} = -\frac{0,16 \cdot V}{S \cdot \ln(1 - \bar{a})} \quad (2.8)$$

Coloração da Reverberação

É uma prática comum que o tempo de TR_{60} das frequências graves seja 50% maior, e nos agudos 50% menor em relação ao TR_{60} em 1 kHz (Figura 2.3). A justificativa usada é para compensar a fraca sensibilidade de sons graves do ouvido humano (KNUDSEN; HARRIS, 1965 apud BRADLEY; NORCROSS; SOULODRE, 1997).

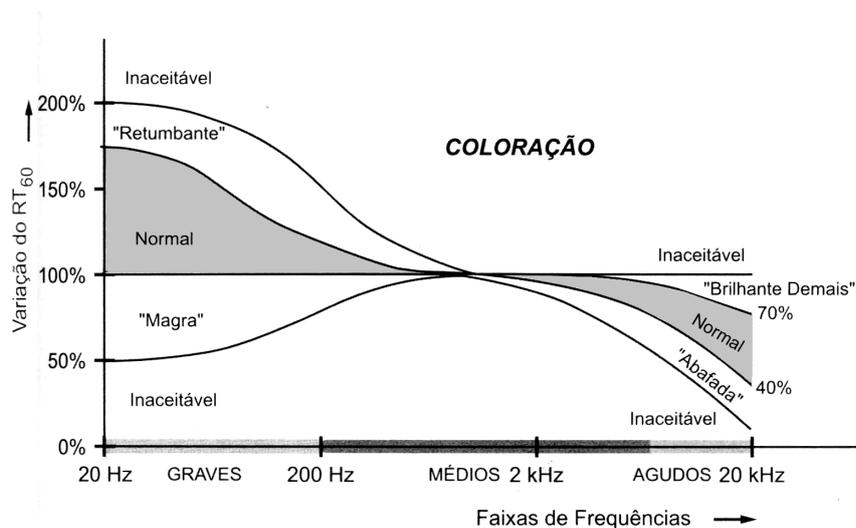


Figura 2.3: Coloração da Reverberação (VALLE, 2007).

Bradley, Norcross e Soulodre (1997) mostraram que o tempo de reflexão não é tão importante para a percepção dos graves, mas sim a energia das primeiras reflexões.

2.5.3 Inteligibilidade

Perda de Articulação de Consoantes (ALcons)

Uma das maneiras de se calcular a inteligibilidade é por meio da AL_{cons} , *Perda de Articulação de Consoantes*. Originalmente essa medida era realizada com um locutor com boa dicção ditando monossílabos, e um grupo de pessoas com perfeita audição anotava em um papel as palavras ouvidas. Foi verificado que a maior margem de erro estava nas consoantes (VALLE, 2007).

Conhecendo o tempo de reverberação do ambiente, a perda de articulação de consoantes

pode ser calculada pela equação:

$$AL_{cons} = \frac{200 \cdot D^2 \cdot TR_{60}^2}{V \cdot Q}; D \leq D_L \quad (2.9)$$

Onde D é a distância do ouvinte à fonte sonora, V é o volume do ambiente, Q é a diretividade da fonte sonora e D_L a distância crítica.

Em um ambiente fechado, o som ouvido será formado pelo som direto, emitido pela fonte, e o reverberante, que depende da acústica do ambiente. A distância crítica é a distância limite onde a intensidade sonora devido ao som direto da fonte sonora é igual à intensidade do campo reverberante, e pode ser calculado pela equação:

$$D_c = 0,141 \cdot \sqrt{Q \cdot A} \quad (2.10)$$

Medindo o TR_{60} , podemos calcular a absorção pela equação:

$$A = \frac{0,161 \cdot V}{TR_{60}} \quad (2.11)$$

Substituindo 2.2 em 2.3, temos:

$$D_c = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot V}{TR_{60}}} \quad (2.12)$$

2.5.4 Clareza

A clareza é um critério para avaliação da inteligibilidade da fala. É a razão entre a energia acústica nos primeiros 50 ms e no restante do tempo (VALLE, 2007).

A clareza é calculada pela equação:

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{50ms} \bar{p}^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} \bar{p}^2(t) dt} dB \quad (2.13)$$

Onde p é o nível de pressão sonora. Conhecendo o tempo de reverberação, pode-se calcular a clareza pela equação (VALLE, 2007):

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\frac{1}{Q} \cdot \left(\frac{Dc}{D}\right)^2 + 1 - e^{-0,69/TR_{60}}}{e^{-0,69/TR_{60}}} dB \quad (2.14)$$

Valores superiores a -5 dB são aceitos para boa inteligibilidade. Valores superiores a 0 dB

indicam uma ótima inteligibilidade.

2.5.5 Clareza

A clareza está relacionada à articulação da música na sala (VALLE, 2007). O músico Dissenha (2007) mostra uma definição do que é a articulação na música:

Segundo o Dicionário Aurélio, articular é tocar com clareza e nitidez. Já a definição do Dicionário Houaiss ensina que articular é “separar (grupos rítmicos ou melódicos) para tornar o discurso musical inteligível”.

O cálculo da clareza é bastante semelhante ao cálculo da clareza, a única diferença são os limites de integração.

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80ms} \bar{p}^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} \bar{p}^2(t) dt} dB \quad (2.15)$$

Assim como na Clareza, é possível calcular a clareza com base no tempo de reverberação:

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\frac{1}{Q} \cdot \left(\frac{Dc}{D}\right)^2 + 1 - e^{-1,104/TR_{60}}}{e^{-1,104/TR_{60}}} dB \quad (2.16)$$

Os valores da clareza dependem do tipo de música (VALLE, 2007):

- -2 dB a +2 dB – Instrumentos de sopro, melodias com notas longas;
- 0 dB a +4 dB – Música clássica e sinfônica, cordas e corais. Ideal para igrejas tradicionais;
- +2 dB a +6 dB – Instrumentos de cordas puxadas, música pop. Música religiosa mais moderna, jazz leve, estilo com notas mais rápidas.
- +4 dB a +8 dB – Instrumentos de percussão, rock'n'roll. Adapta-se melhor à música atual.
- Maior que +8 dB – Não recomendado.

2.5.6 Efeito Haas

Também chamado de efeito de precedência, o efeito Haas é um fenômeno da psicoacústica, que permite localizar a posição espacial de uma fonte sonora. Sons de fontes sonoras distintas que chegam ao ouvido humano com uma diferença de até 30 ms são percebidos como um único som. O cérebro interpreta esses dois sons como provenientes da primeira

fonte sonora. No caso de apenas uma fonte sonora, o som que chega a cada ouvido em momentos distintos permite a localização da fonte. Se a diferença for maior do que 30 ms, os dois sons são percebidos separadamente.

O efeito Haas acontece mesmo que a segunda fonte tenha uma intensidade sonora maior do que a primeira fonte desde que essa diferença não seja superior a 10 dB (HAAS, 1972).

O efeito Haas é muito utilizado na sonorização de ambientes e shows ao vivo. Torres de reforço são utilizadas para compensar a atenuação do som pelo ar ou a redução na inteligibilidade com o aumento da distância do ouvinte à fonte sonora. Atrasos no sinal dessas torres são aplicados para que ouvintes que estejam posicionados após as torres ouçam primeiro as primeiras caixas de som, geralmente posicionadas próximas ao palco, e depois ouçam o som das torres de reforço, tendo a sensação de que o som está sendo gerado no palco.

3 Metodologia

O projeto de melhoria acústica foi baseada nos critérios estabelecidos na norma NBR 12.179. Essa norma coloca um tempo de reverberação de até 1,7 segundos para um ambiente com volume de $1380 m^3$.

Não há valores de referência para a Clareza e Claridade. Por esse motivo serão usados como parâmetros as sugestões apresentadas por Valle (2007): valores acima de -5 dB para a clareza, e 0 dB a +4 dB para a claridade.

3.1 Local em que foi realizado o trabalho

O trabalho foi realizado em uma igreja católica, devido à facilidade de acesso ao local e pela disposição da administração em executar um projeto de melhoria acústica.

A igreja tem dimensões de 11 m x 25,1 m x 5 m (largura x comprimento x altura), e capacidade para 400 pessoas sentadas. Não houve consultoria acústica na sonorização dessa igreja, a escolha e utilização dos equipamentos de som foram selecionados e instalados com base em outras igrejas.

A igreja tem três missas por semana, na quarta e sábado às 19h30m, e domingo às 08h00m. A figura 3.1 mostra a área da igreja e sua vizinhança.



Figura 3.1: Foto de satélite mostrando o terreno da igreja (vermelho) e a área do templo (amarelo).



Figura 3.2: Área externa da igreja.



Figura 3.3: Área externa da igreja.

3.2 Medidas

Para realização do projeto acústico, primeiro foi realizada a medida do tempo de reverberação da igreja. As medidas foram realizadas com um medidor de pressão modelo Solo do fabricante 01dB-Metravib, equipado com filtro de banda de oitavas. O equipamento foi ligado a um computador executando o software dBBATI32, que realiza as medidas dos parâmetros acústicos analisados nesse trabalho.

Para a medida do tempo de reverberação, foram escolhidos cinco pontos, conforme figura 3.4. Em cada ponto, foram realizadas três medidas. O medidor estava a 1,2 metros de altura e a uma distância mínima de 1,5 metros das paredes (ISO, 1997; ABNT, 2000).

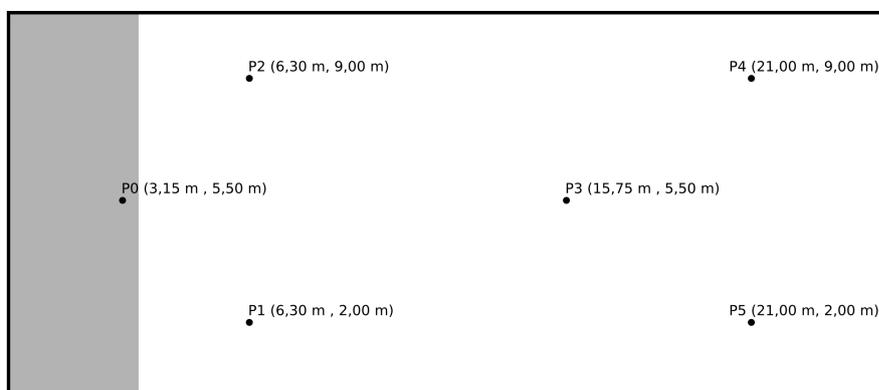


Figura 3.4: Pontos de medição.

O tempo de reverberação foi medido por meio de um ruído impulsivo (ISO, 1997). Esse ruído foi atingido com o estouro de balões de número 12. O ruído foi gerado no ponto P0, onde serão instaladas as caixas acústicas, conforme indica a figura 3.4.

Para avaliação do nível de intensidade sonora nos vizinhos, foram realizadas medidas nos arredores da igreja durante uma missa, do Leq com curva de ponderação A em 3 pontos, mostrados na figura 3.5. Cada medida foi realizada durante um minuto. Na medida do ruído de fundo dentro da igreja, o tempo de medição foi de três minutos.

3.3 Cálculos

Para calcular os parâmetros acústicos e o tempo de reverberação após a aplicação dos materiais de absorção acústica sugeridos, foi utilizada uma planilha eletrônica.



Figura 3.5: Pontos de medida da intensidade sonora nos arredores da igreja.

4 Resultados e Discussões

4.1 Situação Inicial

4.1.1 Tempo de Reverberação

Os resultados das medidas do tempo de reverberação nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 estão nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente.

O tempo de reverberação medido está bem acima do sugerido pela NBR 12.179, que é de 1,7s em 500 Hz. A curva apresentada na figura 4.1 também não apresenta a coloração sugerida na figura 2.3.

O pico em 1000 Hz indica que será necessário aplicar algum material que tenha uma boa absorção nessa faixa de frequência, para reduzir o TR_{60} para menos de 1,7s.

4.1.2 Intensidade Sonora e Ruído de Fundo

As medidas de intensidade sonora nos vizinhos da igreja estão na tabela 4.7. O ruído de fundo medido dentro da igreja foi de 47,3 dB.

Frequência (Hz)	Medidas (s)			Média (s)	Desvio Padrão (s)
	1	2	3		
125	2,52	2,66	2,59	2,59	0,07
250	2,11	2,18	2,21	2,17	0,05
500	2,42	2,45	2,42	2,43	0,02
1000	3,05	3,13	3,08	3,09	0,04
2000	2,44	2,37	2,43	2,41	0,04
4000	2,19	2,20	2,20	2,20	0,01

Tabela 4.1: Medidas do tempo de reverberação no ponto 1.

Frequência (Hz)	Medidas (s)			Média (s)	Desvio Padrão (s)
	1	2	3		
125	2,00	1,70	1,83	1,84	0,15
250	1,99	2,01	2,19	2,06	0,11
500	2,60	2,45	2,55	2,53	0,08
1000	2,97	2,98	2,91	2,95	0,04
2000	2,34	2,34	2,46	2,38	0,07
4000	2,19	2,13	2,20	2,17	0,04

Tabela 4.2: Medidas do tempo de reverberação no ponto 2.

Frequência (Hz)	Medidas (s)			Média (s)	Desvio Padrão (s)
	1	2	3		
125	2,61	2,29	2,36	2,42	0,17
250	2,51	2,36	2,38	2,42	0,08
500	2,49	2,46	2,50	2,48	0,02
1000	3,05	3,08	3,09	3,07	0,02
2000	2,52	2,52	2,46	2,50	0,03
4000	2,25	2,21	2,28	2,25	0,04

Tabela 4.3: Medidas do tempo de reverberação no ponto 3.

Frequência (Hz)	Medidas (s)			Média (s)	Desvio Padrão (s)
	1	2	3		
125	2,21	2,76	2,22	2,40	0,31
250	2,29	2,36	2,34	2,33	0,04
500	2,55	2,55	2,63	2,58	0,05
1000	3,20	2,94	2,94	3,03	0,15
2000	2,55	2,44	2,57	2,52	0,07
4000	2,25	2,22	2,26	2,24	0,02

Tabela 4.4: Medidas do tempo de reverberação no ponto 4.

Frequência (Hz)	Medidas (s)			Média (s)	Desvio Padrão (s)
	1	2	3		
125	2,00	1,89	3,02	2,30	0,62
250	2,25	2,18	2,09	2,17	0,08
500	2,56	2,54	2,59	2,56	0,03
1000	3,08	3,05	3,09	3,07	0,02
2000	2,58	2,45	2,55	2,53	0,07
4000	2,23	2,22	2,30	2,25	0,04

Tabela 4.5: Medidas do tempo de reverberação no ponto 5.

Frequência (Hz)	Média (s)	Desvio Padrão (s)
125	2,31	0,38
250	2,23	0,15
500	2,52	0,07
1000	3,04	0,08
2000	2,47	0,08
4000	2,22	0,04

Tabela 4.6: Média do Tempo de Reverberação.

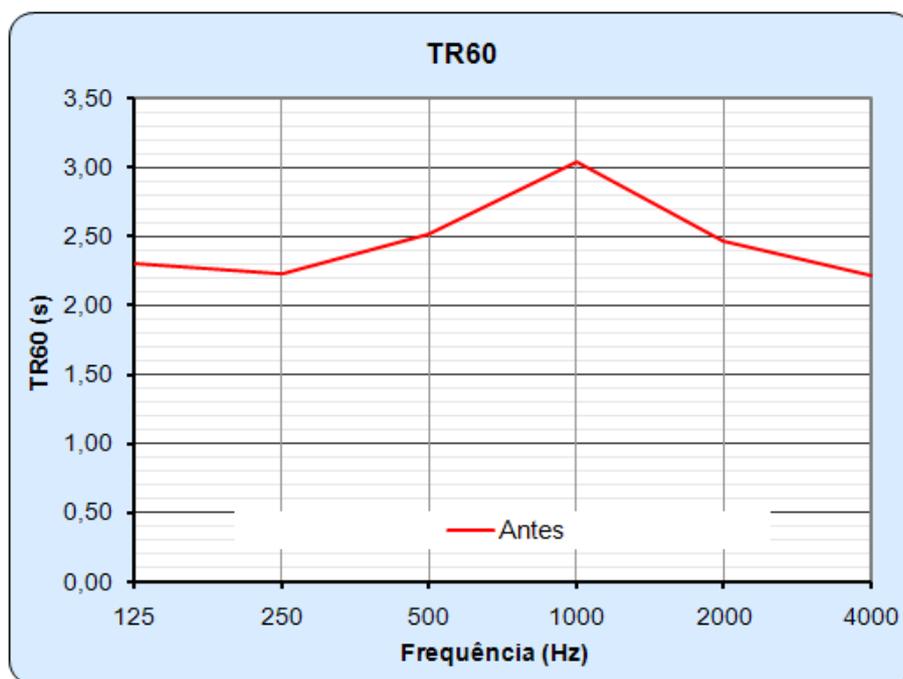


Figura 4.1: Tempo de reverberação medido.

Ponto	L_{EQ} (A)
1	58,7 dB
2	46,5 dB
3	49,8 dB

Tabela 4.7: Intensidade sonora nos arredores da igreja.

Frequência (Hz)	Absorção da Igreja (sa)
125	96,18
250	99,82
500	88,11
1000	73,17
2000	90,17
4000	100,08

Tabela 4.8: Absorção total antes do tratamento acústico.

Absorção acústica

A absorção acústica pode ser calculada com a equação 2.11. O resultado está na tabela 4.8.

Inteligibilidade

O último ouvinte está posicionado a aproximadamente 18,97 metros da caixa de som. Usando a equação 2.9 e considerando um fator de diretividade Q de 10, a inteligibilidade calculada pela AL_{CONS} é de 33,11 %. Qualquer valor acima de 15 % é considerado inaceitável.

Clareza

Com a equação 2.14 podemos calcular a clareza. Para o cálculo foi considerado o fator de diretividade Q de 10. Antes de calcular a clareza é necessário calcular a distância crítica.

A distância crítica (equação 2.10) é aproximadamente de 4,19 metros. Para o último ouvinte, a clareza é de -4,93 dB. Esse valor está no limite mínimo de -5 dB para boa inteligibilidade, mas pode-se concluir com o cálculo da AL_{CONS} que a inteligibilidade nessa igreja na posição do último ouvinte é inaceitável.

Clareza

Usando a equação 2.16, o valor calculado para a clareza é de -2,54 dB. Esse valor está bem abaixo do recomendado para igrejas tradicionais, que varia entre 0 dB e +4 dB.

Material	125	250	500	1000	2000	4000
Tapete de 5 mm de espessura	0,04	0,04	0,15	0,29	0,52	0,59
Material 1	0,07	0,17	0,56	0,95	0,83	0,52
Material 2	0,11	0,24	0,64	0,71	0,64	0,64
Material 3	0,23	0,67	0,50	0,54	0,47	0,73

Tabela 4.9: Coeficientes de absorção acústica dos materiais sugeridos para absorção.

Material	Área	125	250	500	1000	2000	4000
Carpete grosso sobre concreto	30,00	1,20	1,20	4,50	8,70	15,60	17,70
Material 1	33,15	2,32	5,64	18,56	31,49	27,51	17,24
Material 2	19,89	2,19	4,77	12,73	14,12	12,73	12,73
Material 3	2,50	0,58	1,68	1,25	1,35	1,18	1,83

Tabela 4.10: Absorção total dos materiais sugeridos.

4.2 Projeto Acústico

4.2.1 Materiais

Os materiais escolhidos foram carpete grosso sobre concreto e três materiais comerciais. Esses materiais foram selecionados levando em consideração necessidades específicas para o conforto acústico da igreja: a necessidade de uma grande absorção na faixa de 1 kHz, pouca absorção em frequências baixas e altas.

Os coeficientes de absorção desses materiais estão na tabela 4.9. O carpete grosso está na norma NBR 12.179 (ABNT, 2002), e os materiais comerciais são fornecidos pelos fabricantes.

A área de material a ser aplicada levou em consideração a quantidade fornecida. Os materiais 1 e 2 são vendidos em kits de 17 placas de 625 mm² e serão necessários 5 e 3 kits de cada, respectivamente. O material 3 é fornecido em placas de 500 mm² e deverão ser usadas 10 placas. O carpete deverá cobrir quase toda a extensão do altar, que tem 33 m².

As áreas de cada material e a absorção causada por eles estão na tabela 4.10.

4.2.2 Cálculo dos parâmetros acústicos

Absorção acústica

Com a equação 2.8, podemos calcular a absorção acústica de toda a igreja. A absorção total da igreja após a aplicação dos materiais está na tabela 4.11.

Frequência	Absorção da Igreja	Absorção dos Materiais	Absorção Total
125 Hz	96,18	6,29	102,47
250 Hz	99,82	13,29	113,11
500 Hz	88,11	37,04	125,15
1000 Hz	73,17	55,66	128,83
2000 Hz	90,17	57,02	147,19
4000 Hz	100,08	49,50	149,58

Tabela 4.11: Absorção acústica.

Frequência)	TR₆₀	TR₆₀ (Anterior)
125 Hz	2,15 s	2,31 s
250 Hz	1,94 s	2,23 s
500 Hz	1,71 s	2,52 s
1000 Hz	1,64 s	3,04 s
2000 Hz	1,43 s	2,47 s
4000 Hz	1,41 s	2,22 s

Tabela 4.12: Comparação do tempo de reverberação calculado após a aplicação dos materiais e o tempo de reverberação medido.

Tempo de Reverberação

Usando a equação de Eyring para o cálculo do tempo de reverberação, após a aplicação dos materiais acústicos os valores para o novo TR₆₀ calculados estão na tabela 4.12.

Por não poder controlar as reflexões, optou-se por manter um tempo de reverberação mais longo para baixas frequências.

4.2.3 Parâmetros acústicos derivados do tempo de reverberação

Os parâmetros acústicos como Inteligibilidade, Clareza e Clareza dependem da distância do ouvinte à fonte sonora e da diretividade da fonte sonora.

Inteligibilidade

Na posição do último ouvinte, a AL_{CONS} é de 12,70 %. Com esse valor, a inteligibilidade é apenas aceitável.

Distância Crítica

A nova distância crítica calculada pela equação 2.10 é 5,61 m.

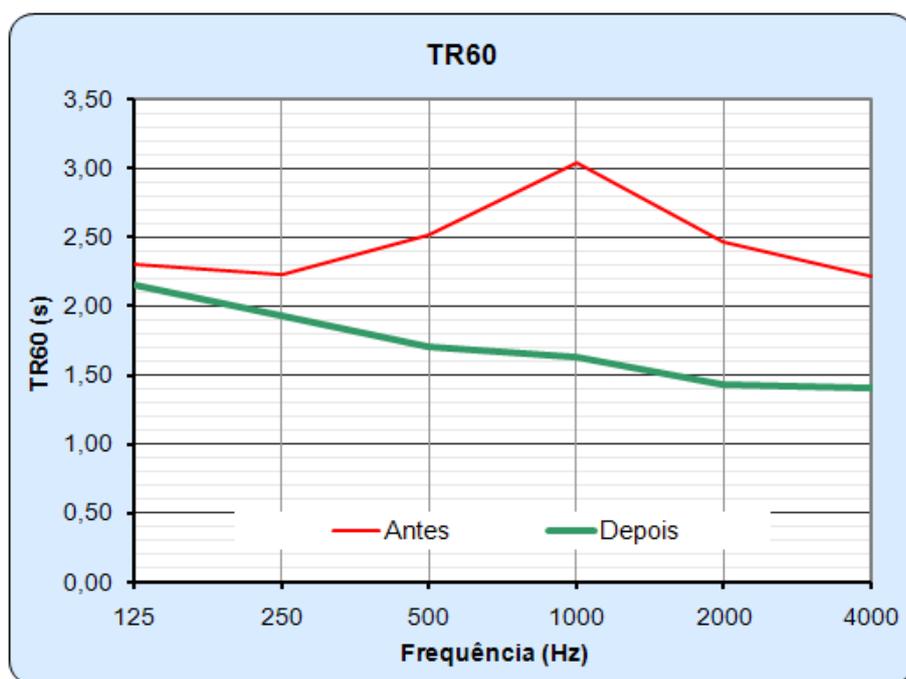


Figura 4.2: Tempo de reverberação após o tratamento acústico.

Clareza

Usando a equação 2.14, a Clareza após o tratamento acústico na posição do último ouvinte será de -2,94 dB. O valor está dentro do limite aceitável para inteligibilidade.

Clareza

Para o último ouvinte, o novo valor da clareza calculada pela equação 2.16 é de -0,36 dB. Ainda abaixo do recomendável, que é de 0 dB.

4.3 Posicionamento das caixas de som

Apesar do tempo de reverberação estar adequado à recomendação da ABNT, a inteligibilidade, clareza e clareza na posição do último ouvinte ainda estão fora dos valores recomendáveis. Para contornar esse problema será preciso alterar a distância do último ouvinte à fonte sonora. Dessa maneira, torna-se necessário o uso de caixas de “delay”, ou de reforço.

Usando a equação 2.9, podemos calcular a distância máxima onde a inteligibilidade terá um valor desejado:

$$D = \sqrt{\frac{AL_{CONS} \cdot V \cdot Q}{200 \cdot TR_{60}^2}}$$

Sendo $TR_{60} = 1,71$ s, $V = 1380,50$ m^3 , o AL_{CONS} desejado de 10 % e uma diretividade Q de 10, temos que a distância máxima do último ouvinte é de aproximadamente 15,36 metros.

Devido à construção da igreja, as caixas acústicas só podem ser posicionadas nas posições de 3,15 m, 6,3 m e 15,75 m. Como o primeiro ouvinte estará situado próximo à posição de 6,3 metros, optou-se por posicionar a primeira caixa acústica na posição de 3,15 metros.

Sabendo que as caixas utilizadas nessa igreja tem dispersão vertical de 45° , foi preciso calcular a inclinação dessa caixa para que o último ouvinte não ficasse a uma distância superior à distância de 15,36 metros. Pode-se considerar um triângulo retângulo, onde a hipotenusa desse triângulo é a distância da fonte ao ouvinte, e um dos catetos é a altura do ouvinte à caixa acústica (figura 4.3). Essa altura foi considerada de 3,8 metros, que corresponde à diferença entre a posição da caixa acústica (5m) e a altura de um ouvinte sentado (1,2 m). As caixas nessa posição deverão ter uma inclinação de $36,8^\circ$ com a horizontal.

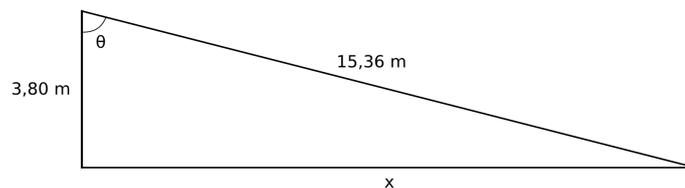


Figura 4.3: Cálculo do ângulo de inclinação das caixas acústicas.

Sendo $\cos(\theta) = \frac{3,8}{15,38}$, temos que $\theta = \arccos\left(\frac{3,8}{15,38}\right) \approx 75,70^\circ$.

O primeiro ouvinte da segunda caixa deve coincidir com o último ouvinte da primeira. A inclinação da segunda caixa é calculada de maneira semelhante, e o ângulo deve ser de $36,3^\circ$.

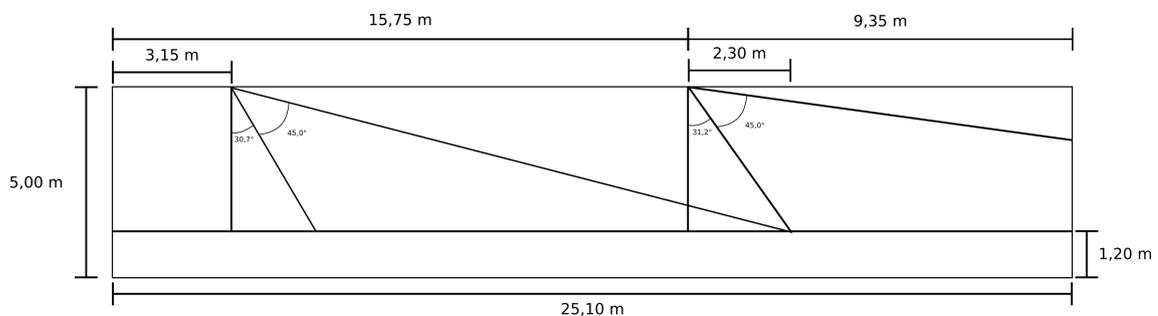


Figura 4.4: Posicionamento das caixas de som.

As caixas de reforço devem ter um atraso no sinal para que aconteça o efeito Haas e a posição espacial da fonte sonora seja mantida à frente. Sendo a velocidade do som de 331 m/s (TIPLER, 2000), deverá ser aplicado um atraso no som igual à diferença entre os tempos de

chegada da primeira e segunda caixa de som, com um acréscimo de 20 ms para que aconteça o efeito Haas. O “delay” deverá ser de 53,2 ms.

A inteligibilidade será de 8,35%, a clareza -2,89 dB e a claridade -0,32 dB. Com isso teremos uma inteligibilidade boa, clareza aceitável para boa inteligibilidade e a claridade próxima ao valor aceitável para igrejas tradicionais, que fica entre 0 dB e +4 dB.

5 Conclusão

Executar um projeto de acústica após a construção do ambiente pode ter um custo elevado, porque nem sempre é possível alterar as dimensões do local, o posicionamento das fontes sonoras ou os materiais usados no piso, paredes ou teto. Houve uma grande dificuldade em reduzir o TR_{60} na faixa de 1 kHz devido às dimensões da igreja e ao material usado no revestimento. Foi necessário aplicar uma grande quantidade de material para absorção acústica.

A reclamação recorrente dos frequentadores da igreja de falta de inteligibilidade foi confirmada com as medidas e cálculos dos parâmetros acústicos. Após a aplicação dos materiais para absorção acústica, espera-se que haja um melhor entendimento dos cânticos e da palavra falada na igreja.

Por estar localizada longe de vias de grande movimento e próxima a uma área verde, o ruído de fundo medido está dentro do limite especificado pela legislação. A distância dos vizinhos contribui para que o nível de intensidade sonora medido também contribui para um baixo nível de intensidade sonora, apesar de estar acima do limite de 50 dB.

Uma boa inteligibilidade reflete em menor nível de pressão sonora no interior da igreja e consequentemente no exterior. Espera-se que os níveis de intensidade sonora permaneçam dentro dos limites da legislação vigente.

6 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10151*: Acústica – avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - procedimento. Rio de Janeiro, Jun 2000. 4 p.

_____. *NBR 12179*: Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, Ago 2002. 9 p.

AUDIO ENGINEERING SOCIETY. Preventing hearing loss. *Journal of the Audio Engineering Society*, Nova Iorque, v. 54, n. 11, p. 1109–1113, Nov 2006.

BISTAFA, Sylvio R. *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA., 2006.

BRADLEY, John S.; NORCROSS, Scott; SOULODRE, Gilbert A. Factors Influencing the Perception of Bass. Jun 1997. Disponível em: <<http://www.acoustics.org/press/133rd/4aaa6.html>>. Acesso em: 09 mar 2010.

BRASIL. Ministério do Trabalho. *Norma Regulamentadora 15: Atividades e operações insalubres*. [S.l.], Mar 2008. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_15.pdf>. Acesso em: 23 jun 2010.

DISSENHA, Fernando. *Articulação*. 2007. Disponível em: <http://www.dissenha.com/imprensa/art_03.pdf>. Acesso em: 23 jun 2010.

DISTRITO FEDERAL. Lei nº 4.092, de 30 de janeiro de 2008: Dispõe sobre o controle da poluição sonora e os limites máximos de intensidade da emissão de sons e ruídos resultantes de atividades urbanas e rurais no distrito federal. *Diário Oficial do Distrito Federal*, Brasília, n. 23, 01 Jun 2008.

DUIOPS. *Curvas de fletcher munson*. Dez 2007. Disponível em: <<http://www.duiops.net/hifi/enciclopedia/curvas-fletcher-munson-htm>>. Acesso em: 05 jun 2010.

EYRING, C F. Reverberation time in “dead” rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, Nova Iorque, v. 1, n. 2A, p. 217–241, Jan 1930.

GARAVELLI, Sérgio Luiz; ALVES, Séver Marcos Leal. A contaminação ambiental devido aos templos religiosos em goiânia. *Revista de Estudos Ambientais*, v. 8, p. 54–62, 2006.

HAAS, Helmut. The influence of a single echo on the audibility of speech. *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 20, n. 2, p. 146–159, Mar 1972.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 3382: Acoustics – measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*. [S.l.], Jun 1997. 24 p.

KNUDSEN, V. O.; HARRIS, C. M. *Acoustical Designing in Architecture*. New York: Wiley, 1965.

NORONHA, Eduardo Hermínio. *Qualificação e quantificação dos níveis de ruído em ambientes laborais no distrito federal*. 2007. Disponível em: <<http://www.fisica.ucb.br/sites/000/74/00000087.pdf>>. Acesso em: 31 out 2009.

OLIVEIRA, Jader da Silva de. *Comparação entre o tempo de reverberação experimental e teórico, através da equação de sabine e sabine modificada*. Jun 2008. Disponível em: <<http://www.fisica.ucb.br/sites/000/74/00000100.pdf>>. Acesso em: 30 out 2009.

RANGEL, Osiel. Som nas igrejas – igreja bom jesus da penha. *Revista Backstage*, n. 175, Jun 2009. Disponível em: <http://www.backstage.com.br/newsite/ed_ant/materias/175/SomIgrejas.htm>. Acesso em: 12 fev 2010.

TIPLER, Paul. *Física para Cientistas e Engenheiros*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2000. 651 p.

VALLE, Sólton do. *Manual Prático de Acústica*. 2. ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2007. 355 p.