

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS E PROJETO DE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO DA CATEDRAL METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE, RS

F M Simões(1), L B Nabinger(2)

(1) Prof. Dr. Arquiteto pela Universidade de Sevilla, Espanha. (2) Aluno 9º semestre. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo Ritter dos Reis - Departamento de Tecnologia. Rua Orfanotrófio, 555. Alto Teresópolis, CEP 90840-440. Porto Alegre, RS, Brasil. Fone/fax: + 55 (51) 3233-7166 – e-mail: fmsimoes@terra.com.br

RESUMO

Apresentamos o estudo acústico da Catedral Metropolitana de Porto Alegre, RS, Brasil. Inicialmente medimos Ruído de Fundo e Tempo de Reverberação. Utilizando programa de simulação acústica AcustaCadd construímos um modelo informático, calibrado com os valores do tempo de reverberação medido. Analisamos Tempo de Reverberação, Inteligibilidade da Palavra e Acústica Geométrica. Com os valores encontrados desenvolvemos e executamos Projeto de Condicionamento Acústico, onde corrigimos o elevado tempo de reverberação original aumentando a absorção, com a instalação de 650,00 m² de painéis de lã de vidro de 100 mm, 60 Kg/m³. Aproveitamos rebaxos existentes na alvenaria para embutir os painéis nas paredes. Reduzimos o volume da área do coro e dos balcões laterais ao altar e revestimos o interior destes locais com a mesma lã de vidro. Buscamos alterar o mínimo possível as características arquitetônicas do local, visto que trata-se de uma edificação de importância histórica. Também foram analisados os valores medidos de Ruído de Fundo e avaliado o Isolamento Acústico, considerados adequados. Falta realizar a medição final do tempo de reverberação. Na re-inauguração da Igreja constatamos uma satisfação geral com a nova inteligibilidade do local, uma antiga reivindicação dos usuários.

ABSTRACT

We introduce the acoustic study of the Metropolitan Cathedral of Porto Alegre, RS, Brazil. Initially we measured Background Noise and Reverberation Time. Using acoustic simulation software AcustaCadd we built a digital model, gauged with the values of the measured reverberation time. We analyzed Reverberation Time, Intelligibility of the Word and Geometric Acoustics. With the found values we developed and executed Project of Acoustic Conditioning, where we corrected the high time of original reverberation increasing the absorption, with the installation of 650,00 m² of panels of glass wool (100 mm, 60 Kg/m³). We took advantage of existent details in the plaster to embed the panels in the walls. We reduced the volume of the area of the choir and of the lateral counters to the altar and we covered the interior of these local ones with the same glass wool. We looked for to alter the possible minimum the architectural characteristics of the place, because it is a construction of historical importance. The measured values of Background Noise were also analyzed and appraised the appropriate Acoustic, considered Isolation. It lacks to accomplish the final mensuration of the reverberation time. In the re-inauguration of the Church we verified a general satisfaction with the new intelligibility of the place, an old claim of the users.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho apresentamos o resultado das Medições Acústicas e o Projeto de Condicionamento Acústico da Catedral Metropolitana de Porto Alegre, assim como detalhes da execução da obra. É pertinente salientar que, nas soluções propostas para os problemas identificados, buscou-se alterar o mínimo possível as características arquitetônicas do local, visto que trata-se de uma edificação de importância histórica. Falta realizar a medição final do tempo de reverberação, mas a satisfação demonstrada pelos usuários da Igreja, por ocasião da missa de re-inauguração, atesta a eficiência da adequação acústica executada.

2. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA:

Utilizamos um Analisador de Som em Tempo Real portátil, modelo SA 110, equipado com microfone 1220 e pré-amplificador 1201, todos da marca Norsonic, Noruega, (normas IEC 804 e 651), para medição do ruído de fundo, análise de frequências em centros de oitavas e tempo de reverberação. No desenvolvimento do projeto utilizamos programa informático de simulação acústica AcoustaCADD, licença do Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, da Universidade de Sevilla, para desenvolver uma maquete eletrônica.

Os pontos em que foram realizadas as medições estão aqui assinalados em planta baixa (**fig. 1**), na imagem da maquete informática do programa AcoustaCADD:

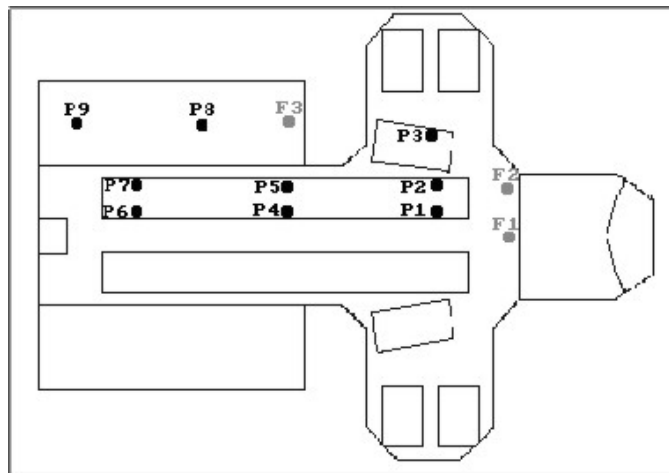


Figura 1- Planta baixa com a localização das fontes (F...) e pontos da medição (P...).

A metodologiaⁱ utilizada para desenvolver o trabalho estrutura o estudo acústico, dividindo-o em uma série de aspectos que se pretende avaliar mediante os parâmetros adequados. Estes aspectos a considerar são os seguintes:

2.1 Tempo de Reverberação

Sabine definiu Tempo de Reverberação como o tempo necessário para que a intensidade sonora estacionária se reduza à milionésima parte, desde o instante em que a fonte deixou de emitir, o que significa que o nível em tal local diminua em 60 dB A. Para medir o Tempo de Reverberação foi utilizado o método de impulso integrado de Schröderⁱⁱ, mediante uma curta explosão, nos pontos assinalados em planta na figura 1 (F 1, F 2 e F 3), que é recolhida no ponto de recepção por microfone e pré-amplificador, registrado digitalmente na memória do aparelho. Os pontos de recepção se dividiram pelo interior da Igreja, conforme indicação em planta na figura 1(P 1, P 2, ..., P 9). Posteriormente em laboratório foram analisados estes registros, obtendo para cada ponto de recepção a curva tonal T_R frente a frequência. Montamos um modelo informático (**fig. 2**) no programa de

simulação acústica *AcoustaCADD*, e corrigimos o tempo de reverberação do modelo com os valores encontrados nas medições, mediante ajuste de coeficientes de absorção de alguns materiais. A partir do modelo corrigido buscamos um adequado tempo de reverberação simulando a substituição de materiais de revestimento, tendo como meta os tempos ótimos para este local, indicados por Pérez Mⁱⁱⁱ. Encontradas as quantidades e os materiais apropriados, buscamos a localização e a forma de aplicar o revestimento sem interferir na Arquitetura do local, visto que trata-se de uma edificação de importância histórica.

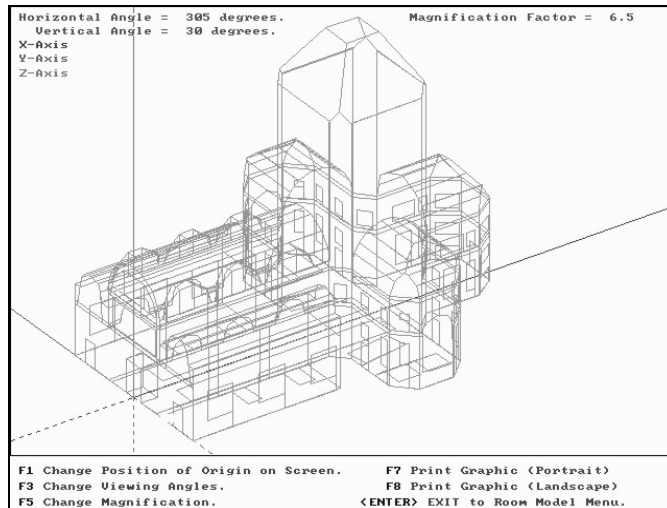


Figura 2- Perspectiva do modelo informático da catedral

2.2 Acústica Geométrica

Para realizar este estudo utilizamos o módulo de *Ray tracing* do programa *AcoustaCADD*, aplicado à maquete informática, com o objetivo de avaliar a natureza e participação do som refletido no campo sonoro. Analisamos a incidência dos raios sonoros diretos e refletidos em distintos pontos representativos da sala, detectando possíveis ecos, observando o percurso dos raios sonoros e onde eles refletem, assim como tempo de retardo e intensidade de cada raio em relação ao raio direto.. Este estudo nos auxiliou a entender o comportamento acústico da Igreja e na determinação da melhor localização dos materiais acústicos absorventes.

2.3 Inteligibilidade da Palavra

As condições de comunicação dependem da boa Inteligibilidade, que é a capacidade de percebermos claramente os sons emitidos nas freqüências da fala e decodificarmos as mensagens. Realizamos um estudo teórico da inteligibilidade da palavra (capacidade de entendimento por parte do ouvinte das palavras pronunciadas por um orador). Utilizou-se o índice AL_{cons} , de Peutz^{iv}, implementado no programa informático já citado. Este indicador avalia especialmente a perda da inteligibilidade das consoantes, a partir da distância emissor-receptor e do tempo de reverberação da sala, considerando o nível de ruído de fundo. A potência da fonte se ajustou para produzir, a 1 m dela, níveis acústicos semelhantes ao da voz humana (~70 dB).

2.4 Ruído de Fundo

Para medir o ruído de fundo utilizamos o equipamento já citado, seguindo o método indicado pela norma brasileira NBR 10151. Foram obtidos valores de nível equivalente (Leq) durante três minutos.

3. RESULTADOS

3.1 Tempo de Reverberação

A seguir apresentamos os valores medidos (**tab. 1**) de EDT, T_{20} e T_{30} , a partir das fonte sonoras **F1**, **F 2** e **F 3**, assim como os ótimos para igrejas deste volume, aproximadamente 35.000,00 m³, obtidos a partir de Pérez M. Incluímos também os valores estimados obtidos nas simulações com o modelo informático.

Tabela 1. Tempo de Reverberação.

TEMPO DE REVERBERAÇÃO MEDIDO, ÓTIMO E PROJETADO							
MEDIDO		FREQÜÊNCIAS (Hz)					
		125	250	500	1.000	2.000	4.000
Fonte 1	EDT	16,54	15,14	13,52	11,43	9,40	5,92
	T_{20}	14,10	13,67	12,07	10,57	9,11	5,91
	T_{30}	16,93	15,98	15,41	12,75	9,35	6,11
Fonte 2	EDT	13,76	14,58	12,97	10,80	8,72	5,72
	T_{20}	1036	11,64	11,64	10,47	8,71	5,86
	T_{30}	-	14,77	13,01	10,48	8,72	5,99
Fonte 3	EDT	13,96	12,84	11,75	9,54	6,84	4,50
	T_{20}	12,61	13,31	12,00	10,76	8,39	5,14
	T_{30}	-	-	-	11,30	8,62	5,39
ÓTIMO – IGREJAS		3,90	3,45	3,00	2,70	2,70	2,70
PROJETADO – VAZIA		6,99	5,42	5,14	4,84	4,55	3,63
PROJETADO-2/3 ^o CUPADA		5,94	4,82	4,47	4,12	3,85	3,18

Tabela 2- Tabela de Materiais (antes das correções acústicas)

Material	Superf (m ²)	Coeficiente de Absorção						Referência:
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
Bancos de Madeira Vazios	501,60	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	Martins Da Silva
Portas de Madeira	123,67	0,10	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	Perez Miñana
Superfície Virtual (Coro, Balcões)	56,53	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Piso Mármore + 32% Carpete	1.173,79	0,04	0,03	0,05	0,07	0,13	0,24	Perez Miñana
Rebôco Liso (paredes)	590,60	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	Egan
Rebôco Det. de Gesso(cornijas)	286,06	0,05	0,05	0,05	0,08	0,12	0,20	Calculado
Vidro (janelas e vitrais)	176,40	0,17	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	COAM
Superfície Rebocada (coberturas)	2.551,60	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	Egan
Apliques de Gesso (paredes trabalhadas)	4.213,93	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,08	Egan
Total	9.674,18							

Para ajustar o modelo informático aos valores obtidos na medição adotamos os seguintes coeficientes de absorção dos materiais de revestimento e mobiliário que apresentamos na **tabela 2**. Com a maquete ajustada, começamos a adicionar absorção, buscando uma diminuição da reverberação. Com o fim de não descaracterizar a Arquitetura do local, conseguimos uma melhora considerável revestindo os rebaixos existentes no reboco. Frente aos elevados tempos de reverberação encontrados, adotamos o

material Lã de Vidro, devido à alta absorção acústica proporcionada, incombustibilidade e ser de uso corrente em construção civil. O produto escolhido, comercialmente denominado Painel MI 560 x 100, produzido por Companhia Vidraria Santa Marina, compõe-se por uma manta de lã de vidro não resinada armada com tela metálica galvanizada, com densidade de 60 Kg/m^3 e 100 mm de espessura. A escolha deste produto está baseada em certificado emitido pelo Laboratório de Acústica do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

O painel de lã de vidro, recortado na forma do rebaixo, foi revestido com tecido de malha aberta, em cor neutra, para posterior substituição por uma tapeçaria ou Gobelin produzido para o local. Com fim de conseguir uma maior absorção e maior profundidade para embutir o painel acústico, indicamos a remoção do reboco que ficaria oculto, ficando exposta a alvenaria de tijolos maciços no fundo da “câmara de absorção”. Ver detalhes em cinza nas fotos editadas (**fig. 1 e 2**) a seguir:



Fig. 3. Colocação do painel nas paredes laterais. **Fig. 4.** Reboco removido para embutir painel.



Figuras 5 e 6 – Colocação de revestimento de lã de vidro nas cornijas e fundo da igreja.

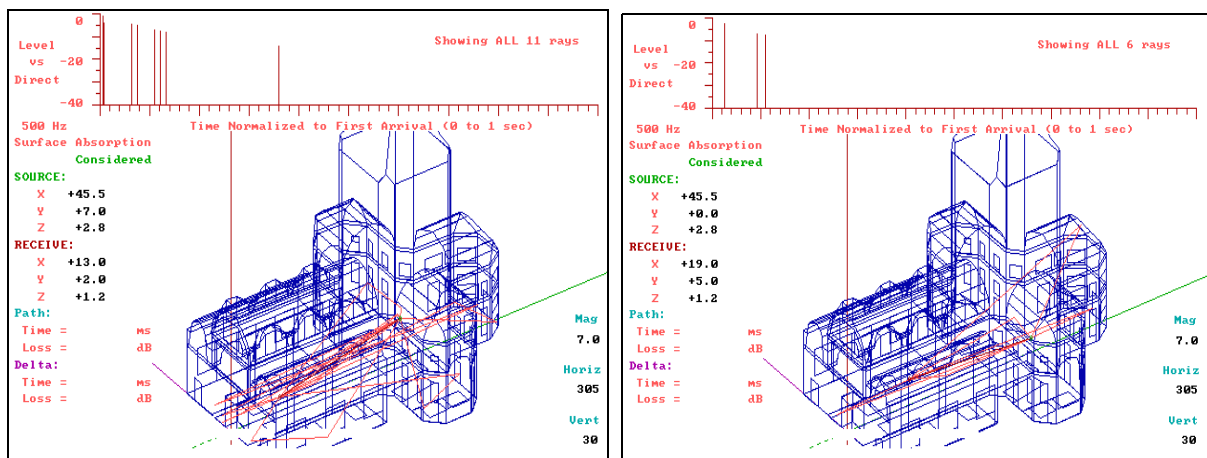
Outro local que foi revestido com painel acústico absorvente, são as paredes logo acima das cornijas (**fig. 5**). Estas paredes oferecem uma grande superfície que não se vê desde o piso, e acompanha toda a nave principal e cúpula central. Também devem ser revestidas as paredes interiores do local destinado ao coro e balcões laterais.

No Projeto de Correção Acústica, para o cálculo das curvas tonais teóricas, adotamos os coeficientes de absorção dos seguintes materiais de revestimento e mobiliário (**tab. 3**) :

Tabela 3 – Tabela de materiais (correção)

TABELA DE MATERIAIS (Correção).								
Material	Superfície (m ²)	Coeficientes de Absorção						Referência
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
Bancos de Madeira, 2/3 Ocupados	479,56	0,38	0,40	0,49	0,57	0,60	0,57	Pérez Miñana
Manta Lã de Vidro, MI 560x100mm	643,44	0,68	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	IPT

3.2 Acústica Geométrica:

**Figura 7- Acústica geométrica**

Pela análise dos gráficos de traçado dos raios sonoros (**fig. 7**) observamos que há muitos raios que chegam depois do intervalo de tempo de 100 ms, provocando eco, excesso de reverberação. Também observamos que alguns raios aparecem agrupados no início do gráfico, situação indicada como ideal para teatros, auditórios e igrejas, pois reforçam a palavra e contribuem para uma sensação de clareza do som. As reflexões atrasadas e fortes provêm em grande parte das cúpulas, parede do fundo e paredes laterais, devido à pouca absorção destes materiais. Aumentamos a absorção das paredes laterais e do fundo com a aplicação do painel absorvente já especificado. Outra importante superfície com baixa absorção é o conjunto de bancos e corredores, para onde indicamos o uso de passadeiras de tapetes.

3.3 Inteligibilidade da Palavra:

Apresentamos na **tabela 4** os valores obtidos na simulação, como os valores atingidos antes e depois de introduzidas as correções acústicas.

Observa-se que houve uma melhora expressiva nos índices mostrados na simulação, situando-se entre **15,8** no ponto 1 e **35,5** no ponto 9. A razão desta diferença entre os pontos próximos à fonte e os mais afastados, deve-se ao grande volume de ar encerrado, com muita distância entre piso e cobertura, que não podemos mudar sem descaracterizar o espaço. Como o índice AL_{cons} avalia a perda de inteligibilidade, quanto menor seja seu valor, melhor será o comportamento acústico do local.

Tabela 4- Índice AL_{cons}

	Coordenadas			Frequência (Hz)	Igreja vazia		Igreja 2/3 ocupada, depois
	X	Y	Z		Antes	Depois	
Fonte	45,5	0	2,8				
Ponto 1	39	2	1	500	51,9	18,1	15,6
				2000	35,8	15,8	13,3
Ponto 2	39	5	1	500	59,7	20,8	17,9
				2000	41,4	18,1	15,2
Ponto 3	39	10	1	500	74,9	26,8	23,0
				2000	52,7	23,3	19,4
Ponto 4	19	2	1	500	95,5	38,1	33,0
				2000	70,0	33,4	28,2
Ponto 5	19	5	1	500	95,7	38,2	33,0
				2000	70,2	33,6	28,3
Ponto 6	13	2	1	500	98,0	39,8	34,7
				2000	72,3	35,1	29,8
Ponto 7	13	5	1	500	98,1	39,9	34,8
				2000	72,4	35,2	29,8
Ponto 8	19	12	1	500	96,7	38,9	33,8
				2000	71,1	34,2	28,9
Ponto 9	13	12	1	500	98,6	40,3	35,1
				2000	72,9	35,5	30,0

3.4 Ruído de Fundo

Apresentamos aqui o resultado das medições do nível de ruído de fundo, realizadas dentro da Igreja.

Tabela 5 – Ruído de fundo medido

RUÍDO DE FUNDO									
CATEDR 02 98\06\03 21.07.30					CATEDR 01 98\06\03 23.10.12				
Freq.	OVL	Leq	Min	Max	Freq.	OVL	Leq	Min	Max
31,5Hz	0	60,1	42,9	75,8	31,5Hz	0	51,7	39,4	60,3
63Hz	0	54,7	42,3	65,5	63Hz	0	54,9	39	67,2
125Hz	0	47,3	36,7	57,1	125Hz	0	45,8	35,4	55,3
250Hz	0	40	32,9	49,2	250Hz	0	37,7	29,8	47,7
500Hz	0	33,7	27,1	43,9	500Hz	0	32,4	24,9	50,5
1,0kHz	0	29,5	24,6	37	1,0kHz	0	31,3	23,1	41,2
2,0kHz	0	25,8	22,9	30,4	2,0kHz	0	25,3	21,1	39,4
4,0kHz	0	25,2	24,1	29,1	4,0kHz	0	24,6	23,3	33,7
8,0kHz	0	27,8	27	29,3	8,0kHz	0	27,6	26,9	28,8
A-net	0	43,5	39,8	52,1	A-net	0	42,4	38,8	51

Pela observação das tabelas acima (**tab. 5**), se constata um baixo nível de ruído provocado principalmente pelo tráfego local, Leq **43,5** e **42,4** dB A. O nível de ruído é pouco percebido, especialmente nas baixas frequências. Segundo Manoel Recuero^v em “Acústica Arquitectónica”, o nível médio de ruído de uma sala de espetáculos seria de **43** dBA, pelo que consideramos bom o isolamento acústico da Catedral, sem necessidade de aumentá-lo.

4. CONCLUSÕES:

Constatamos que as alterações especificadas no projeto e executadas produziram uma melhora significativa no comportamento acústico da Catedral. A satisfação manifestada pelos fiéis usuários do Templo e pelos Párocos, com a melhora da inteligibilidade, objetivo específico de nosso trabalho, comprova o êxito de nossa intervenção.

Concluimos que com o conjunto de soluções apresentadas conseguimos um importante rebaixamento do Tempo de Reverberação, lembrando que uma Igreja deve ter um tempo de reverberação mais elevado do que outros espaços e que nossa ação é limitada pelas características do local.

Fica preservado o caráter acústico da edificação, pois o T_R permanece um pouco elevado, característica típica deste tipo de construção.

5. BIBLIOGRAFIA:

-
- ⁱ SENDRA, JJ., ZAMARREÑO, T., NAVARRO, J., ALGABA, J. (1999) *El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: Principios y propuestas para la rehabilitación*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción- Escuela Técnica Superior de Arquitectura- Universidad de Sevilla.. p 12.
 - ⁱⁱ SCHRÖEDER, M. R. (1965) New Method of Measuring Reverberation Time. *Journal of Acoustic Society of America*, nº 37, p. 409-12.
 - ⁱⁱⁱ PÉREZ MIÑANA, J. (1969) *Compendio práctico de acústica aplicada*. Barcelona: Labor. p. 239.
 - ^{iv} PEUTZ, V.M.A. (1971) Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room. *Journal Audio engineering Society*, v. 19. n... 11. p. 915.
 - ^v RECUERO, M. y GIL, C. (1992) *Acústica arquitectónica*. Madrid: Paraninfo. p. 214.

5.1 Bibliografia relacionada:

SENDRA, JJ., ZAMARREÑO, T., NAVARRO, J., ALGABA, J. (1999) *La acústica de las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción- Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Secretariado de Publicaciones- Universidad de Sevilla.

SENDRA, JJ., NAVARRO, J. (1999) *La evolución de las condiciones en las iglesias: del Paleocristiano al Tardobarroco*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción- Escuela Técnica Superior de Arquitectura- Universidad de Sevilla.

6. AGRADECIMENTOS:

Fundação Universidade - Empresa de Tecnologia e Ciências – FUNDATEC; Mitra da Arquidiocese de Porto Alegre, Padre Mello; Instituto Universitário de Ciências da Construção – IUCC, Universidade de Sevilha, Espanha; CNPq; Faculdade de Arquitetura e Urbanismo do Instituto Ritter dos Reis.