



## **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ACÚSTICO DAS IGREJAS DO SÉCULO XIX EM PORTO ALEGRE**

**F M Simões (1), D B Oliveira (2), JTF Gomes(3) P Figueiredo (4)**

(1) Prof. Dr. Arquiteto. (2) e (3) Aluno 8º semestre. FAU – Centro Universitário Ritter dos Reis - Departamento de Tecnologia. Rua Orfanotrófio, 555. Alto Teresópolis, CEP 90840-440. Porto Alegre, RS, Brasil. Fone/fax: + 55 (51) 3230-3333 – e-mail: fmsimoes@terra.com.br

(4) Atelier Sul Acústica e Arquitetura. Rua Lopo Gonçalves, 230. Cidade Baixa, CEP 90050-350. Porto Alegre, RS, Brasil. Fone/fax +55-51-3224-2321 – e-mail: pedro@figueiredo.eng.br

### **RESUMO**

Apresentamos estudo sobre o comportamento acústico das Igrejas do século XIX de Porto Alegre, RS, Brasil: Igreja Nossa Senhora das Dores (1832); Igreja Nossa Senhora da Conceição (1889) e Igreja Nossa Senhora dos Navegantes (1900). Incluímos os dados da Catedral Metropolitana (1921), obtidos em outro projeto de pesquisa. Inicialmente medimos Tempo de Reverberação das quatro Igrejas. Utilizamos modernas técnicas de análise acústica, através dos equipamentos existentes no Laboratório de Conforto Ambiental do UniRitter, de acordo com as Normas Brasileiras. Os resultados obtidos foram organizados em tabelas e gráficos para facilitar a compreensão do estudo. Utilizando programa de simulação acústica AcustaCadd, construímos modelos informáticos, calibrados com os valores do tempo de reverberação medido. Analisamos Tempo de Reverberação,  $RT_{mid}$  e Inteligibilidade. Comparamos os Volumes, Acabamentos Internos e Materiais utilizados com os resultados obtidos nas medições. Para melhor entendimento são mostrados os interiores das quatro Igrejas. Pela observação dos resultados, podemos concluir que os ornamentos arquitetônicos colaboram na obtenção de conforto acústico, e grandes volumes necessitam de investimento em tratamento acústico, utilizando materiais absorventes em paredes e forros, para obter conforto acústico. A partir das conclusões, elaboramos recomendações de projeto para obtenção de conforto acústico. (UNIRITTER, IPHAN, FAPERGS, CNPQ, BR; IUCC-US, SP)

### **ABSTRACT**

We present the study above the acoustic behavior from Churches of the 19th century of Porto Alegre, RS, Brazil: Church Our Lady from the Pains (1832); Church Our Lady from Concept (1889) and Church Our Lady from the Sailors (1900). We included the dice from Metropolitan Cathedral (1921), obtained on another research. Initially we measured the Reverberation Time from the four Churches. We use modern techniques of analysis acoustics, with equipments of the Laboratory of Environmental Comfort of the UniRitter, according to the Brazilians Standards. The outcomes obtained have been organized in tables and graphs about to facilitate the understanding of the study. By using program of acoustic simulation AcustaCadd, we build computers models, calibrated with the values of the reverberation time measured. We review Reverberation Time,  $RT_{mid}$  and Intelligibility. Compared the volumes, Finishes and Materials used with the outcomes obtained on the measurements. To best agreement are shown the interiors from the four Churches. Observing the results, we can see the architectonic ornaments collaboration on obtainment of acoustic comfort, and big ones volumes needs investment in acoustic treatment, by using absorbing materials in walls and liners, to obtain acoustic comfort. Besides the conclusion, we organize recommendations of how to obtain acoustic comfort.

## 1. INTRODUÇÃO

Neste estudo medimos o tempo de reverberação das três Igrejas remanescentes do Século XIX em Porto Alegre: Igreja Nossa Senhora das Dores (1832), Igreja Nossa Senhora da Conceição (1889) e Igreja Nossa Senhora dos Navegantes (1900). Através de levantamentos realizados no local, informações fornecidas pelo IPHAN e com os resultados obtidos através das medidas acústicas, elaboramos modelos digitais, ajustados à situação real, utilizando programa de simulação acústica AcoustaCadd, facilitado pelo IUCC, Instituto Universitário de Ciências da Construção, Universidade de Sevilha, Espanha. O programa nos indica o volume, a superfície interna total e avalia a Inteligibilidade das Palavras nestes ambientes. Incluímos os dados da Catedral Metropolitana de Porto Alegre (1921), obtidos em outro projeto de pesquisa, onde foi aperfeiçoado seu comportamento acústico. Comparando os resultados obtidos na avaliação acústica com as soluções arquitetônicas adotadas para estes locais podemos estabelecer recomendações de projeto, a serem seguidas na elaboração de projetos de arquitetura não só de igrejas como de espaços públicos de proporções semelhantes.

## 2. METODOLOGIA

Nas medições de Tempo de Reverberação utilizamos Analisador de Som em Tempo Real, modelo **NOR-110**, microfone condensador modelo **NOR-1220**, pré-amplificador **NOR-1201**, (normas IEC 651/ 804 e AINSI S.1.4) e calibrador auto compensado de precisão modelo **NOR-1251**, (norma IEC 942), todos fabricados por **Norsonic, Noruega**, e do **tipo 1**, existentes no Laboratório de Conforto Ambiental do UniRitter. Aplicamos o método do impulso integrado ou de (Schröder,1965). Produzimos um impulso de curta duração, mediante uma pequena explosão, em diferentes pontos determinados em planta baixa. A resposta ao impulso do recinto é captada através do Analisador de Som. Em cada ponto obtivemos, ao menos, duas respostas ao impulso por frequência, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 e 8.000 Hz. Posteriormente analisamos essas medidas para obtermos o tempo de reverberação médio da sala, em EDT,  $T_{20}$  e  $T_{30}$ , nas diversas frequências, para calibração dos modelos informáticos desenvolvidos no Programa de Simulação Acústica AcoustaCadd.

Realizamos também um estudo teórico da Inteligibilidade da Palavra (capacidade de entendimento por parte do ouvinte das palavras pronunciadas por um orador). Utilizamos o índice  $AI_{cons}$  (PEUTZ, 1971) implementado no programa informático utilizado. Este indicador avalia a perda da inteligibilidade das consoantes, a partir da distância emissor-receptor e do tempo de reverberação da sala. Consideramos um nível de ruído de fundo de 35 dB(A) para todas as Igrejas para efeito de comparação. A potência da fonte, 0,05 w, se ajustou para produzir, a 1 m dela, níveis acústicos semelhantes ao da voz humana, ~70dBA.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Parâmetros Geométricos e $RT_{mid}$

**Tabela 1. Parâmetros Geométricos e  $RT_{mid}$  das Igrejas Analisadas.**

	<b>Catedral</b>	<b>Conceição</b>	<b>Dores</b>	<b>Navegantes</b>
<b>Volume m<sup>3</sup></b>	35.000	2.700	7.400	4.600
<b>Superfície Total m<sup>2</sup></b>	9.600	1.400	2.800	2.300
<b>Área em planta m<sup>2</sup></b>	1.650	225	530	520
<b>V / A</b>	21,21	12,00	13,96	8,85
<b>V / S</b>	3,65	1,93	2,64	2,00
<b><math>RT_{mid}</math></b>	6,0	1,3	3,1	6,1

Na tabela 1 apresentamos os parâmetros geométricos característicos para cada igreja analisada, ou seja: o volume total interior em metros cúbicos, a superfície total interna em metros quadrados e a área útil interna, incluindo circulação, bancos e área do altar. Também apresentamos a proporção entre volume e área em planta, relacionando com o comportamento acústico. Por último apresentamos o  $RT_{mid}$ , a média do tempo de reverberação em 500 e 1.000 Hz, (CARRIÓN, 1998). A Igreja das Dores muitas vezes é utilizada para gravações musicais; para avaliarmos sua geometria SENDRA, (1999) nos indica valores ótimos de  $V/A$  de 12,2, e  $RT_{mid}$  de 2 segundos, para salas de concerto.

### 3.2 Tempo de Reverberação Medido, em EDT, T20 e T30

As medidas de Tempo de Reverberação das quatro Igrejas, EDT, T20 e T30 estão agrupadas nas figuras 1, 2 e 3, respectivamente, para melhor compararmos seus comportamentos acústicos.

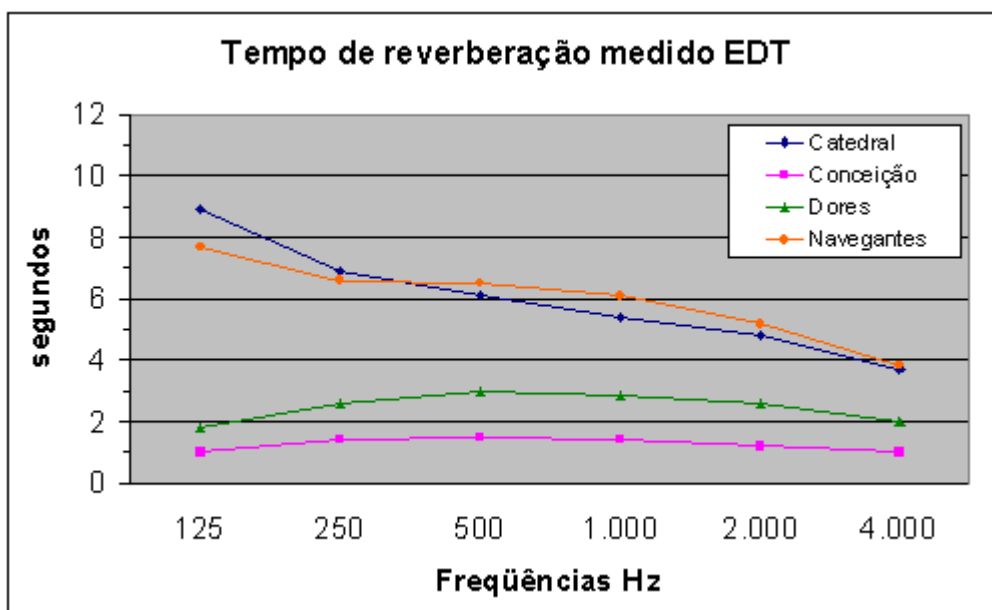


Figura 1. Tempo de Reverberação Medido, EDT.

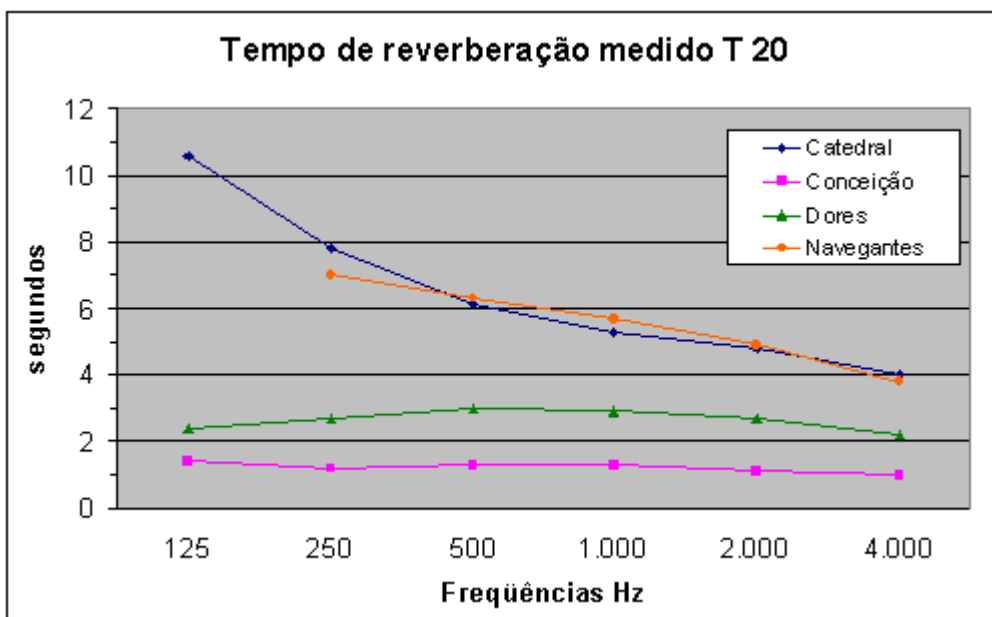


Figura 2. Tempo de Reverberação Medido, T20.

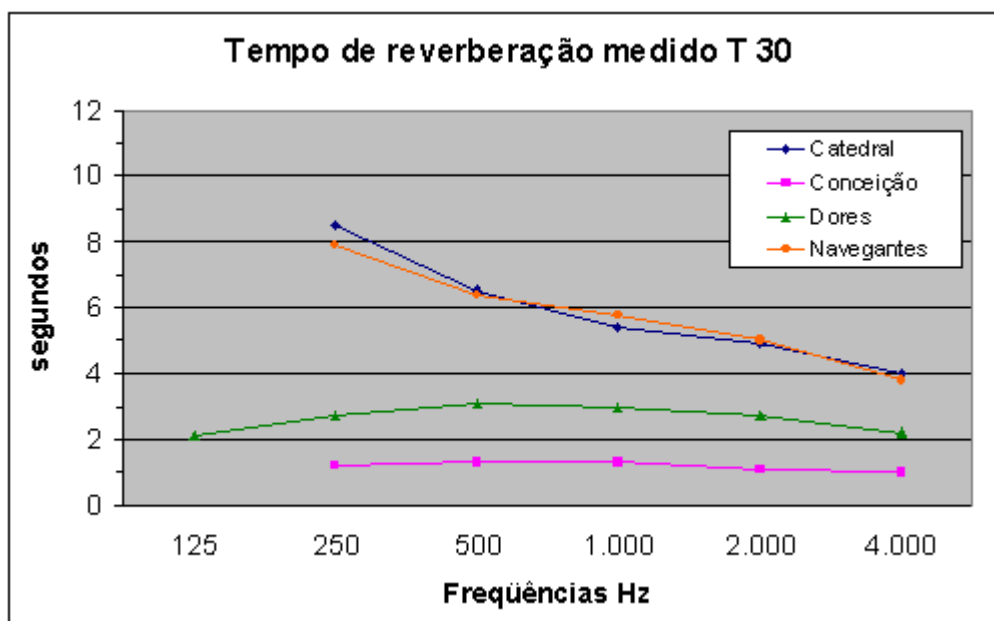


Figura 3. Tempo de Reverberação Medido, T30.

### 3.3 Inteligibilidade das Palavras

A Inteligibilidade das Palavras pode ser apreciada pelo índice  $AL_{cons}$ , que avalia a perda da inteligibilidade das consoantes, em função do tempo de reverberação, da distância entre orador e receptor e do ruído de fundo. Quanto menor o seu valor, melhor será o comportamento acústico do local. Para valores obtidos entre **0 e 5** considera-se **excelente**, para valores de **5 a 10 bom**, para valores de **10 a 15 aceitável** e **ruim** de 15 em diante, o que significa que uma perda de 0 a 10% nossa mente tem condições de suplementar o que falta, devido ao nosso conhecimento e cultura. Com perda entre 10 e 15%, já começamos a ter algum desconforto, devido ao esforço para entender o discurso. Para perdas maiores de 15%, aumenta o desconforto devido à concentração necessária para acompanhar o raciocínio do orador. Para compararmos o comportamento acústico das quatro Igrejas, simulamos o ruído de fundo em 35 dBA para todas. Na figura 11 apresentamos gráfico com os valores obtidos nas simulações, utilizando o programa Acoustacadd.

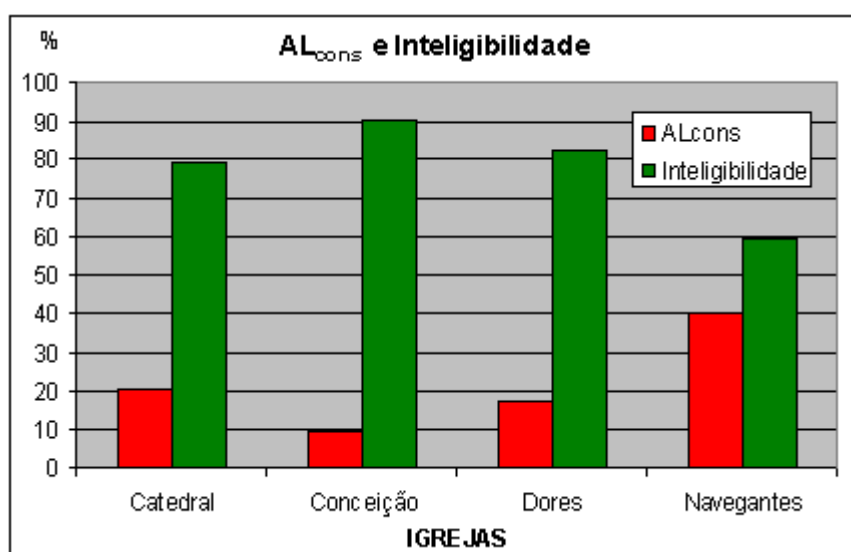


Figura 11. Gráfico de Índice Alcons e Inteligibilidade da Palavra.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Acabamentos Internos

Os materiais de revestimentos e acabamentos internos têm grande influência no comportamento acústico. Quanto mais ricos em detalhes, melhor a acústica do local. Nas seguintes figuras podemos observar os ornamentos arquitetônicos das Igrejas analisadas.

Na Catedral Metropolitana, figuras 4 e 5, foram utilizados capitéis e colunas trabalhadas, molduras, sancas, cornijas e guarnições com altos e baixos relevos, frontões e festões decorados. Nota-se ao fundo o fechamento do Coro, e logo abaixo, o quadro revestido com lã de vidro e tecido na cor marrom, para melhorar seu comportamento acústico. A abóbada de canhão em concreto prejudica seu comportamento acústico.



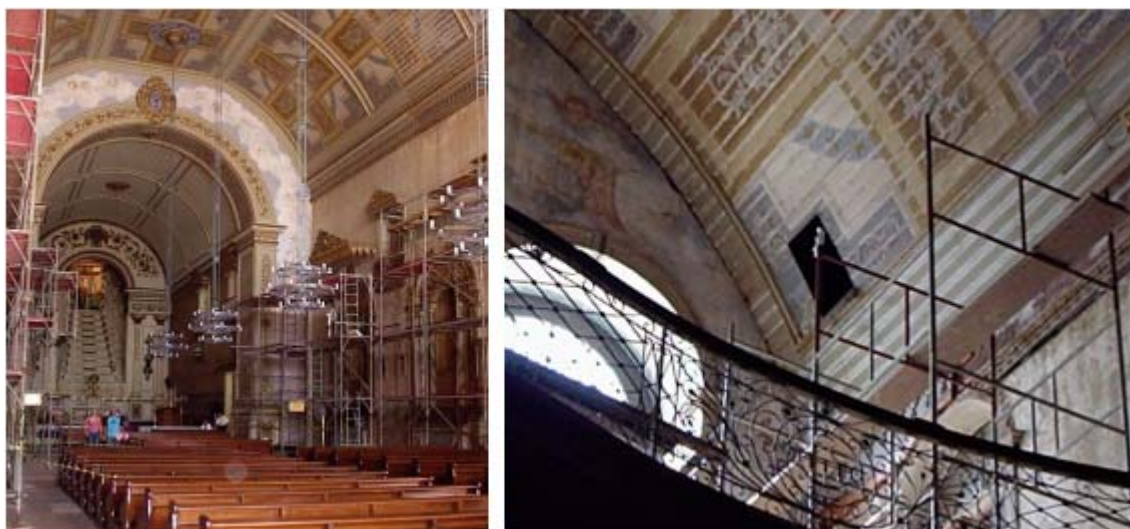
**Figuras 4 e 5. Interior da Catedral Metropolitana de Porto Alegre, Nave Principal e Altar.**

A **Igreja da Conceição**, figuras 6 e 7, também apresenta muitos ornamentos, como podemos apreciar na figura 5, sendo o forro de madeira a grande diferença entre as demais igrejas. Podemos apreciar o grande número de ornamentos, com muitos nichos e retábulos, capitéis e colunas decoradas, cornijas e cimalkas com relevos. O seu pequeno volume se reflete em baixos tempos de reverberação.



**Figuras 6 e 7. Interior da Igreja NS Conceição, Lateral e Altar.**

A **Igreja NS das Dores**, assim como a Igreja NS Conceição, possui forro em madeira, retábulos, capitéis e colunas decoradas, frontões, cornijas e cimalkhas com relevos em toda sua extensão. O volume de 7.400 m<sup>3</sup> não cria problemas acústicos, pois a riqueza de detalhes e a absorção do forro de madeira proporcionam absorção em diversas frequências. A Igreja está em obras de restauração. Segundo a administração da Igreja, muitas vezes este local é cedido para gravações musicais, devido ao seu comportamento acústico apropriado para execuções de música clássica e litúrgica, com tempo de reverberação mais alto, em torno de 3 segundos, que o encontrado em teatros e auditórios (~1 segundo) e salas de concerto (~2 segundos).



**Figuras 8 e 9. Interior da Igreja NS das Dores, Lateral e Altar.**

A **Igreja NS dos Navegantes**, por ter menos adornos, naves laterais cobertas em laje de concreto, nave principal com abobada de canhão em concreto, tem o tempo de reverberação mais alto, semelhante ao medido na Catedral, ainda que seu volume seja de 7,6 vezes menor e área 3,2 vezes menor. Este comportamento acústico é devido à ausência de ornamentos e cobertura sem absorção sonora.



**Figura 10. Interior da Igreja NS dos Navegantes, Lateral e Altar.**

A arquitetura moderna se caracteriza por sua eficiência e economia de meios, sem os ornamentos clássicos. Paredes sem relevos, ausência de molduras, cornijas e cimbalhas, refletem muito mais os sons, aumentando a reverberação do ambiente. Frontões e festões trabalhados, alizares e guarnições decorados, volutas e florões em alto relevo contribuem para uma melhor distribuição e difusão do som.

Podemos comparar a Igreja dos Navegantes, com poucos adornos arquitetônicos, com a Igreja das Dores, com muitos ornamentos e volume 1,6 vezes maior:

Igreja dos Navegantes	= 4.600 m <sup>3</sup>	Acabamento 'pobre'	RT <sub>mid</sub> = 6,1 s Regular
Igreja das Dores	= 7.400 m <sup>3</sup>	Acabamento 'rico'	RT <sub>mid</sub> = 3,1 s Bom

#### 4.2 RT<sub>mid</sub> e Inteligibilidade das Palavras

Como exemplo, podemos comparar a Igreja da Conceição, V = 2.700 m<sup>3</sup>, com a Igreja das Dores, V = 7.400 m<sup>3</sup>, e mesmo tipo de acabamento, com muitos adornos arquitetônicos. Na Igreja da Conceição atingimos RT<sub>mid</sub> de 1,3 segundos e na Igreja das Dores obtivemos um RT<sub>mid</sub> de 3,1 segundos. Lembramos que para obter bons índices de inteligibilidade da palavra o RT<sub>mid</sub> deve estar próximo a 1 segundo. Para música clássica o RT<sub>mid</sub> deve estar próximo aos 2 segundos, e para música litúrgica próximo aos 3 segundos, onde incluímos a Igreja das Dores.

Igreja da Conceição	= 2.700 m <sup>3</sup>	Mesmo tipo de acabamento Mesmo tipo de forro	RT <sub>mid</sub> = 1,3 s Ótimo
Igreja das Dores	= 7.400 m <sup>3</sup>		RT <sub>mid</sub> = 3,1 s Bom

#### 4.3 Materiais

Através da escolha adequada dos materiais de revestimento e construção, na fase de projeto, alcançamos os níveis de conforto desejado. Os materiais utilizados em obras têm características próprias, sendo que a absorção acústica deve ser observada. Para cada elemento construtivo ela é indicada pelo coeficiente  $\alpha$ , varia de 0,00 a 1,00, que por sua vez também varia de acordo com a frequência do som. Resumindo, cada material possui seis coeficientes de absorção, para 125, 250, 500, 1.000, 2.000, e 4.000 Hertz. Aplicando-se a fórmula de Sabine, obtemos o tempo de reverberação por frequência, o que deve ser feito ainda na fase de projeto.

Podemos comparar a Catedral Metropolitana com a Igreja dos Navegantes, pois ambas tem abóbada de canhão em concreto e paredes de alvenaria rebocadas.

Na Catedral, local de grande volume, foi introduzido material de absorção poroso em projeto de adequação acústica, para corrigir a inteligibilidade. O RT<sub>mid</sub> passou de 14,1 para 6,0. A Igreja dos Navegantes, ainda que tenha um volume 7,6 vezes menor e área 3,2 vezes menor que a Catedral, possui Tempo de Reverberação similar, devido à ausência de absorção acústica.

Catedral Metropolitana = 35.000 m <sup>3</sup>	Cobertura em concreto	RT <sub>mid</sub> = 6,0 s Regular
Igreja dos Navegantes = 4.600 m <sup>3</sup>		RT <sub>mid</sub> = 6,1 s Regular

## 5. CONCLUSÕES:

A importância do volume no comportamento acústico dos ambientes que criamos foi demonstrada por Sabine em 1920, criando a conhecida fórmula para determinação do tempo de reverberação:

$$TR = 0,16 x V / S x \alpha \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde:

$V = \text{Volume, em m}^3$

$S = \text{Superfície interna total, em m}^2$

$\alpha = \text{absorção média dos materiais de revestimento, de 0 a 1.}$

A partir da observação da fórmula de Sabine e dos dados coletados, podemos concluir que:

### 5.1 Volume

Volumes grandes, como o da Catedral, necessitam de investimento em tratamento acústico, com o aumento da absorção. Quanto menor o pé direito, menor o volume e mais fácil de obter conforto acústico.

### 5.2 Acabamentos

Pela observação dos resultados, podemos concluir que os ornamentos arquitetônicos colaboram na obtenção de conforto acústico. As inúmeras superfícies dos adornos, em varias posições e tamanhos, refletem os raios sonoros em diversas direções, o que aumenta a difusão do som no ambiente.

### 5.3 Materiais

Como regra geral podemos classificar os absorventes acústicos em dois grandes grupos, os absorventes porosos (para sons médios e agudos), como carpetes, cortinas, bancos estofados e revestimentos em lã de vidro, e os absorventes de placa ou membrana (para sons graves), como os forros falsos em madeira e painéis de madeira. Especialmente em grandes volumes, devemos utilizar materiais absorventes em paredes e forros, para obter conforto acústico.

### 5.4 Recomendações de Projeto

- Controlar Volume Interior e relação V/S
- Evitar Lados Paralelos
- Evitar Superfícies Côncavas
- Buscar Superfícies Convexas
- Controlar Reflexões Longas
- Utilizar Cortinas, Bancos Estofados, Carpetes e Tapetes



- Utilizar Forros com Absorção Acústica
- Controlar o Ruído Interno com Isolamento Acústico Adequado
- Controlar o Ruído Ambiental através de Planejamento Urbano

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARRIÓN Isbert. A. **Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos**. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1998. p. 224. ISBN 84.8301.252.9

PÉREZ Miñana J. **Compendio Práctico de Acústica Aplicada**. Barcelona: Labor. 1969. 239 p.

PEUTZ, V.M.A. **Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room**. Journal Audio Engineering Society, 1971. p. 915., v. 19, n. 11.

RECUERO, M. y GIL, C. **Acústica Arquitectónica**. Madrid: Paraninfo. 1992. 214 p.

SENDRA, JJ., ZAMARREÑO, T., NAVARRO, J., ALGABA, J. **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. 1999.

SENDRA, JJ., NAVARRO, J. **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, 1999.

SENDRA, JJ., ZAMARREÑO, T., NAVARRO, J., ALGABA, J. **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, 1999. 12 p.

SCHRÖEDER, M. R. **New Method of Measuring Reverberation Time**. Journal of Acoustic Society of America, 1965. n. 37, p. 409-12.

## AGRADECIMENTOS:

Mitra Arquidiocese de Porto Alegre, Padre Mello; Igreja Nossa Senhora das Dores, Padre Antônio; Igreja Nossa Senhora da Conceição, Padre Antônio Juarez de Moura Maia; Igreja Nossa Senhora dos Navegantes, Padre Remi Waldane; **FAU-UNIRITTER** - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Centro Universitário Ritter dos Reis; **IPHAN** - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional; **FAPERGS** - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul; **CNPq** - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; **IUCC** - Instituto Universitário de Ciências da Construção, Universidade de Sevilla, Espanha.