

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Civil

**ESTUDO ACÚSTICO DE IGREJAS
PORTUGUESAS
ATRAVÉS DE PARÂMETROS SUBJECTIVOS**

António Eduardo Jorge Morgado

Licenciado em Engenharia Civil
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos
requisitos do grau de mestre
em
Engenharia Civil
(Área de especialização de Construção de Edifícios)

Dissertação realizada sob a supervisão de
Professor Doutor A. P. Oliveira de Carvalho
do Departamento de Engenharia Civil
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Porto, Setembro de 1996

RESUMO

Este trabalho pretende investigar o desempenho acústico de igrejas e como este se relaciona com outros parâmetros, determinar fórmulas simples para prever parâmetros acústicos subjectivos pelo uso de dados arquitectónicos elementares, analisar no tempo a evolução das respostas acústicas das igrejas e analisar nelas a adequação do uso da música e da palavra. Este trabalho pretendeu continuar, desenvolver e aprofundar estudos já iniciados neste campo e tem a sua base em análises acústicas subjectivas em 36 igrejas portuguesas construídas nos últimos 14 séculos.

Séries de análises de Parâmetros Acústicos Subjectivos (PAS) foram feitas por auditores, pretendendo revelar as relações existentes entre aqueles e Parâmetros Arquitectónicos (PA) das igrejas e também com importantes Medidas Acústicas Objectivas (MAO). Pretende-se assim compreender diversos PAS e apresentar relações matemáticas para sua previsão através de outros parâmetros.

A avaliação dos PAS (*Clareza do discurso musical, Direccionalidade, Ecos, Envolvimento, Equilíbrio Timbrico, Intensidade, Intimidade, Reverberância, Ruído de Fundo e Impressão geral*) foi feita por testes de avaliação acústica de pequenos excertos musicais e a inteligibilidade da palavra pela audição de pequenas frases. Os PAS foram testados e comparados com os PA (*volume, área, comprimento, altura, etc.*) e com MAO (*TR, EDT, C80, D, TS, L e RASTI*).

Foi definida uma metodologia fiável e exequível para a avaliação subjectiva das características acústicas das igrejas e da respectiva inteligibilidade da palavra com formulação inovadora de listas de palavras em português, assim como avaliadas as relações PAS/PA e PAS/MAO. As principais conclusões são:

- O efeito da posição dos auditores na análise *intra-igrejas* não foi significativa nos PAS excepto para o caso da *impressão geral, direccionalidade e palavras*;
- A melhor correlação PAS/PA foi para *Intimidade:Volume Total, Intimidade e Intensidade* foram os únicos PAS onde a influência dos PA foi significativa na resposta dos auditores;
- Entre PAS e MAO a melhor correlação ocorreu entre *Eco* e *TR*. A relação *Reverberância/TR* confirmou que este é uma medida aceitável do sentido subjectivo da *Reverberância*;
- A *Reverberância* necessitou sempre de *TR* ou de *EDT* para ser explicado pelas MAO. *EDT* apareceu contudo como mais eficaz do que *TR* para explicar o comportamento da *Reverberância*;
- Os PA mais adequados para prever a inteligibilidade da palavra são a *altura da nave* e a *média da altura total*;
- As MAO mais capazes para prever o parâmetro *palavras* são o *TS* e o *TR*, com as médias das bandas de 500, 1k e 2k Hz indicando que estas são suficientes para a obtenção de uma adequada resposta;
- A quase ausência de correlação *palavras/L* indicou que a amplificação sonora provocada pelo edifício não contribui na melhoria da inteligibilidade da palavra. *C80* surgiu como um útil predictor para o parâmetro *palavras*;
- Não foi encontrada uma boa correspondência entre os valores médios de *RASTI* e *palavras*. Verificou-se que o valor do parâmetro *palavras* é cerca do dobro do valor do respectivo *RASTI* médio e definiu-se uma tabela de conversão do *RASTI* numa escala de inteligibilidade subjectiva da palavra.

ESTUDO ACÚSTICO DE IGREJAS PORTUGUESAS ATRAVÉS DE PARÂMETROS SUBJECTIVOS

ÍNDICE

	Página
RESUMO	3
PREFÁCIO	5
ÍNDICE DE QUADROS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	14
1 - FORMULAÇÃO DE OBJECTIVOS	17
1.1 - Introdução	17
1.2 - Justificação da tese	18
1.3 - Formulação da tese	18
1.4 - Bases de trabalho desenvolvido	19
1.5 - Âmbito do trabalho desenvolvido	19
1.6 - Objectivos do trabalho desenvolvido	20
1.7 - Breve descrição do trabalho	21
2 - MÉTODO	23
2.1 - Selecção da população estatística	23
2.1.1 - Selecção das igrejas	23
2.1.2 - Selecção dos auditores	25
2.1.2.1 - Critérios	25
2.1.2.2 - Rastreio auditivo	25
2.2 - Ensaios de validação e confirmação	25
2.3 - Metodologia utilizada	27
2.3.1 - Jornadas de campo	27
2.3.2 - Condições gerais	27
2.3.3 - Fontes sonoras	28
2.3.4 - Avaliação da inteligibilidade da palavra	29

2.3.4.1 - Tipo de teste	30
2.3.4.2 - Palavras utilizadas	31
2.3.4.3 - Teste e registo	33
2.3.5 - Avaliação acústica da música	34
2.3.5.1 - Tipo de teste	34
2.3.5.2 - Parâmetros da avaliação acústica	34
3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES SUBJECTIVOS	37
3.1 - Objectivos	37
3.2 - Parâmetros acústicos subjectivos	38
3.2.1 - Análise estatística global	38
3.2.2 - Correlação entre parâmetros	41
3.2.2.1 - Procedimento	41
3.2.2.2 - Análise <i>inter-igrejas</i>	41
3.2.2.2.1 - Usando todos os dados	41
3.2.2.2.2 - Usando valores médios para cada igreja	45
3.2.2.3 - Análise <i>intra-igrejas</i>	48
3.2.3 - Efeito da posição dos auditores	49
3.2.3.1 - Análise isolada para cada igreja	49
3.2.3.2 - Análise global	50
3.2.4 - Variações <i>inter</i> e <i>intra-igrejas</i>	52
3.2.4.1 - Diferenças em cada igreja (<i>intra-igrejas</i>)	52
3.2.4.2 - Diferenças entre igrejas (<i>inter-igrejas</i>)	58
3.2.5 - Efeito dos estilos arquitectónicos	66
3.2.5.1 - Análise geral	66
3.2.5.2 - Reverberância e música	70
3.3 - Sumário	71
4 - RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS E PARÂMETROS ARQUITECTÓNICOS	76
4.1 - Objectivos	76
4.2 - Parâmetros arquitectónicos	77
4.3 - Correlação linear entre parâmetros acústicos subjectivos e parâmetros arquitectónicos	77
4.4 - Modelos de previsão entre parâmetros acústicos subjectivos e parâmetros arquitectónicos	80
4.4.1 - Modelos simples	80
4.4.2 - Modelos gerais lineares	84
4.5 - Sumário	89
5 - RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS E MEDIDAS ACÚSTICAS OBJECTIVAS	91
5.1 - Objectivos	91
5.2 - Metodologia	92

5.2.1 - Medidas acústicas objectivas	92
5.2.2 - Obtenção do valor único	93
5.2.3 - Escolha do método adequado	94
5.2.4 - Análise das correlações lineares	97
5.3 - Modelos simples entre parâmetros acústicos subjectivos e medidas acústicas objectivas	99
5.4 - Modelos gerais lineares entre parâmetros acústicos subjectivos e medidas acústicas objectivas	108
5.5 - Sumário	110
6 - TESTE DE INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	121
6.1 - Objectivos	121
6.2 - Análise estatística global	122
6.3 - Correlação entre parâmetros	125
6.4 - Efeito da posição dos auditores	127
6.4.1 - Análise independente	127
6.4.2 - Análise global	129
6.5 - Variações nas igrejas	130
6.6 - Efeito dos estilos arquitectónicos	133
6.7 - Relações entre o parâmetro acústico <i>palavras</i> e parâmetros arquitectónicos	134
6.7.1 - Modelos simples	134
6.7.2 - Modelos gerais lineares	135
6.8 - Relação entre o parâmetro acústico <i>palavras</i> e medidas acústicas objectivas	138
6.8.1 - Modelos simples	138
6.8.2 - Modelos gerais lineares	142
6.9 - Relação entre o parâmetro acústico <i>palavras</i> e a medida acústica objectiva <i>RASTI</i>	143
6.10 - Sumário	147
7 - CONCLUSÕES	151
REFERÊNCIAS	157
ANEXOS	161

REFERÊNCIAS

Atal, B. S., M. R. Schroeder, and G. M. Sesser. "Subjective Reverberation Time and Its Relation To Sound Decay." Proc. of 5th Int. Congr. Acoust., v. 1b, 1965, Paper G32.

Barron, Michael. "Subjective study of British Symphony Concert Halls." Acustica 66 (1988) 1-14.

Barron, Michael and L. J. Lee. "Energy Relations in Concert Auditoria." J. Acoust. Soc. Am. 84.2 (1988) 618-628.

Beranek, Leo L. Music, Acoustics and Architecture. USA: Wiley, 1962.

Bradley, J. S. "Experience with new Auditorium Acoustic Measurements." J. Acoust. Soc. Am. 73 (1982) 2051-2058.

Carvalho, A. P. Oliveira. Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches. (Dissertation Presented to the Graduate School of the University of Florida in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy). U of Florida, December, 1994.

Cervone, Richard P. , Wei-hwa Chiang, Gary W. Siebein, Harold W. Doddington and Wilhelm K. Schwab. Subjective and Objective Evaluations of Rooms for Music. Paper presented at 121st Meeting of Ac. Soc. Am., Baltimore, May 1991.

Chiang, Wei-hwa. A Comparison among Measurements made in Acoustical Models, Measurements made in Full-size Rooms and Subjective Perceptions of Acoustical Quality of Building for Music. MS Thesis U of Florida, 1991.

Cremer, L., and H. Müller. Principles and Applications of Room Acoustics. English transl. T. J. Schultz. Vol. 1, Barking, England: Applied Science 1978.

Hook, J. L. Acoustical Variation in the Foellinger Great Hall, Krannert Center for the Performing Arts. A Master of Arch. Thesis, Univ. of Illinois, 1989.

Jordan, Vilhelm Lassen. "Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques." J. Acoust. Soc. Am. 47 (1970) 408-412.

Kamien, Roger. Music an Appreciation. NY: McGraw, 1988.

Müller, H. A. The Simple Design of Shoebox Concert Halls and their Shortcomings. Proc. Inst. of Acoust. 14.2 (1992) 9-16.

Reichardt, W., O. Abdel Alim, and W. Schmidt. "Definition und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze Zwischen Brauchbarer und Unbrauchbarer durchsichtigkeit bei Musikdarbietung." Acustica 32 (1975) 126-132.

Sabine, Wallace Clement. "Reverberation". Collected Papers on Acoustics Cambridge MA: Harvard UP, rpt. Dover 1964.

Schroeder, Manfred R. "New Method of Measuring Reverberation Time." J. Acoust. Soc. Am. 37.3 (1965) 402-419.

Schroeder, Manfred R., Gottlob, D., and Siebrasse, K. F. "Comparative Study of European Concert Halls: Correlation of Subjective Preference with Geometric and Acoustic Parameters." J. Acoust. Soc. Am. 56.4 (1974) 1195-1201.

Thiele, R. "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen." Acustica 3 (1953) 291.