

METODOLOGIA MULTI-CRITÉRIO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE ACÚSTICA EM IGREJAS

JOSÉ PEDRO GOMES LOUREIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus pais

“Dubium sapientiae initium”
(A dúvida é a origem da sabedoria)
René Descartes

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador, Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela disponibilidade e paciência assim como pelo interesse demonstrado no sucesso deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de curso, que tive o prazer de conhecer ao longo do meu percurso académico, assim como aos meus amigos de longa data. Agradeço ainda ao Artur Castro pela disponibilidade e ensinamentos sobre o Visual Basic.

Sentidos agradecimentos à Rebecca, por todo o apoio e motivação que me deu ao longo deste etapa final do Mestrado Integrado.

Agradeço ainda à minha família, com especial atenção aos meus pais, que me proporcionaram a incursão no Ensino Superior e sem os quais não poderia ter atingido sucesso escolar.

RESUMO

Este trabalho pretende continuar os estudos já desenvolvidos no âmbito do Programa de Investigação “Acústica de Igrejas” realizado pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, agora na proposta e aplicação de uma metodologia de avaliação multi-critério da qualidade acústica existente nas igrejas.

A premissa inicial para este estudo é que o conforto acústico global numa igreja, do ponto de vista do auditor, pode ser quantificado num índice único a partir de parâmetros acústicos subjectivos, objectivos e até mesmo a partir de parâmetros arquitectónicos. Para tal aplicou-se a metodologia multi-critério de modo a desenvolver um algoritmo que permita estabelecer uma quantificação da *Qualidade Acústica em Igrejas* (QAI). Uma igreja deverá possuir propriedades acústicas que possibilitem uma boa inteligibilidade da *palavra* e uma boa percepção da *música*, o que requer diferentes exigências. A *palavra* e a *música* constituem os dois *critérios de avaliação* sobre os quais o método multi-critério se baseou para a definição do algoritmo pretendido.

Faz-se uma exposição prévia da metodologia multi-critério, explicando conceitos fundamentais assim como vários passos do processo. De modo a quantificar a qualidade acústica numa igreja foram usados como *atributos* parâmetros acústicos subjectivos de modo a traduzir a percepção que o auditor tem do comportamento acústico numa igreja. Foi desenvolvido um algoritmo com base no método multi-critério aditivo simples, que tem como base a agregação dos valores dos parâmetros acústicos subjectivos considerados, sendo cada valor pesado de acordo com a importância que cada parâmetro assume no desempenho acústico da igreja. Utilizando o método proposto consegue-se quantificar um valor único caracterizador da Qualidade Acústica da Igreja (QAI), calculado em função dos valores dos parâmetros acústicos subjectivos registados.

Em geral, os parâmetros acústicos subjectivos não estão disponíveis, visto a sua difícil determinação, tendo-se apenas os dados relativos aos parâmetros acústicos objectivos e/ou aos parâmetros arquitectónicos numa igreja. Foi portanto necessário estabelecer a partir destes, modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos.

Foi testado o algoritmo proposto assim como os modelos de previsão considerados para o cálculo dos parâmetros acústicos subjectivos, usando os valores médios para cada parâmetro para cada igreja. Foi desenvolvida uma ferramenta *software*, que permite ao utilizador calcular a Qualidade Acústica da Igreja e também possibilita determinar os valores dos parâmetros acústicos subjectivos usando os modelos de previsão considerados.

Cumpriu-se o objectivo proposto, obtendo-se um algoritmo adequado, que se revela como uma alternativa eficiente, estabelecendo um compromisso equilibrado entre os dois critérios de avaliação considerados (*palavra* e *música*), de acordo com a sua relevância para o comportamento acústico das igrejas. Também foi possível determinar qual os melhores modelos de previsão propostos no cálculo de QAI.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Igrejas, multi-critério, parâmetros acústicos, parâmetros arquitectónicos.

ABSTRACT

This work further develops the undergoing research study in “Church Acoustics” that is being developed by the Laboratory of Acoustics of the Faculty of Engineering of the University of Porto. This work focuses on the multi-criteria evaluation of the acoustic quality in churches.

The purpose of this research is to develop an algorithm that can translate the acoustic feeling transmitted to the receptor and that is able to quantify the Acoustic Quality of a Church in a single index using either acoustic or architectural parameters. In order to do so, a Multi-criteria method was used. A church must possess acoustic properties that promote good speech intelligibility as well as good music perception, which require different conditions. Therefore, the two evaluation criteria chosen were the acoustic behavior of the church towards *music* and towards *speech*.

To allow the reader a more comprehensive view of this work, the Multi-criteria process is thoroughly explained throughout the work. In order to quantify the Church Acoustic Quality index, subjective acoustic parameters were used so that the receptor’s perception of the acoustic behavior can be adequately translated. Using the Multi-criteria method, the subjective acoustic parameters considered fit were associated with weight factors, whose value was calculated according to the relevance of each parameter in the acoustic behavior of the church. An algorithm was successfully developed, capable of calculating the global Acoustic Quality of a Church.

For most situations, the values for the subjective acoustic parameters are not available, due to their complex determination. Therefore, prediction models are necessary to use this method. These use objective acoustic parameters as well as architectural parameters to calculate the subjective acoustic parameters.

The presented algorithm and the prediction models were tested in order to validate and better understand them. A small software tool was developed, which allows to calculate the Church Acoustic Quality index, as well as to calculate the subjective acoustic parameters by using the prediction models considered.

The main goal of this work was successfully achieved. The proposed method and subsequent algorithm prove to be an efficient alternative, capable of an adequate analysis of the acoustic behavior of churches.

KEYWORDS: Acoustics, Multi-criteria, Churches, Acoustic parameters, Architectural parameters.

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|-----|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | v |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. EVOLUÇÃO DAS IGREJAS | 1 |
| 1.2. FORMULAÇÃO DE OBJECTIVOS | 2 |
| 1.2.1. JUSTIFICAÇÃO DA TESE | 2 |
| 1.2.2. BASES DO TRABALHO DESENVOLVIDO | 2 |
| 1.2.3. OBJECTIVOS DO TRABALHO DESENVOLVIDO | 3 |
| 1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO | 3 |
| | |
| 2. METODOLOGIA | 5 |
| 2.1. SELECÇÃO DA POPULAÇÃO ESTATÍSTICA | 5 |
| 2.1.1. SELECÇÃO DAS IGREJAS | 5 |
| 2.1.2. AUDITORES | 12 |
| 2.1.3. EMISSÃO E EQUIPAMENTO | 12 |
| 2.2. PROCEDIMENTO | 13 |
| 2.2.1. DESCRIÇÃO BREVE DA METODOLOGIA | 13 |
| 2.2.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJECTIVOS | 13 |
| 2.2.3. MÉTODO RASTI | 15 |
| 2.2.4. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS | 17 |
| 2.2.4.1. Nota prévia | 17 |
| 2.2.4.2. Avaliação da acústica da música | 17 |
| 2.2.4.3. Avaliação subjectiva da inteligibilidade da palavra | 19 |
| | |
| 3. DADOS ACÚSTICOS | 21 |
| 3.1. OBJECTIVOS | 21 |
| 3.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS | 21 |
| 3.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJECTIVOS | 21 |
| 3.2.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.2.1. Avaliação da acústica para a palavra | 25 |
| 3.2.2.2. Avaliação da acústica para a música | 26 |
| 3.3. CONCLUSÕES | 28 |
| | |
| 4. MÉTODO MULTI-CRITÉRIO | 29 |
| 4.1. INTRODUÇÃO | 29 |
| 4.2. DEFINIÇÃO E TERMOS FUNDAMENTAIS | 30 |
| 4.3. FORMALIZAÇÃO | 32 |
| 4.3.1. MODELO FORMAL | 32 |
| 4.3.2. NORMALIZAÇÃO | 34 |
| 4.3.3. DECISÕES MULTIATRIBUTO | 35 |
| 4.4. METODOLOGIA | 37 |
| 4.4.1. INTRODUÇÃO | 37 |
| 4.4.2. ANÁLISE PRELIMINAR | 37 |
| 4.4.3. MÉTODO ADITIVO SIMPLES | 37 |
| 4.5. APLICAÇÃO (EXEMPLO PRÁTICO) | 38 |
| 4.6. JUSTIFICAÇÃO DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MULTI-CRITÉRIO | 42 |
| | |
| 5. MÉTODO MULTI-CRITÉRIO EM ACÚSTICA DE IGREJAS | 43 |
| 5.1. OBJECTIVOS | 43 |
| 5.2. REQUISITOS PARA UM COMPORTAMENTO ACÚSTICO ADEQUADO | 43 |
| 5.3. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO | 44 |
| 5.4. DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS | 45 |
| 5.5. MÉTODO MULTI-CRITÉRIO ADITIVO SIMPLES | 47 |
| 5.5.1. TRATAMENTO DE DADOS | 47 |
| 5.5.2. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO MULTI-CRITÉRIO | 50 |
| | |
| 6. MODELOS DE PREVISÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS | 57 |
| 6.1. INTRODUÇÃO | 57 |
| 6.2. MODELOS DE PREVISÃO PARA PARÂMETRO ACÚSTICO SUBJECTIVO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA PALAVRA | 58 |
| 6.2.1. PALAVRA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETRO ACÚSTICO SUBJECTIVO E PARÂMETRO ACÚSTICO OBJECTIVO | 58 |

| | |
|--|-----------|
| 6.2.2. PALAVRA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETRO ACÚSTICO SUBJECTIVO E PARÂMETROS ARQUITECTÓNICO | 59 |
| 6.2.3. PALAVRA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETRO ACÚSTICO SUBJECTIVO, PARÂMETROS ARQUITECTÓNICOS E PARÂMETRO ACÚSTICO OBJECTIVO | 60 |
| 6.3. MODELOS DE PREVISÃO PARA PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MÚSICA..... | 61 |
| 6.3.1. MÚSICA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS E PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJECTIVOS | 61 |
| 6.3.2. MÚSICA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS E PARÂMETROS ARQUITECTÓNICOS .. | 65 |
| 6.4. CONCLUSÕES..... | 65 |
| | |
| 7. APLICAÇÃO DO MÉTODO MULTI-CRITÉRIO PROPOSTO . | 69 |
| | |
| 7.1. CÁLCULO DA QUALIDADE ACÚSTICA DA IGREJA | 69 |
| 7.1.1. NOTA PRÉVIA | 69 |
| 7.1.2. AVALIAÇÃO IN SITU | 69 |
| 7.1.3. MODELOS DE PREVISÃO..... | 71 |
| 7.4. ANÁLISE DE RESULTADOS | 73 |
| 7.5. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE CÁLCULO..... | 81 |
| | |
| 8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... | 83 |
| 8.1. CONCLUSÕES | 83 |
| 8.2. PISTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... | 86 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Fotografias das 13 igrejas em estudo | 6 |
| Figura 2.2 – Localizações esquemáticas dos microfones (X) e das fontes sonoras (S) nas igrejas para avaliação dos parâmetros acústicos objectivos | 15 |
| Figura 2.3 – Localizações esquemáticas do receptor (X) e da fonte sonora (S) nas igrejas para avaliação do parâmetro acústico objectivo $RASTI$ | 17 |
| Figura 2.4 – Localizações esquemáticas dos auditores (X) e dos emissores (S) nas igrejas para avaliação dos parâmetros acústicos subjectivos | 19 |
| Figura 2.5 – Localizações esquemáticas dos auditores (X) e do emissor (S) nas igrejas para avaliação do parâmetro acústico subjectivo $P80$ | 20 |
| Figura 4.1 – Distribuição de atributos e dos sub-atributos associados aos critérios de avaliação escolhidos para o exemplo de selecção de um carro | 31 |
| Figura 4.2 – Alternativa z_a domina os restantes atributos | 35 |
| Figura 4.3 – Alternativa z_a é eficiente, não sendo dominada | 36 |
| Figura 4.4 – Alternativa z_a não é dominada por z_d ou z_c mas é dominada convexamente por essas .. | 36 |
| Figura 5.1 – Esquema tipo da metodologia aplicada para a determinação e tratamento dos atributos associados ao critério de avaliação c_1 (qualidade da <i>palavra</i>) | 51 |
| Figura 5.2 – Esquema tipo da metodologia aplicada para a determinação e tratamento dos atributos associados ao critério de avaliação c_2 (qualidade da <i>música</i>) | 51 |
| Figura 5.3 – Representação gráfica da relação entre o parâmetro acústico subjectivo <i>Impressão Geral</i> e <i>Avaliação MMC</i> para o critério de avaliação c_2 (<i>música</i>), com curva de ajuste polinomial | 53 |
| Figura 6.1 – Esquema enunciativo dos modelos de previsão a adoptar para a previsão dos parâmetros acústicos subjectivos | 58 |
| Figura 6.2 – Representação gráfica da relação <i>Palavras</i> ($P80$) vs. $RASTI$ (<i>Altar</i>), com curva de ajuste quadrática (Lencastre, 1998). | 59 |
| Figura 6.3 – Gráficos de dispersão para as relações entre os parâmetros acústicos objectivos (Carvalho, 1994) | 63 |
| Figura 6.4 – Esquema tipo da metodologia aplicada para a determinação e tratamento dos atributos associados ao critério de avaliação c_1 (qualidade da <i>palavra</i>) – considerando ou não o uso de modelos de previsão (1,2 e 3)..... | 66 |
| Figura 6.5 – Esquema tipo da metodologia aplicada para a determinação e tratamento dos atributos associados ao critério de avaliação c_2 (qualidade da <i>música</i>) – considerando ou não o uso de modelos de previsão (1 e 2)..... | 66 |
| Figura 7.1 – Distribuição da classificação QAI (escala subjectiva) para as igrejas em estudo | 78 |
| Figura 7.2 – Alternativa z_2 domina as restantes alternativas | 79 |
| Figura 7.3 – Distribuição da classificação QAI (escala numérica 0 a 1) para as igrejas em estudo | 80 |

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1 – Lista de igrejas estudadas | 9 |
| Quadro 2.2 – Estilos arquitectónicos das igrejas (Morgado, 1996) | 10 |
| Quadro 2.3 – Descrição dos treze parâmetros arquitectónicos considerados..... | 10 |
| Quadro 2.4 – Valores dos parâmetros arquitectónicos para as igrejas em estudo (Lencastre, 1998) . | 11 |
| Quadro 2.5 – Tabela de conversão do valor do RASTI numa escala subjectiva de inteligibilidade da palavra | 16 |
| Quadro 3.1 – Valores médios dos parâmetros acústicos objectivos para as bandas de frequência de 500 e 1k Hz (Carvalho, 1994)..... | 22 |
| Quadro 3.2 – Dados estatísticos simples dos parâmetros acústicos objectivos usando os dados médios para cada igreja para as bandas de frequência de 500 e 1k Hz (usando 13 valores = médias 13 igrejas) | 22 |
| Quadro 3.3 – Valores médios para o parâmetro acústico subjectivo P80 (escala de 0 a 80) (Lencastre, 1998)..... | 25 |
| Quadro 3.4 – Dados estatísticos simples do parâmetro acústico subjectivo P80 usando os dados médios para cada igreja (usando 13 valores = médias de 13 igrejas)..... | 26 |
| Quadro 3.5 – Valores médios dos parâmetros acústicos subjectivos (escala 1 a 7)..... | 26 |
| Quadro 3.6 – Dados estatísticos simples dos parâmetros acústicos subjectivos usando os valores médios para cada igreja (usando 13 valores = médias de 13 igrejas)..... | 27 |
| Quadro 4.1 – Representação de MD na forma tabular | 33 |
| Quadro 4.2 – Valores dos sub-atributos (a_{ij}) para as alternativas (z_i) possíveis | 38 |
| Quadro 4.3 – Valores dos atributos (a_i) para as alternativas (z_i) possíveis | 39 |
| Quadro 4.4 – Escala de conversão para a normalização dos sub-atributos associados | 39 |
| Quadro 4.5 – Escala de conversão para a normalização dos atributos a_3 (potência) e a_4 (cilindrada) | 40 |
| Quadro 4.6 – Valores normalizados dos sub-atributos (0 a 1)..... | 40 |
| Quadro 4.7 – Valores dos pesos atribuídos aos sub-atributos (0 a 1)..... | 41 |
| Quadro 4.8 – Valores normalizados dos atributos associados (0 a 1)..... | 41 |
| Quadro 4.9 – Valores dos pesos atribuídos aos atributos associados (0 a 1)..... | 41 |
| Quadro 4.10 – Classificação das alternativas | 42 |
| Quadro 5.1 – Coeficientes de correlação ($ R $) entre parâmetros acústicos subjectivos (usando as médias dos dados para cada igreja), (Morgado, 1996) | 46 |
| Quadro 5.2 – Quadro com as indicações fornecidas aos auditores para preenchimento do teste de avaliação acústica subjectiva à música nas igrejas (Morgado, 1996) | 48 |
| Quadro 5.3 – Escala de conversão para a normalização ($_N$) dos atributos originais | 49 |
| Quadro 5.4 – Valores médios normalizados para os atributos para cada igreja (escala 0 a 1) | 50 |

| | |
|--|----|
| Quadro 5.5 – Valores dos pesos ($\omega_{2,j}$) atribuídos aos atributos associados ao critério de avaliação (c_2) para a qualidade da música..... | 53 |
| Quadro 5.6 – Hipóteses (h_i) propostas para a quantificação dos pesos atribuídos aos atributos associados | 54 |
| Quadro 5.7 – Pesos atribuídos aos atributos associados | 55 |
| Quadro 6.1 – Coeficientes de correlação ($ R $) entre parâmetros acústicos objectivos (usando as médias dos dados para cada igreja) (Carvalho, 1994) | 63 |
| Quadro 6.2 – Modelos gerais lineares entre os parâmetros acústicos subjectivos e os parâmetros acústicos objectivos usando os dados médios de cada igreja calculados em função das bandas de frequência de 500 e 1K Hz | 64 |
| Quadro 6.3 – Modelos gerais lineares entre os parâmetros acústicos subjectivos e os parâmetros arquitectónicos..... | 65 |
| Quadro 6.4 – Modelos de previsão para o parâmetro P80 | 67 |
| Quadro 7.1 – Valores normalizados dos atributos (parâmetros acústicos subjectivos) medidos <i>in situ</i> (0 a 1)..... | 70 |
| Quadro 7.2 – Classificação para a Qualidade Acústica de Igrejas (QAI) segundo a metodologia multi-critério, usando os valores medidos <i>in situ</i> (0 a 1) | 70 |
| Quadro 7.3 – Combinações possíveis dos três métodos de cálculo considerados para os parâmetros acústicos subjectivos para o cálculo de QAI | 71 |
| Quadro 7.4 – Valores dos atributos calculados segundo os diferentes modelos de previsão (1, 2 e 3) | 72 |
| Quadro 7.5 – Valores normalizados (escala 0 a 1) dos atributos calculados segundo os diferentes modelos de previsão..... | 72 |
| Quadro 7.6 – Classificação para a Qualidade Acústica de Igrejas (QAI) (0 a 1) segundo a metodologia multi-critério em função dos quatro métodos de cálculo | 73 |
| Quadro 7.7 – Somatório das diferenças registadas (para as 13 igrejas testadas) na Qualidade Acústica de Igrejas (QAI) (0 a 1) para os quatro métodos de cálculo face aos valores <i>in situ</i> , segundo a metodologia multi-critério | 74 |
| Quadro 7.8 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério de acordo com os valores avaliados <i>in situ</i> | 75 |
| Quadro 7.9 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério segundo o método de cálculo (1)..... | 75 |
| Quadro 7.10 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério segundo o método de cálculo (2)..... | 76 |
| Quadro 7.11 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério segundo o método de cálculo (3.1)..... | 76 |
| Quadro 7.12 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério segundo o método de cálculo (3.2)..... | 77 |

Quadro 7.13 – Tabela de conversão do valor de QAI numa escala subjectiva de interpretação do resultado obtido 77

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- ABSO_TOT – Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total (m^2)
- AREA_NAV – Área da Nave (m^2)
- AREA_TOT – Área Total (m^2)
- C80 – Claridade (dB) (parâmetro acústico objectivo)
- CABSO_ME – Coeficiente de Absorção Sonora Médio de todas as superfícies
- CLA – Clareza do discurso musical (parâmetro acústico subjectivo)
- D – Definição (parâmetro acústico objectivo)
- DIR – Direccionalidade (parâmetro acústico subjectivo)
- ECO – Eco (parâmetro acústico subjectivo)
- EDT – Tempo de decaimento curto (s) (parâmetro acústico objectivo)
- ENV – Envolvimento (parâmetro acústico subjectivo)
- EQT – Equilíbrio tímbrico (parâmetro acústico subjectivo)
- G – Intensidade Sonora (dB) (parâmetro acústico objectivo)
- H_MAX – Altura Máxima (m)
- H_MEDTOT – Altura média total (m) (= Volume Total / Área Total)
- H_NAV – Altura da Nave (m)
- IMPG – Impressão geral (parâmetro acústico subjectivo)
- INTM – Intimidade (parâmetro acústico subjectivo)
- INTS – Intensidade do som (parâmetro acústico subjectivo)
- L_MAX – Comprimento Máximo (m)
- L_NAV – Comprimento da Nave (m)
- LARG_MED – Largura média (m)
- LARG_NAV – Largura da Nave (m)
- P80 - Número de palavras entendidas numa lista de 80 palavras (parâmetro acústico subjectivo)
- QAI – Qualidade Acústica de Igreja (índice numérico)
- RASTI - Rapid Speech Transmission Index (parâmetro acústico objectivo)
- REV – Reverberância (parâmetro acústico subjectivo)
- RF – Ruído de fundo (parâmetro acústico subjectivo)
- RT – Tempo de reverberação (s) (parâmetro acústico objectivo)
- STI - Speech Transmission Index (parâmetro acústico objectivo)
- TS – Tempo central (ms) (parâmetro acústico objectivo)

VOL_NAVES – Volume da Nave (m³)

VOL_TOT – Volume Total (m³)

1

INTRODUÇÃO

1.1. EVOLUÇÃO DAS IGREJAS

A Igreja Católica ao longo dos tempos foi alvo de várias reformas, tendo havido importantes modificações na liturgia e nos serviços religiosos que provocaram indirectamente fortes impactos no desempenho acústico das igrejas.

O latim foi a língua “oficial” dos serviços religiosos (ou de parte significativa destes) da Igreja do século IV até meados do século XX. Sendo as congregações em geral ignorantes do latim, a inteligibilidade da palavra era descurada, não havendo uma preocupação relevante para manter condições acústicas adequadas no interior das igrejas. Em 1965 o Concílio Vaticano Segundo¹ instaurou que todos os serviços deviam ser praticados na língua local e que as congregações deviam participar nos cânticos, dando assim maior importância à participação dos fiéis nas celebrações litúrgicas. Estas profundas mudanças no discurso e na música implicaram uma necessidade de condições acústicas mais adequadas.

A grande maioria das igrejas hoje existentes data de antes desse Segundo Concílio do Vaticano, revelando-se hoje algo desajustadas, face aos requisitos agora considerados necessários para um bom desempenho acústico. Uma igreja deve possuir propriedades acústicas que possibilitem um discurso perceptível e uma reverberação e claridade adequadas à música. Isto constitui um dos maiores problemas na temática de acústica de igrejas, pois *palavra* e *música* requerem diferentes exigências, o que torna complexa a obtenção de um adequado comportamento acústico global numa igreja. Existe assim uma procura de compromisso entre estes dois aspectos, tentando maximizar cada um deles e conseqüentemente a impressão geral da acústica nas igrejas (esta questão será desenvolvida mais aprofundadamente adiante).

Além disso as igrejas católicas possuem na sua generalidade traços arquitectónicos muito característicos que tendem a contribuir para um mau desempenho acústico tais como tectos altos, grandes volumes interiores, assim como pequenos espaços acoplados ao corpo principal da igreja (pequenas capelas, por exemplo). Tudo isto tende a causar problemas de cariz acústico.

Um dos métodos mais utilizados na tentativa de aumentar a inteligibilidade da palavra e a boa percepção da música passa nas últimas dezenas de anos, pelo uso de sistemas de amplificação sonora. No entanto, o uso de tais soluções não garante a resolução do problema (por vezes até o agrava), daí a necessidade de ter

¹ Foi aberto sob o papado de João XXIII em 1962 e terminado sob o papado de Paulo VI em 1965. Nestes três anos se discutiu e regulamentou vários temas da Igreja católica (sítio 1).

em consideração outros factores, tais como o arranjo físico e a localização do coro e dos músicos ou o tipo de materiais usados na área envolvente a estes.

Pode-se assim constatar que as igrejas apresentam uma grande problemática face à acústica, apresentando condições únicas que criam uma necessidade de melhor perceber os diferentes aspectos da acústica de igrejas.

1.2. FORMULAÇÃO DE OBJECTIVOS

1.2.1. JUSTIFICAÇÃO DA TESE

A acústica representa um domínio de importância vital na construção, sendo essencial um bom comportamento acústico para o conforto e qualidade global de um edifício. Esta tem vindo a assumir um peso maior como uma especialidade autónoma, embora ainda não seja prática corrente em Portugal realizar estudos aprofundados sobre esta matéria no desenvolvimento de novos projectos. Porém, para obras cuja qualidade acústica inerente é de grande importância, tais como auditórios ou salas de espectáculo, realizam-se já estudos acústicos. Esta realidade não se reflecte ainda no caso de igrejas, salvo honrosas excepções (caso, por exemplo, da Igreja da Santíssima Trindade, inaugurada em 2007 em Fátima).

Para avaliação das propriedades acústicas de uma igreja eram usados tradicionalmente métodos desenvolvidos para caracterizar outro tipo de edifícios (auditórios, salas de espectáculo, etc.) tais como os propostos por Beranek ou Ando, que só por si são insuficientes. As igrejas católicas possuem um carácter acústico muito específico, de concretização e avaliação difíceis, que se deve principalmente à necessidade de satisfazer simultaneamente boas condições para a expressão da palavra e da música. A isto acresce a dificuldade dos requisitos arquitectónicos normalmente impostos por este tipo de construção tais como o volume interior e a altura do edifício.

A Acústica de Edifícios, apesar de ter vindo a assumir um papel maior na construção actual, tornando-se uma parte cada vez mais relevante da fase de projecto ou em casos de reabilitação, não é ainda genérica e devidamente aplicada no estudo/concepção de igrejas. Existe assim uma necessidade actual de estudar o ambiente acústico e desenvolver métodos para caracterizar a qualidade acústica existente numa igreja.

Justifica-se assim o estudo realizado devido à pouca pesquisa dedicada à acústica de igrejas, ao que acresce o facto de este tipo de espaço ser usado cada vez mais como uma alternativa para realização de espectáculos e concertos, para além de local de oração.

1.2.2. BASES DO TRABALHO DESENVOLVIDO

Este trabalho pretende continuar os estudos já desenvolvidos no âmbito do Programa de Investigação “Acústica de Igrejas” realizado pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, apoiando-se primariamente em trabalhos anteriores (Carvalho, 1994; Morgado, 1996; Lencastre, 1998), analisando agora uma área mais específica, nomeadamente na avaliação multi-critério da qualidade acústica existente nas igrejas.

A. P. Oliveira de Carvalho em 1994 realizou medições acústicas objectivas que foram depois relacionadas com a arquitectura das igrejas, no âmbito da tese *“Influence of Architectural Features and Styles on*

Various Acoustical Measures in Churches” (Carvalho, 1994). Este trabalho teve início em 1992, sendo estudadas para este efeito 41 igrejas espalhadas por todo o País.

No seguimento desse trabalho, na tese “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos*”, António Morgado complementou o estudo previamente realizado relacionando as medições acústicas objectivas com ensaios de parâmetros acústicos subjectivos em 36 igrejas das 41 previamente estudadas. Foram usados dois ensaios acústicos subjectivos, um teste de avaliação acústica (através da música) e um teste de inteligibilidade da palavra (Morgado, 1996).

Em 1998, Margarida Lencastre, na tese “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*”, analisou e quantificou a variabilidade da inteligibilidade da palavra em igrejas de modo a obter relações justificativas dessa variabilidade, estudando 31 igrejas, localizadas no Norte de Portugal (Lencastre, 1998).

Através da consulta e análise de elementos bibliográficos de trabalhos anteriores, relativamente ao uso de parâmetros acústicos adequados para a caracterização dos aspectos mais significativos da acústica de igrejas, pretende-se continuar a aprofundar a capacidade de análise da Acústica de igrejas.

1.2.3. OBJECTIVOS DO TRABALHO DESENVOLVIDO

A premissa inicial para este estudo é que o conforto acústico global numa igreja, do ponto de vista do auditor, pode ser quantificado (ou previsto) num índice único a partir de parâmetros acústicos subjectivos, objectivos e até mesmo a partir de parâmetros arquitectónicos. Pretende-se assim provar que é possível desenvolver um algoritmo de avaliação multi-critério do conforto acústico das igrejas, que seja fiável e facilmente aplicável. Pretende-se assim chegar a um método de quantificação da Qualidade Acústica em Igrejas que consiga avaliar correctamente a *palavra* e a *música* e a sua influência na percepção final do som.

Espera-se assim que através da metodologia de análise multi-critério se possa contribuir para uma melhor compreensão do comportamento acústico das igrejas.

1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO

No âmbito deste estudo de investigação sobre a avaliação do desempenho acústico das Igrejas foram estudadas treze igrejas portuguesas, localizadas no Norte de Portugal, sendo representativas de vários estilos arquitectónicos existentes desde o século XII. A informação necessária para a realização deste trabalho condicionou a escolha das igrejas, sendo estes treze locais os únicos sobre os quais havia sido recolhida toda a informação necessária. Recolheu-se os dados disponibilizados em trabalhos anteriores, referentes nomeadamente a parâmetros acústicos objectivos (Carvalho, 1994), parâmetros acústicos subjectivos (Morgado, 1994) e à avaliação subjectiva da inteligibilidade da palavra (Lencastre, 1998).

No capítulo 2 apresentam-se as igrejas consideradas neste trabalho, assim como a metodologia aplicada no estudo destas, ou seja, os parâmetros avaliados, os métodos usados e quais as considerações feitas nas suas medições.

No capítulo 3 apresenta-se a caracterização dos parâmetros acústicos utilizados no âmbito deste estudo, sendo realizada uma análise prévia destes.

Para o capítulo 4, precedente à aplicação do método multi-critério, fez-se uma exposição prévia deste, explicando conceitos fundamentais assim como vários passos do processo, de modo a ajudar o leitor a entender a aplicação do método.

Será exposto no capítulo 5 a parte fulcral deste trabalho, sendo aplicado a metodologia multi-critério de modo a determinar um algoritmo que estabeleça uma quantificação da Qualidade Acústica numa Igreja.

No capítulo 6 estuda-se a relação entre os parâmetros acústicos subjectivos e os parâmetros acústicos objectivos assim como com os parâmetros arquitectónicos de modo a poder estabelecer modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos. Estes revelaram-se necessários de modo a permitir o utilizador adquirir todos os dados necessários para a aplicação do método multi-critério.

No capítulo 7 procede-se à aplicação do algoritmo proposto de modo a testar a sua eficácia e viabilidade, fazendo-se uma análise dos valores atingidos para a qualidade acústica das igrejas utilizadas. Foi ainda desenvolvida uma ferramenta *software*, que permite ao utilizador calcular a Qualidade Acústica da Igreja e também possibilita determinar os valores dos parâmetros acústicos subjectivos usando os modelos de previsão considerados.

Por fim, no capítulo 8 estabelecem-se conclusões finais assim como pistas para desenvolvimento futuro.

2

METODOLOGIA

2.1. SELECÇÃO DA POPULAÇÃO ESTATÍSTICA

2.1.1. SELECÇÃO DAS IGREJAS

Para o tipo de trabalho que se pretendia realizar era necessário recolher informação diversa sobre várias igrejas, disponibilizada em trabalhos anteriores, relativa aos parâmetros acústicos objectivos (Carvalho, 1994), aos parâmetros acústicos subjectivos (Morgado, 1994) e à avaliação subjectiva da inteligibilidade da palavra (Lencastre, 1998). A lista de igrejas estudadas no âmbito deste trabalho foi seleccionada de acordo com a bibliografia mencionada, que incidiu num total de 54 igrejas.

De modo a realizar uma análise completa e coerente do ponto de vista acústico, apenas se podia estudar as igrejas para qual havia toda a informação requerida de modo a realizar o estudo proposto, ou seja, as igrejas estudadas em comum nas três teses previamente citadas.

A medição dos parâmetros acústicos subjectivos (Morgado, 1996) apenas se realizou em 36 das 41 estudadas no primeiro trabalho (Carvalho, 1994), pois nas cinco igrejas excluídas tinham sido realizadas obras no seu interior, o que viria a alterar as condições acústicas existentes aquando do primeiro estudo, inviabilizando assim a sua nova utilização. Além disso, o estudo posteriormente feito aos acima mencionados (Lencastre, 1998) dissociou-se bastante na escolha de igrejas para análise (31 ao todo), centrando-se no Norte de Portugal, ao contrário das restantes, em que as igrejas escolhidas tinham uma disposição geográfica mais alargada.

Isto leva a que o número de igrejas em estudo agora neste trabalho seja bastante mais reduzido que nos trabalhos anteriores, 13 no total. No entanto julga-se que será suficiente para chegar a resultados satisfatórios no âmbito do trabalho proposto. Infelizmente não estão representados todos os estilos arquitectónicos existentes em Portugal, nomeadamente o Manuelino, daí que uma análise da variação da qualidade acústica entre igrejas do ponto de vista arquitectónica não poderá ser muito extensa, ou completa. As igrejas em estudo estão representadas na figura 2.1.

No quadro 2.1 são indicadas as 13 igrejas estudadas assim como a sua localização e o estilo arquitectónico predominante em que se inserem. No quadro 2.2 encontra-se os vários estilos arquitectónicos e os séculos em que se presenciaram.



Igreja de Bustêlo
(Lencastre, 1998)



Igreja de Cabeça Santa
(Sítio 2)

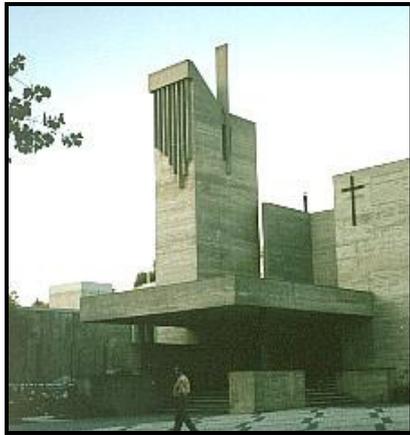


Igreja dos Clérigos (Porto)
(Sítio 3)

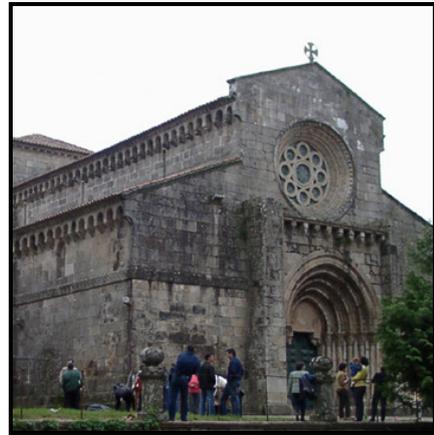


Igreja da Lapa (Porto)
(Sítio 4)

Figura 2.1 – Fotografias das 13 igrejas em estudo.



Igreja da Nossa Senhora da Boavista (Porto)
(Lencastre, 1998)



Igreja de Paço de Sousa
(Sítio 2)

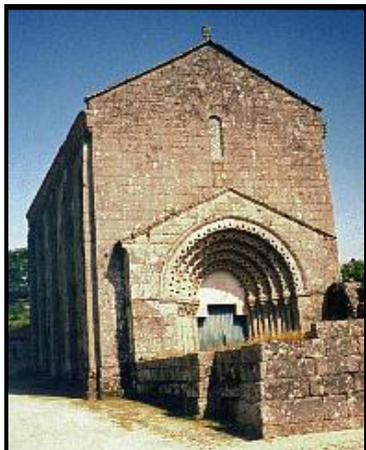


Igreja do Santíssimo Sacramento (Porto)
(Lencastre, 1998)

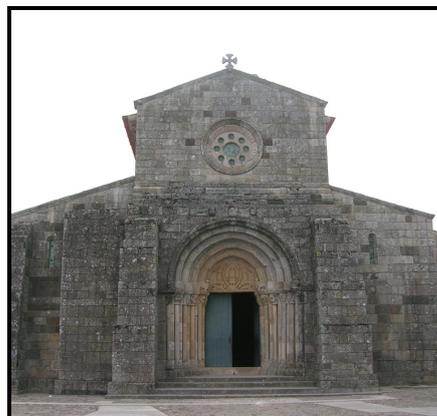


Igreja de S. Martinho de Cedofeita (Porto)
(Sítio 2)

Figura 2.1 – Fotografias das 13 igrejas em estudo (continuação).



Igreja de S. Pedro de Ferreira
(Lencastre, 1998)



Igreja de S. Pedro de Rates
(Sítio 4)



Sé do Porto
(Sítio 5)



Igreja da Serra do Pilar (V. N. Gaia)
(Sítio 4)

Figura 2.1 – Fotografias das 13 igrejas em estudo (continuação).



Igreja do Mosteiro de Tibães
(Sítio 4)

Figura 2.1 – Fotografias das 13 igrejas em estudo (continuação).

Quadro 2.1 – Lista de igrejas estudadas.

| Nº | Igrejas - Localização | Estilo Arquitectónico Predominante |
|----|--|------------------------------------|
| 1 | Bustêlo – Penafiel | Barroco |
| 2 | Cabeça Santa – Penafiel | Românico |
| 3 | Clérigos – Porto | Barroco |
| 4 | Lapa – Porto | Neoclássico |
| 5 | Nossa Senhora da Boavista – Porto | Contemporâneo |
| 6 | Paço de Sousa – Penafiel | Gótico |
| 7 | Santíssimo Sacramento – Porto | Contemporâneo |
| 8 | São Martinho da Cedofeita – Porto | Românico |
| 9 | S. Pedro de Ferreira - Paços de Ferreira | Românico |
| 10 | S. Pedro de Rates - Póvoa de Varzim | Românico |
| 11 | Sé - Porto | Românico |
| 12 | Serra do Pilar - Vila Nova de Gaia | Renascença |
| 13 | Tibães (mosteiro) – Braga | Barroco |

Quadro 2.2 – Estilos arquitectónicos das igrejas (Morgado, 1996).

| Estilo arquitectónico | Período |
|-----------------------|-------------------|
| Românico | séc. XII a XIII |
| Gótico | séc. XIII a XV |
| Manuelino | séc. XV a XVI |
| Renascença | séc. XVI a XVII |
| Barroco | séc. XVII a XVIII |
| Neoclássico | séc. XVIII a XIX |
| Contemporâneo | séc. XX a XXI |

Foram também recolhidos vários dados referentes às características arquitectónicas de cada igreja. Os parâmetros arquitectónicos utilizados foram seleccionados tendo como base as escolhas feitas em estudos já realizados previamente sobre salas de concerto e igrejas (Morgado, 1996). De entre os catorze parâmetros escolhidos incluem-se medidas lineares, medidas quadráticas e medidas cúbicas. Foram igualmente considerados a *Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total* (ABSO_TOT) de cada igreja e o *Coefficiente de Absorção Sonora Médio* (CABSO_ME) dos materiais utilizado no revestimento interior das Igrejas. Apresentam-se no quadro 2.3 os parâmetros arquitectónicos analisados e a respectiva definição e no quadro 2.4 estão dispostos os valores dos parâmetros arquitectónicos para as igrejas utilizadas.

De referir que a *nave da igreja* corresponde ao espaço total da igreja excluindo as capelas laterais e a capela-mor enquanto que o termo “total” diz respeito a todo o espaço interior da igreja.

Quadro 2.3 - Descrição dos treze parâmetros arquitectónicos considerados.

| Designação | Definição |
|------------|---|
| VOL_TOT | Volume Total (m ³) |
| VOL_NAVES | Volume da Nave (m ³) |
| AREA_TOT | Área Total (m ²) |
| AREA_NAVES | Área da Nave (m ²) |
| L_MAX | Comprimento Máximo (m) |
| L_NAVES | Comprimento da Nave (m) |
| H_MAX | Altura Máxima (m) |
| H_NAVES | Altura da Nave (m) |
| LARG_NAVES | Largura da Nave (m) |
| LARG_MED | Largura média (m) |
| H_MEDTOT | Altura média total (m) (= Volume Total / Área Total) |
| ABSO_TOT | Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total (m ²) |
| CABSO_ME | Coefficiente de Absorção Sonora Médio de todas as superfícies |

Quadro 2.4 - Valores dos parâmetros arquitectónicos para as igrejas em estudo (Lencastre, 1998).

| Igrejas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VOL_TOT (m ³) | 6476 | 751 | 5130 | 11423 | 3740 | 6028 | 6816 |
| VOL_NAVES (m ³) | 5166 | 558 | 4032 | 8787 | 3108 | 4564 | 4894 |
| AREA_TOT (m ²) | 515 | 108 | 273 | 753 | 499 | 546 | 510 |
| AREA_NAVES (m ²) | 401 | 69 | 212 | 542 | 406 | 397 | 333 |
| L_MAX (m) | 46,0 | 17,9 | 33,9 | 52,5 | 23,4 | 43 | 40,7 |
| L_NAVES (m) | 32,2 | 11,6 | 23,5 | 36,4 | 16,8 | 25,1 | 26,8 |
| H_MAX (m) | 16,1 | 8,7 | 20,0 | 17,0 | 7,9 | 16,8 | 15,5 |
| H_NAVES (m) | 14,9 | 8,1 | 19,0 | 16,2 | 7,7 | 11,5 | 14,7 |
| LARG_NAVES (m) | 10,5 | 5,9 | 10,7 | 14,9 | 26,1 | 15,9 | 13,0 |
| LARG_MED (m) | 12,6 | 5,9 | 9,5 | 14,9 | 24,2 | 15,9 | 13,0 |
| H_MEDTOT (m) | 12,6 | 7,0 | 18,8 | 15,2 | 7,5 | 11,0 | 13,4 |
| ABSO_TOT (m ²) | 226 | 40 | 112 | 328 | 152 | 119 | 233 |
| CABSO_ME | 0,091 | 0,070 | 0,061 | 0,076 | 0,083 | 0,047 | 0,085 |

| Igrejas | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VOL_TOT (m ³) | 1117 | 2912 | 3918 | 15260 | 11566 | 8608 |
| VOL_NAVES (m ³) | 922 | 2301 | 3386 | 11232 | 10400 | 5416 |
| AREA_TOT (m ²) | 126 | 233 | 427 | 982 | 591 | 595 |
| AREA_NAVES (m ²) | 92 | 169 | 364 | 711 | 408 | 322 |
| L_MAX (m) | 23,0 | 29,4 | 31,5 | 62,2 | 37,2 | 47,0 |
| L_NAVES (m) | 15,6 | 19,3 | 22,7 | 42,3 | 26,0 | 30,3 |
| H_MAX (m) | 10,7 | 14,5 | 12,9 | 22,3 | 35,1 | 19,3 |
| H_NAVES (m) | 10,0 | 13,6 | 9,3 | 15,8 | 26,0 | 16,8 |
| LARG_NAVES (m) | 5,9 | 8,7 | 16,0 | 15,0 | 22,8 | 9,4 |
| LARG_MED (m) | 5,9 | 8,7 | 16,0 | 17,6 | 20,2 | 10,4 |
| H_MEDTOT (m) | 8,9 | 12,5 | 9,2 | 15,5 | 19,6 | 14,5 |
| ABSO_TOT (m ²) | 21 | 72 | 94 | 261 | 228 | 259 |
| CABSO_ME | 0,030 | 0,055 | 0,044 | 0,047 | 0,069 | 0,073 |

Parâmetros arquitectónicos: Volume Total (VOL_TOT); Volume da Nave (VOL_NAVES); Área Total (AREA_TOT); Área da Nave (AREA_NAVES); Comprimento Máximo (L_MAX); Comprimento da Nave (L_NAVES); Altura Máxima (H_MAX); Altura da Nave (H_NAVES); Largura da Nave (LARG_NAVES); Largura média (LARG_MED); Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total (ABSO_TOT); Coeficiente de Absorção Sonora Médio de todas as superfícies (CABSO_ME).

Apesar do universo não muito vasto de igrejas utilizado considera-se que o grupo em estudo seja perfeitamente legítimo para o estudo em questão. Todas as igrejas encontram-se no Norte do país, zona de grande influência religiosa de Portugal. Os resultados obtidos com este estudo poderão até ser extrapolados para outros casos existentes nos países em cuja arquitectura religiosa a presença Portuguesa se fez notar, tais como África, Extremo Oriente e América do Sul.

2.1.2. AUDITORES

Na elaboração do presente trabalho não foi necessário o recurso a um grupo de auditores, visto ser uma investigação através de elementos bibliográficos de trabalhos anteriores. No entanto julga-se necessária fazer uma breve referência aos grupos de auditores usados nos trabalhos anteriores de onde partiram parte dos resultados aqui utilizados.

Nos trabalhos em que foram estudados parâmetros de cariz subjectivo (Morgado, 1996; Lencastre, 1998) foram utilizados dois grupos de auditores distintos, no entanto na escolha de ambos os grupos foram seguidos o mesmo tipo de critérios.

A escolha aleatória não era viável pois era exigido um mínimo de conhecimento sobre acústica, visto que iria ser solicitado aos auditores que respondessem a parâmetros acústicos. No entanto a escolha de pessoas com elevado conhecimento científico poderia ser problemático, pois não representariam adequadamente o tipo de público indiferenciado que frequenta a igreja, daí ser necessário escolher um grupo de pessoas variado que representasse um compromisso entre estas duas situações. Além do mais, o grupo deveria ser constituído por elementos de ambos os sexos, adultos e com níveis de audição normal e com experiência normal na fala e audição da língua Portuguesa.

Em ambos os trabalhos recorreu-se a docentes e alunos da Escola Superior de Música e das Artes do Espectáculo (ESMAE) do Instituto Politécnico do Porto. Para o estudo realizado no âmbito da tese “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos*” (Morgado, 1996) foram escolhidos quinze auditores, registando-se ao longo do estudo uma presença entre nove e treze elementos. Para os testes necessários para o estudo “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998) foram escolhidos vinte e seis auditores.

2.1.3. EMISSÃO E EQUIPAMENTO

Para a medição dos parâmetros acústicos objectivos (Carvalho, 1994) foi usado o seguinte equipamento: sonómetro Brüel & Kjaer, tipo 2231 com filtro de oitavas tipo 1625; módulo *Room Acoustics* Brüel & Kjaer tipo BZ7109; microfone Brüel & Kjaer com diâmetro 1/2"; computador portátil e a aplicação de software *Room Acoustics* da Brüel & Kjaer VP7155.

O equipamento usado para medir o RASTI (Lencastre, 1998) foi o da marca Brüel & Kjaer constituído por um Transmissor modelo 4225 e por um Receptor modelo 4419.

Para a medição dos parâmetros acústicos subjectivos (Morgado, 1996) não foi usado equipamento electrónico.

2.2. PROCEDIMENTO

2.2.1. DESCRIÇÃO BREVE DA METODOLOGIA

Este trabalho apoia-se em elementos bibliográficos de modo a ter uma base de trabalho da qual se pretende retirar conclusões relativamente a um método de análise da qualidade acústica global numa igreja. Considera-se então de relativa importância explicar em que consistem os parâmetros acústicos, objectivos e subjectivos, utilizados no âmbito da tese, assim como os testes utilizados na sua quantificação/caracterização.

Todos os ensaios acústicos foram efectuados com as igrejas vazias, com a excepção dos auditores (no caso dos parâmetros acústicos subjectivos), mantendo-se todo o mobiliário nas condições habituais de utilização. As portas eram fechadas de modo a garantir a não entrada de público e um melhor isolamento sonoro face a ruídos exteriores.

2.2.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJECTIVOS

Têm sido propostas variadas medidas acústicas para quantificar as características acústicas objectivas de salas. Usando a literatura disponível, na tese “*Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*” (Carvalho, 1994) o autor escolheu seis medidas monoauriculares que achou serem as que melhor se aplicavam de modo a fazer uma descrição mais adequada das funções da palavra e da música numa igreja. Os parâmetros acústicos seleccionados para esse estudo foram:

Tempo de reverberação (RT): É o tempo (medido em segundos) que o som demora a enfraquecer 60 dB. Foi calculado a partir do inverso da integração a partir da curva logarítmica de enfraquecimento obtida de um impulso resposta. RT é suposto ser uma medida do sentido objectivo de reverberância.

Tempo de decaimento curto (EDT): É o tempo (medido em segundos) que o som demora a enfraquecer 60 dB e é uma adaptação do tempo de reverberação agora medido com um enfraquecimento de 10 dB (de 0 para -10 dB) e então multiplicado por um factor de 6. EDT é suposto ser uma medida do sentido subjectivo da reverberância, claridade e impressão acústica geral.

Claridade (C80): É a razão em dB entre a energia recebida nos primeiros 80 ms do sinal recebido e a energia recebida posteriormente. O limite de 80 ms é proposto como o limite de perceptibilidade médio para a música. É calculada da seguinte forma:

$$C80 = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.1)$$

onde $p(t)$ é a função tempo do impulso resposta do recinto medido usando um microfone numa localização específica nesse espaço.

Definição (D): Com um tempo de abertura de 50 ms, esta é a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida, variando entre 0 e 1. A duração de 50 ms é usualmente considerada o limite de perceptibilidade médio para a palavra. É obtida pela expressão:

$$D = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.2)$$

Tempo central (TS): É o ponto no tempo (medido em milissegundos) onde a energia recebida antes deste ponto é igual à energia recebida depois daquele ponto. É obtida pela seguinte expressão:

$$TS = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.3)$$

Intensidade Sonora (G): É a razão, em dB, entre a energia total recebida numa posição específica do recinto fechado e a energia recebida para o som directo isolado se medido a uma distância de 10 m a partir da origem num ambiente anecóico. É uma medida com aptidão para medir a intensidade do som em posições particulares, quando comparadas com a que existiria em meio anecóico. É sugerido ser uma medida que pode ser correlacionada com os parâmetros acústicos subjectivos intensidade e intimidade. É obtida usando a seguinte expressão:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad (2.4)$$

em que $p_{10}(t)$ é a função tempo do impulso de resposta em condições de campo livre a uma distância de 10 m.

O método usado para calcular estas medidas acústicas baseia-se no método integrado de impulso-resposta descrito por Schroeder em 1965. Uma emissão de ruído de frequência limitada é gerada e transmitida na

igreja por um altifalante através de um amplificador. A resposta do espaço a essa emissão (chamada de impulso-resposta) seria depois analisada. O altifalante foi colocado em duas posições (*S*) diferentes em cada igreja (em frente do altar e outra no centro da igreja) enquanto que os receptores se distribuíam, em média, por cinco posições diferentes (*X*), como se pode constatar na figura 2.2.

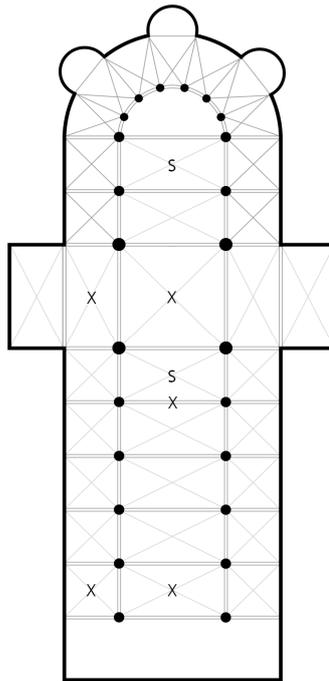


Figura 2.2 – Localizações esquemáticas dos microfones (*X*) e das fontes sonoras (*S*) nas igrejas para avaliação dos parâmetros acústicos objectivos.

2.2.3. MÉTODO RASTI

A oração e a leitura são da maior importância nos serviços religiosos realizados nas igrejas católicas e como tal, a inteligibilidade da palavra é um aspecto muito importante no que diz respeito ao comportamento acústico de igrejas.

A inteligibilidade da palavra pode ser avaliada indirecta mas objectivamente, através de equipamento e sem uma intervenção subjectiva. Um dos métodos mais eficazes e correntemente usados é o *RASTI*, ou seja, o índice de transmissão da palavra "*Rapid Speech Transmission Index*", sendo uma simplificação do método *STI* "*Speech Transmission Index*". Esta determinação da qualidade de transmissão e recepção da "palavra" no domínio da inteligibilidade baseia-se na diminuição da taxa de modulação de um sinal de experiência, que simula as características acústicas da voz humana, desde que o sinal seja transmitido numa sala (CEI 268-16, 1988). O sinal sonoro é emitido por uma fonte sonora, situada na posição do orador e vai ser recebido por um microfone situado no lugar do auditor.

No método *RASTI* a análise limita-se a duas bandas de 1/1 oitava, de frequências centrais de 500 Hz e 2 kHz e a quatro ou cinco frequências de modulação dessas bandas. Este método pode utilizar-se principalmente para comparar a qualidade de transmissão em distintas localizações numa mesma sala ou para comparar o grau de inteligibilidade da palavra em diferentes salas.

Para o presente trabalho, relativamente aos valores obtidos nas medições *RASTI*, usou-se os dados disponibilizados na tese “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998), trabalho em que foi abordado mais aprofundadamente a questão da inteligibilidade da palavra nas igrejas.

Para a medição do parâmetro *RASTI*, a fonte sonora (*S*) foi colocada em três locais distintos, nomeadamente no altar, no púlpito e no ambão² com a instalação sonora activa. O equipamento receptor foi colocado em quatro posições diferentes (*X*), registando assim o valor *RASTI* medido. Neste trabalho serão utilizados os valores medidos para o *RASTI* com a fonte sonora no altar, lugar habitual de um orador, que é o que se pretende simular (ver figura 2.3).

Através duma tabela de conversão (Norma CEI 268-16, 1988), os valores de *RASTI* podem fazer-se corresponder a uma escala subjectiva de inteligibilidade da palavra, como se pode consultar através do quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Tabela de conversão do valor do *RASTI* numa escala subjectiva de inteligibilidade da palavra.

| RASTI | Inteligibilidade da Palavra |
|---------------|-----------------------------|
| [0,00 – 0,30[| Má |
| [0,30 – 0,45[| Medíocre |
| [0,45 – 0,60[| Suficiente |
| [0,60 – 0,75[| Boa |
| [0,75 – 1,00] | Excelente |

² Ambão (ou mesa da palavra): espécie de estante, voltada para a assembleia, de onde se fazem as leituras e normalmente a homilia (sítio 6).

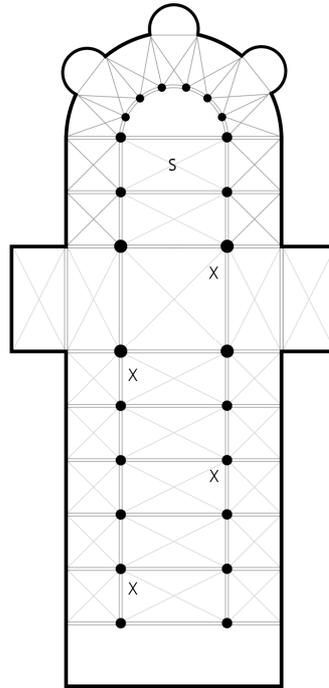


Figura 2.3 – Localizações esquemáticas dos receptores (X) e da fonte sonora (S) nas igrejas para avaliação do parâmetro acústico objectivo *RASTI*.

2.2.4. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS

2.2.4.1. Nota prévia

Na tese “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos*” (Morgado, 1996), foram usados dois tipos de testes, um de inteligibilidade da palavra e outro de avaliação acústica de música.

Para avaliar a inteligibilidade da palavra realizou-se um teste em que eram ditas cem frases sequencialmente, após as quais cada auditor fazia um registo das palavras apreendidas. Durante esses testes foram também interpretados excertos de música ao vivo (clarinete e oboé), para a avaliação da acústica das igrejas face à música, e após os quais os auditores faziam respondiam a um questionário, fazendo uma avaliação dos parâmetros acústicos atrás referidos.

2.2.4.2. Avaliação da acústica da música

Para avaliação da acústica no local face à música esse autor escolheu dez medidas que permitem caracterizar subjectivamente o comportamento acústico numa igreja:

1- Ruído de fundo (RF): Os sons escutados no local que não os da fonte; ruídos que perturbem a audição e/ou a comunicação.

2- *Intensidade do som (INTS)*: a intensidade geral ou “volume” do som, que está a ser sentido nesse local; a intensidade sonora sentida no local é de certo modo uma mistura das intensidades do som directo e do som reverberante.

3- *Clareza do discurso musical (CLA)*: o grau em que as notas musicais são claramente separadas no tempo e distintamente ouvidas; mede o grau de definição com que os sons são percebidos. Este grau de definição depende directamente do tipo de superfícies reflectoras do som existente no interior da sala.

4- *Reverberância (REV)*: a persistência do som no espaço. Dá uma ideia aproximada do tempo que o som permanece nesse espaço após a fonte sonora ter cessado de emitir.

5- *Eco (ECO)*: reflexões atrasadas do som e claramente audíveis. Os ecos podem surgir quando existem tectos ou paredes reflectoras muito distanciadas da fonte sonora; este tem geralmente mais probabilidade de ocorrer nos lugares da frente em grandes salas que tenham tempo reverberação relativamente curto, o que pode criar condições para a sua audição mais clara.

6- *Intimidade (INTM)*: a sensação auditiva da proximidade da fonte sonora. Quanto uma sala tem intimidade acústica, a música nela executada soa com se fosse executada numa sala pequena, ou seja, há a sensação de estar numa sala pequena mesmo que não seja o caso.

7- *Direccionalidade (DIR)*: a sensação de que o som vem do eixo da fonte sonora; sente-se que o som vem na direcção em que se vê a fonte. Pode acontecer que o som é emitido dum ponto diferente daquele em que se encontra a fonte sonora.

8- *Envolvimento (ENV)*: o sentimento de estar imerso no som ou rodeado por ele. O envolvimento resulta da maneira como o som se distribui no espaço; isto depende da maneira como o som se difunde no espaço. Se houver um bom envolvimento, o auditor sente que lhe chega aos ouvidos a mesma energia sonora de todas as direcções.

9- *Equilíbrio tímbrico (EQT)*: níveis relativos dos sons das frequências graves e agudas. É a sensação de que não há desigualdade na recepção de todos os tipos de sons (em relação a frequências baixas e altas) nomeadamente entre, por exemplo, instrumentos de timbre e extensão bem diferentes, considerando também a voz humana.

10- *Impressão geral (IMPG)*: a impressão geral da qualidade acústica sentida.

A localização dos grupos dividia-se por duas posições distintas (X), ao fundo da nave e ao centro, enquanto que a emissão sonora (S) se encontrava na zona do altar ou à frente deste (figura 2.4).

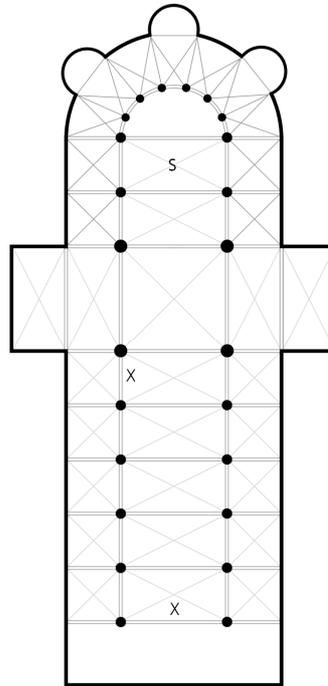


Figura 2.4 – Localizações esquemáticas dos auditores (X) e dos emissores (S) nas igrejas para avaliação dos parâmetros acústicos subjectivos.

2.2.4.3. Avaliação subjectiva da inteligibilidade da palavra

Na tese “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998) também se procedeu a uma avaliação subjectiva, através da realização de testes de audição, com discurso ao vivo efectuados em cada igreja, com um mesmo grupo de pessoas.

A metodologia adoptada para a preparação destes testes baseou-se na norma técnica “*Acoustics - The construction and calibration of speech intelligibility tests*” (ISO/TR 4870:1991). Em cada caso, o conjunto de auditores foi subdividido em quatro pequenos grupos e distribuídos em quatro posições pré-determinadas na nave da igreja (figura 2.5). Foram elaboradas diferentes listas de palavras para serem lidas nas igrejas. Cada ouvinte foi submetido à audição sequencial de uma lista de oitenta palavras, lidas numa mesma frase portadora e tendo que escrever essas oitenta palavras à medida que lhe foram lidas, de forma exactamente igual à percebida. Este registo foi feito em ficha própria, previamente fornecida a cada elemento.

Foi então possível avaliar das palavras que formaram a lista das 80 palavras lidas as que foram correctamente compreendidas por cada auditor. Esta medida é designada por $P80$ e é um valor

compreendido entre 0 e 80, sendo a medida subjectiva seleccionada para avaliação da inteligibilidade da palavra.

Como metodologia para realizar as medições, a fonte sonora, ou seja o leitor (*S*), foi colocada imediatamente à frente do altar, ocupando uma posição equivalente em todas as Igrejas enquanto que os auditores (*X*) ocupavam quatro posições distribuídas ao longo da nave (ver figura 2.5).

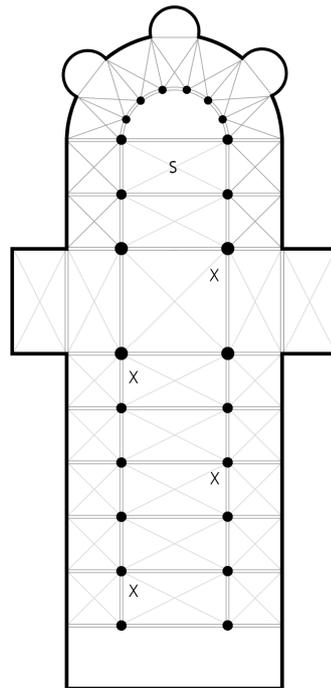


Figura 2.5 – Localizações esquemáticas dos auditores (*X*) e do emissor (*S*) nas igrejas para avaliação do parâmetro acústico subjectivo *P80*.

3

DADOS ACÚSTICOS

3.1. OBJECTIVOS

Neste capítulo apresenta-se a caracterização dos parâmetros acústicos subjectivos e dos parâmetros acústicos objectivos, utilizados no âmbito deste estudo. Optou-se pela utilização dos valores médios para cada parâmetro medido para cada igreja. A escolha dos valores médios prende-se com o facto que este será um valor único caracterizador para cada igreja, permitindo assim comparar os valores dos parâmetros acústicos subjectivos e objectivos de cada um dos locais estudados. Os valores utilizados neste estudo e que serão analisados no presente capítulo foram medidos para trabalhos anteriores, na literatura já referida ao longo do capítulo 2.

Em virtude de haver vários métodos possíveis para determinar um valor único para cada igreja e para cada parâmetro acústico objectivo, é necessário determinar qual o mais adequado para este estudo. Os métodos diferem nas bandas de frequências usadas para o cálculo das médias dos parâmetros acústicos objectivos. De acordo com a literatura disponível (Carvalho, 1994; Morgado, 1996) devem ser utilizadas as duas bandas de frequências intermédias de 500 e 1k Hz. Como o universo de igrejas abordado era mais extenso nesses estudos (41 e 36 igrejas, respectivamente) do que no presente estudo (13 igrejas) e que o grupo de igrejas agora consideradas estão incluídas no universo de igrejas abordadas nesses trabalhos, considera-se que as conclusões aí atingidas sejam válidas para o presente estudo. Considera-se assim que esse método (que usa os resultados nas bandas de frequências de 500 e 1 kHz) é o mais adequado para o estudo proposto.

3.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

3.2.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJECTIVOS

Procede-se neste capítulo ao estudo dos valores calculados para os parâmetros acústicos objectivos. Segue-se uma análise aos seis parâmetros usados no âmbito da tese *“Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches”* (Carvalho, 1994), referidos no capítulo 2, assim como ao índice de inteligibilidade da palavra (RASTI) calculado na tese *“A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo”* (Lencastre, 1998), descrito no subcapítulo 2.2.3.

No quadro 3.1 estão apresentados os valores dos parâmetros acústicos objectivos para as 13 igrejas analisadas. A informação apresentada no quadro 3.2 diz respeito aos valores médios registados em cada igreja.

Quadro 3.1 – Valores médios dos parâmetros acústicos objectivos para as bandas de frequência de 500 e 1k Hz (Carvalho, 1994).

| Igreja N° | RT (s) | EDT (s) | C80 (dB) | D | TS (ms) | G (dB) | RASTI |
|-----------|--------|---------|----------|------|---------|--------|-------|
| 1 | 4,07 | 3,98 | -5,4 | 0,16 | 291 | 12,7 | 0,38 |
| 2 | 1,79 | 1,77 | -0,6 | 0,32 | 134 | 18,2 | 0,46 |
| 3 | 3,35 | 3,08 | -5,4 | 0,16 | 249 | 11,4 | 0,38 |
| 4 | 5,72 | 5,55 | -7,6 | 0,12 | 428 | 9,8 | 0,38 |
| 5 | 3,98 | 3,82 | -5,1 | 0,16 | 280 | 14,9 | 0,41 |
| 6 | 2,94 | 3,03 | -5,7 | 0,12 | 260 | 10,8 | 0,40 |
| 7 | 5,02 | 4,84 | -6,5 | 0,13 | 354 | 14,0 | 0,38 |
| 8 | 3,62 | 3,46 | -4,5 | 0,15 | 259 | 20,4 | 0,38 |
| 9 | 3,28 | 3,11 | -5,1 | 0,10 | 242 | 15,0 | 0,37 |
| 10 | 3,00 | 2,92 | -4,7 | 0,14 | 236 | 13,1 | 0,42 |
| 11 | 3,59 | 3,47 | -6,9 | 0,08 | 283 | 8,1 | 0,41 |
| 12 | 7,83 | 7,74 | -8,2 | 0,10 | 574 | 13,3 | 0,23 |
| 13 | 2,72 | 2,58 | -3,6 | 0,19 | 205 | 9,5 | 0,45 |

Parâmetros acústicos objectivos: RT (Tempo de reverberação); EDT (Tempo de decaimento curto); C80 (Clareza); D (Definição); TS (Tempo central); G (Intensidade Sonora); RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

Quadro 3.2 – Dados estatísticos simples dos parâmetros acústicos objectivos usando os dados médios para cada igreja para as bandas de frequência de 500 e 1k Hz (usando 13 valores = médias 13 igrejas).

| Parâmetro | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | Amplitude | Erro-padrão |
|-----------|--------|-------|---------|--------|-----------|-------------|
| RT (s) | 1,8 | 3,9 | 3,6 | 7,8 | 6,0 | 1,5 |
| EDT (s) | 1,8 | 3,8 | 3,5 | 7,7 | 6,0 | 1,5 |
| C80 (dB) | -8,2 | -5,3 | -5,4 | -0,6 | 7,6 | 1,9 |
| D | 0,08 | 0,15 | 0,14 | 0,32 | 0,24 | 0,06 |
| TS (ms) | 134 | 292 | 260 | 574 | 440 | 110 |
| G (dB) | 8,1 | 13,2 | 13,1 | 20,4 | 12,3 | 3,5 |
| RASTI | 0,23 | 0,39 | 0,38 | 0,46 | 0,23 | 0,06 |

Parâmetros acústicos objectivos: RT (Tempo de reverberação); EDT (Tempo de decaimento curto); C80 (Clareza); D (Definição); TS (Tempo central); G (Intensidade Sonora); RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

Os valores destes parâmetros não podem ser comparados directamente entre si para o método multi-critério pois são quantificados segundo diferentes unidades de grandeza, excepto o índice de inteligibilidade da palavra (*RASTI*), que já se encontra normalizado numa escala decimal. No entanto podem-se retirar algumas ilações dos resultados disponíveis.

Procede-se a uma pequena referência ao significado da função estatística Erro-padrão, antes de se analisar os valores registados. O desvio-padrão é uma medida do grau de dispersão dos valores medidos em relação ao valor médio (a média). Como neste caso estamos apenas a trabalhar apenas com valores médios dos ensaios para cada igreja e não com todos os valores registados, denomina-se a medida do grau de dispersão calculada como erro-padrão da amostra (e não “desvio-padrão”).

O *tempo de reverberação* (RT) é a grandeza mais utilizada para a avaliação da acústica dum recinto, devido ao seu peso no comportamento acústico global dum espaço, embora se tenha reconhecido há muito que a utilização apenas deste parâmetro não é suficiente. Os valores recomendados para este parâmetro variam em função do tipo de utilização pretendida para o espaço em questão, havendo propostas de expressões matemáticas para calcular o tempo de reverberação “ideal” em função do volume do espaço assim como sugestões de intervalos de valores admissíveis consoante a função e/ou o volume do espaço. Actualmente considera-se desadequado para a maioria dos locais o cálculo do tempo de reverberação “ideal” unicamente em função do volume do espaço em estudo.

Já aqui foi referida a problemática existente no comportamento acústico dum espaço face ao *tempo de reverberação*, referente aos diferentes requisitos exigidos para uma boa qualidade da palavra e para uma boa qualidade da música. Com base em trabalhos anteriores (Carvalho, 1994) considera-se que numa igreja católica o *tempo de reverberação* adequado para uma boa inteligibilidade da palavra será entre os 0,8 e 1,0 segundos enquanto que para uma boa percepção da música estará entre 2,0 e 2,2 segundos (para as frequências médias). Casos particulares, de canto gregoriano por exemplo, podem “exigir” tempos de reverberação um pouco superiores.

Pode-se constatar nos valores registados para o *tempo de reverberação* das igrejas da amostra (quadro 3.2) uma amplitude elevada, mostrando uma grande variação deste parâmetro objectivo entre igrejas. A média registada (3,9 s), assim como a mediana (3,6 s) é significativamente mais elevada do que os valores ideais sugeridos na literatura disponível para um comportamento acústico satisfatório numa igreja, daí que seja de esperar que o tempo de reverberação excessivo tenha um efeito negativo na inteligibilidade da palavra na maior parte das igrejas. A qualidade da música, no entanto, será menos prejudicada do que a da palavra ao estar sujeita a um tempo de reverberação elevado, mais adequado para música de órgão e ao uso de coros, fortemente integrados na tradição religiosa católica. O erro-padrão (1,5 s) revela que houve uma grande dispersão dos valores em relação à média.

O *tempo de decaimento curto* (EDT) e o *tempo de reverberação* (RT) são duas grandezas com significado físico muito semelhante, medindo ambas o decaimento sonoro em função dum intervalo de tempo e apresentando métodos de cálculo semelhantes, daí que seja de esperar que apresentem resultados análogos. A amplitude e o erro-padrão apresentam de facto valores idênticos, sendo a média (3,8 s) e a mediana (3,5 s) ligeiramente inferiores.

Os valores ideais para a *claridade* (C80), parâmetro relacionado com a perceptibilidade da música, variam em função do tipo de utilização do espaço estudado. O órgão tende a assumir tradicionalmente o lugar central na música litúrgica, sendo o instrumento com mais relevância na análise do comportamento acústico numa igreja face à música. É sugerido na literatura disponível (Carvalho, 2008) que a *claridade* para música de órgão deverá rondar os -2 dB: Em “*Fundamentals to perform acoustical measurements*” (Ahnert; Schmidt, 2001) é referido que para música sacra, valores acima de -5 dB são aceitáveis.

Os valores registados apresentam uma amplitude muito elevada, havendo uma diferença acentuada entre igrejas relativamente a este parâmetro acústico. A média (-5,3 dB) e a mediana (-5,4 dB) sugerem valores aceitáveis para a maioria das igrejas no que diz respeito à *claridade* (C80). O valor do erro-padrão é 1,9 dB.

A *definição* (D), correlacionável com a perceptibilidade da palavra, pode variar entre 0 e 1, em que a unidade representa o valor ideal para este parâmetro acústico subjectivo. Espera-se que a inteligibilidade da palavra seja melhor quanto maior for o valor para a *definição*. Admite-se que qualquer valor superior a 0,7 seja considerado como excelente.

Os valores obtidos são muito baixos, sendo o máximo valor registado 0,32 e média apenas 0,15 o que sugere uma má perceptibilidade da palavra nas igrejas em análise. A amplitude é igualmente reduzida, o que aponta para um comportamento semelhante nas igrejas em estudo, o que é apoiada pelo erro-padrão bastante reduzido (0,06), indicando uma dispersão das medições em relação a este parâmetro muito pequena.

Segundo “*Acústica Ambiental e de Edifícios*” (Carvalho, 2008), o *tempo central* (TS) tende a registar em salas de concertos valores entre 140 e 180 ms para frequências médias. Poder-se-á fazer uma analogia entre as salas de concertos e as igrejas no que diz respeito ao comportamento acústico. Considera-se o intervalo de 140-180 ms como adequado para a música enquanto que para uma boa inteligibilidade da palavra recomenda-se valores na ordem dos 80-100 ms. Pode-se assim concluir que para as igrejas analisadas o valor médio registado para o tempo central é elevado (292 ms). Apresenta uma amplitude elevada e um erro-padrão reduzido.

De forma geral, valores altos para a *intensidade sonora* (G) têm uma contribuição positiva para o comportamento acústico, pois significa uma maior propagação do som, o que em igrejas de grandes dimensões é importante, para garantir que os auditores mais afastados da fonte sonora consigam receber o som emitido. No entanto, níveis elevados de intensidade sonora aliados a um tempo de reverberação elevado funciona numa forma negativa, leva a uma má inteligibilidade da palavra, devido a uma distorção do som.

Em termos gerais a *intensidade sonora* regista valores elevados na amostra, apresentando uma média (13,2 dB) e uma mediana (13,1 dB) razoáveis. No entanto a amplitude é muito elevada (12,3 dB), o que pode ser explicado pela grande diferença de áreas totais das igrejas em análise, o que tende a afectar este parâmetro acústico (Morgado, 1996). O erro-padrão é 3,5 dB.

O parâmetro *RASTI* encontra-se normalizado numa escala unitária. Quanto maior for o índice melhor será a percepção que o auditor tem da palavra. Este parâmetro objectivo regista valores relativamente baixos para a média (0,39) e para a mediana (0,38). Os dados relativos a este parâmetro e ao parâmetro *definição* (D) sugerem um mau comportamento acústico existente nas igrejas estudadas face à palavra. O erro-padrão é reduzido (0,06).

3.2.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS

3.2.2.1. Avaliação da acústica para a palavra

Os valores para o parâmetro acústico objectivo *P80* foram obtidos no trabalho “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998), apresentando uma escala de 0 a 80, sendo que para valores mais elevados corresponde uma maior inteligibilidade da palavra. No quadro 3.3 estão apresentados os valores médios para as quatro posições ocupadas pelos grupos dos auditores nas igrejas (A, B, C e D respectivamente) e o valor médio global. Pode-se verificar através da consulta do quadro 3.4 que a amplitude é relativamente reduzida (17,5) e que a média registada é 72,3, cerca de 90% do máximo, ou seja, em cada dez palavras lidas apenas nove são correctamente compreendidas, havendo uma perda de inteligibilidade de 10%. O erro-padrão é reduzido (4,2), o que revela uma pequena dispersão dos valores registados para o parâmetro. Estes valores sugerem um comportamento acústico não muito favorável face à inteligibilidade da palavra.

Quadro 3.3 – Valores médios para o parâmetro acústico subjectivo P80 (escala de 0 a 80) (Lencastre, 1998).

| Igreja Nº | P80 médio - Zona na Igreja | | | | P80 médio (global) |
|--------------|----------------------------|----|----|----|-----------------------|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 77 | 72 | 69 | 70 | 72,00 |
| 2 | 78 | 78 | 78 | 77 | 77,75 |
| 3 | 79 | 75 | 76 | 67 | 74,25 |
| 4 | 79 | 70 | 55 | 37 | 60,25 |
| 5 | 78 | 78 | 71 | 70 | 74,25 |
| 6 | 78 | 76 | 68 | 67 | 72,25 |
| 7 | 78 | 77 | 73 | 69 | 74,25 |
| 8 | 79 | 76 | 72 | 66 | 73,25 |
| 9 | 79 | 68 | 71 | 68 | 71,50 |
| 10 | 77 | 76 | 71 | 67 | 72,75 |
| 11 | 77 | 77 | 67 | 65 | 71,50 |
| 12 | 70 | 71 | 68 | 61 | 67,50 |
| 13 | 79 | 77 | 61 | 67 | 71,00 |

Quadro 3.4 – Dados estatísticos simples do parâmetro acústico subjectivo P80 usando os dados médios para cada igreja (usando 13 valores = médias de 13 igrejas).

| Parâmetro | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | Amplitude | Erro-padrão |
|-----------|--------|-------|---------|--------|-----------|-------------|
| P80 | 60,3 | 71,7 | 72,3 | 77,8 | 17,5 | 4,2 |

3.2.2.2. Avaliação da acústica para a música

Os valores apresentados no quadro 3.5 foram determinados para as igrejas em análise, no âmbito do estudo desenvolvido na tese “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos*” (Morgado, 1996) para a avaliação da qualidade da música. Foram registados os resultados dos dez parâmetros acústicos subjectivos descritos no subcapítulo 2.2.4, classificados numa escala quantitativa, com uma nota de 1 a 7. A análise que se segue diz respeito aos valores médios registados em cada igreja para cada parâmetro acústico subjectivo, estes dispostos no quadro 3.6.

Quadro 3.5 – Valores médios dos parâmetros acústicos subjectivos (escala 1 a 7).

| Igreja N° | RF | INTS | CLA | REV | ECO | INTM | DIR | ENV | EQT | IMPG |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 2,85 | 4,77 | 4,08 | 5,15 | 5,62 | 4,46 | 4,46 | 4,62 | 5,46 | 4,38 |
| 2 | 2,85 | 4,69 | 6,15 | 2,46 | 6,77 | 5,15 | 5,69 | 3,62 | 6,15 | 4,92 |
| 3 | 5,40 | 4,60 | 5,50 | 3,70 | 6,00 | 4,50 | 4,80 | 4,10 | 4,00 | 4,50 |
| 4 | 4,83 | 3,67 | 2,67 | 6,00 | 4,67 | 2,33 | 3,17 | 3,50 | 4,50 | 2,33 |
| 5 | 2,17 | 4,83 | 4,67 | 4,67 | 5,58 | 4,33 | 4,92 | 4,42 | 5,50 | 4,67 |
| 6 | 2,00 | 4,46 | 5,00 | 4,31 | 5,92 | 4,38 | 4,77 | 4,92 | 5,31 | 4,85 |
| 7 | 1,54 | 4,38 | 3,23 | 5,62 | 4,38 | 3,85 | 3,92 | 4,85 | 5,08 | 3,31 |
| 8 | 3,83 | 5,42 | 4,17 | 5,08 | 5,25 | 4,58 | 4,58 | 5,42 | 5,67 | 4,58 |
| 9 | 2,92 | 5,33 | 5,17 | 4,17 | 5,42 | 5,33 | 5,17 | 5,08 | 5,67 | 5,25 |
| 10 | 3,67 | 4,75 | 5,33 | 4,33 | 6,17 | 5,08 | 5,50 | 4,50 | 5,83 | 5,25 |
| 11 | 2,80 | 4,13 | 5,07 | 4,60 | 5,33 | 3,20 | 4,53 | 4,00 | 3,93 | 4,67 |
| 12 | 2,40 | 4,47 | 2,87 | 6,27 | 3,67 | 3,20 | 3,47 | 4,67 | 3,80 | 2,87 |
| 13 | 1,82 | 3,73 | 4,82 | 4,00 | 5,82 | 3,27 | 4,55 | 3,91 | 5,36 | 4,00 |

RF (Ruído de fundo); INTS (Intensidade do som); CLA (Clareza do discurso musical); REV (Reverberância); ECO (Ecos); INTM (Intimidade); DIR (Direccionalidade); ENV (Envolvimento); EQT (Equilíbrio tímbrico); IMPG (Impressão geral).

Verifica-se que a amplitude atinge os maiores valores nos parâmetros *ruído de fundo* (RF) e *reverberância* (REV), pois são parâmetros acústicos subjectivos que variam muito entre igrejas. O *ruído de fundo* depende muito do isolamento sonoro da igreja face ao exterior e também da sua localização, ou seja, seja está muito exposta a ruídos externos (tráfego, condições meteorológicas, etc.), enquanto que a *reverberância* depende dos revestimentos e forma interior das igrejas. Os menores valores de amplitude são para a *intensidade do som* (INTS) e para o *envolvimento* (ENV). A pequena amplitude registada para

os valores medidos para a *intensidade do som* pode ser explicada pelo facto dos trechos musicais e os testes de palavras usados para a avaliação dos parâmetros acústicos subjectivos tivessem sido semelhantes em todas as igrejas. Além disso, apesar de as igrejas terem um comportamento acústico diferente, comportam-se de uma maneira mais ou menos semelhantes perante a *intensidade do som*. No caso do *envolvimento*, a pequena amplitude pode ser explicada pelo facto deste parâmetro acústico subjectivo ser de difícil avaliação, o que leva a juízos de valor semelhantes entre auditores ou porque as igrejas têm um semelhante nível de reflexões que “circundam” os auditores criando níveis de envolvimento parecidos.

Quadro 3.6 – Dados estatísticos simples dos parâmetros acústicos subjectivos usando os valores médios para cada igreja (usando 13 valores = médias de 13 igrejas).

| Parâmetro | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | Amplitude | Erro-padrão | CA | CC |
|-----------|--------|-------|---------|--------|-----------|-------------|------|------|
| RF | 1,5 | 3,0 | 2,9 | 5,4 | 3,9 | 1,2 | 0,9 | 0,2 |
| INTS | 3,7 | 4,6 | 4,6 | 5,4 | 1,8 | 0,5 | -0,1 | 0,0 |
| CLA | 2,7 | 4,5 | 4,8 | 6,2 | 3,5 | 1,1 | -0,5 | -0,6 |
| REV | 2,5 | 4,6 | 4,6 | 6,3 | 3,8 | 1,0 | -0,4 | 0,6 |
| ECO | 3,7 | 5,4 | 5,6 | 6,8 | 3,1 | 0,8 | -0,7 | 0,8 |
| INTM | 2,3 | 4,1 | 4,4 | 5,3 | 3,0 | 0,9 | -0,6 | -0,4 |
| DIR | 3,2 | 4,6 | 4,6 | 5,7 | 2,5 | 0,7 | -0,5 | 0,1 |
| ENV | 3,5 | 4,4 | 4,5 | 5,4 | 1,9 | 0,6 | -0,1 | -0,8 |
| EQT | 3,8 | 5,1 | 5,4 | 6,2 | 2,4 | 0,8 | -0,7 | -0,9 |
| IMPG | 2,3 | 4,3 | 4,6 | 5,3 | 2,9 | 0,9 | -1,1 | 0,4 |

CA (coeficiente de assimetria): medida de assimetria em relação à média.

CC (coeficiente de curtose): medida de achatamento em relação à curva de Gauss.

RF (Ruído de fundo); INTS (Intensidade do som); CLA (Clareza do discurso musical); REV (Reverberância); ECO (Ecos); INTM (Intimidade); DIR (Direccionalidade); ENV (Envolvimento); EQT (Equilíbrio tímbrico); IMPG (Impressão geral).

Os parâmetros acústicos subjectivos tendem a apresentar médias com valores pouco adequados para um bom desempenho acústico face à música, registando na sua maioria médias que indicam um comportamento abaixo de bom ou aceitável. O parâmetro *ecos* (ECO) apresenta a média mais elevada (5,4), quando o que se pretende é um eco reduzido. O erro padrão situa-se entre 0,5 e 1,2, o que se pode considerar como uma dispersão relativamente pequena das respostas dos ouvintes, dada a escala analisada (7 valores). O menor erro padrão ocorreu para a *intensidade do som* (INTS), enquanto que o mais elevado foi para o *ruído de fundo* (RF), que como já se referiu, é um parâmetro que varia muito de igreja para igreja.

O coeficiente de assimetria (CA) é uma medida de simetria dos dados em relação à média, em que os valores positivos implicam um enviesamento à direita e os valores negativos um enviesamento à esquerda. Pode-se verificar uma tendência predominantemente negativa, com destaque para a *impressão geral* (IMPG), ou seja, a predominância de respostas para este parâmetro esteve abaixo da média. O único parâmetro que demonstra enviesamento à esquerda (coeficiente positivo) é o *ruído de fundo* (RF).

Para o coeficiente de curtose (CC) ou achatamento, valores positivos indicam um achatamento inferior à curva de Gauss e valores negativos indicam um achatamento superior à curva de Gauss. Verifica-se que o *equilíbrio tímbrico* (EQT) apresenta o maior achatamento superior enquanto que o parâmetro *ecos* (ECO) tem o maior achatamento inferior.

3.3. CONCLUSÕES

Quanto aos parâmetros acústicos objectivos, a percepção para a palavra, induzida pelas grandezas *definição* (D) e *RASTI*, é reduzida, o que se pode dever ao tempo de reverberação excessivo verificado. No entanto, a *claridade* (C80) e o tempo de reverberação elevado sugerem, no geral, um melhor comportamento acústico das igrejas no que diz respeito à música (embora não possa ser considerado adequado).

Para os parâmetros acústicos subjectivos para a avaliação da música, o *ruído de fundo* (RF) e a *reverberância* (REV) são os parâmetros que atingem maior amplitude de valores medidos, variando muito entre igrejas. Na sua generalidade os parâmetros acústicos subjectivos apontam para um comportamento acústico para a música razoável, o que é apoiado (embora não de maneira inequívoca) pelos valores obtidos para os parâmetros acústicos objectivos.

O parâmetro *P80* apresenta uma média elevada (71,7 num máximo possível de 80), no entanto este valor indica uma perda de inteligibilidade de cerca de 10%, ou seja, por cada dez palavras lidas o auditor não consegue compreender uma. Este valor sugere um desempenho acústico da igreja face à palavra não muito favorável, o que vem a validar (até certo ponto) os valores registados para os parâmetros *RASTI* e *definição* (D). O erro padrão não atinge valores elevados, daí que se considere as respostas dos auditores consistentes e fiáveis.

É necessário ter em consideração que uma avaliação subjectiva pode não reflectir directamente aquilo que é sugerido ao interpretar dados objectivos. Em trabalhos anteriores conclui-se que nem todos os parâmetros subjectivos considerados para a avaliação da música podem ser correlacionados com os parâmetros acústicos objectivos de forma totalmente satisfatória (Morgado, 1996). O parâmetro *P80* também não é explicado na sua totalidade através do parâmetro *RASTI* (Lencastre, 1998), o que vem reforçar a ideia que parâmetros objectivos e parâmetros subjectivos podem fornecer diferentes pontos de vista sobre o desempenho acústico dum local.

4

MÉTODO MULTI-CRITÉRIO

4.1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho prende-se com o objectivo de determinar um algoritmo que consiga estabelecer uma quantificação, num único índice, da Qualidade Acústica global da Igreja (QAI) do ponto de vista dos auditores, conseguindo uma avaliação fiável do conforto acústico. Esta avaliação quantitativa da qualidade acústica global será realizada através da introdução no algoritmo das características acústicas (subjectivas ou objectivas) medidas na igreja a avaliar ou dos parâmetros arquitectónicos, traduzindo assim a percepção do conforto acústico dos auditores.

Para tal ir-se-á recorrer a uma análise multi-critério, ferramenta que se revela indispensável nesta investigação. Neste capítulo procede-se a uma abordagem ao método de multi-critério, naquilo em que consiste e como se aplica ao estudo aqui apresentado.

Como o nome indica, o método multi-critério pretende fornecer ao utilizador uma ferramenta que lhe permita avançar numa situação que envolva vários critérios de avaliação, que geralmente têm abordagens diferentes sobre a questão em estudo, revelando-se até, muitas vezes, contraditórios.

É-se confrontado diariamente com este tipo de decisões – muitas vezes explicitamente e outras vezes sem consciência de tal facto – em que é necessário fazer uma avaliação dos múltiplos factores em questão. Um exemplo prático e com que a maior parte das pessoas se conseguem relacionar será na compra de um produto de consumo. Tome-se como exemplo a aquisição de um automóvel. É necessário ter em conta um grande número de factores que irão influenciar a decisão final, tais como o custo inicial de compra do automóvel, o seu consumo, potência e cilindrada, número de lugares, a condição do veículo, a sua cor, etc. Como é óbvio, todos estes factores terão um peso diferente na avaliação da decisão, consoante o objectivo final. Se desejarmos comprar um carro eficiente a um baixo custo, o preço ou o consumo do automóvel terão um peso superior à cor deste. No entanto se o objectivo for adquirir um carro para lazer próprio, o custo provavelmente não será tão importante como a aparência do carro. Resumindo, os factores assumem diferentes pesos, consoante a sua relevância para o objectivo pretendido.

O que difere este tipo de problema frequente de outros mais complexos, será que este tipo de situação não justifica a formulação dum modelo formal, pois todos os factores conseguem ser facilmente assimilados e tomados em consideração, e da decisão não advêm consequências a longo-prazo e enganos poderão ser

facilmente corrigidos. No entanto, existem situações de avaliação que envolvem informação mais complexa e de natureza conflituosa e que não podem ser tomadas sem a formulação dum modelo de análise que consiga organizar e sintetizar toda a informação disponível, de modo a que o utilizador se sinta confortável a tomar uma decisão. Assim sendo, um método de decisão baseado em multi-critério é – segundo “*Multiple criteria decision analysis – an integrated approach*” (Belton; Stewart, 2002) – um conjunto de métodos ou aproximações formais que procura, em situações com critérios múltiplos, ajudar o utilizador a explorar diferentes soluções. É necessário, porém, ter a percepção de que as ferramentas de multi-critério não fornecem uma resposta “certa” ou uma análise que retire responsabilidades do agente decisor. A sua importância no processo é fundamental, pois perante situações em que devido ao conflito dos critérios não existem soluções óptimas, é necessário encontrar compromissos, o que implica uma escolha por parte do agente de decisão.

4.2. DEFINIÇÃO E TERMOS FUNDAMENTAIS

Na aproximação clássica aos problemas de decisão existe uma certa propensão para tentar encontrar “a solução óptima” – apesar de esta ser virtualmente impossível – associada muito frequentemente a uma maximização de um único critério, onde são agregados todos os múltiplos critérios a considerar. Contudo, com a ocorrência de ambientes mais complexos e problemas mais densos, entram em causa diversos tipos de valores que irão influenciar o resultado final, não sendo possível satisfazer-los de modo igual.

Neste tipo de situação as ferramentas de cálculo disponíveis não são suficientes, pelo que vai ser necessário que o agente de decisão use o seu discernimento e sua capacidade de avaliação de modo a escolher entre várias hipóteses de decisão. Estas diferentes hipóteses ou soluções admissíveis são as *alternativas* a considerar na resolução do problema.

Para proceder à escolha da *alternativa* preferida são utilizados *critérios de avaliação*, que são linhas de orientação segundo as quais se aborda e aprecia o problema em questão. A cada critério estarão associados *atributos*, que são um conjunto de parâmetros ou medidas com a função de medir os níveis de satisfação desses mesmos critérios para cada *alternativa* (através duma escala de valores numa dada unidade). A cada *critério de avaliação* está também associado um objectivo que indica o sentido de aumento dessa satisfação (maximização vs. minimização, por exemplo). É necessário ter em conta que certas decisões podem estar sujeitas a restrições, isto é, haver para um atributo uma gama restrita de valores aceitáveis.

Dentro das situações abordadas na metodologia multi-critério pode-se diferenciar dois tipos de problemas, nomeadamente os problemas *multiatributo* e os problemas *multiobjectivo*. A formalização que é apresentada ao longo deste capítulo é destinada para problemas *multiatributo*, em que existe um conjunto finito de alternativas com os vários atributos explicitamente definidos. Esta é a situação mais vulgar na selecção de projectos assim como em alternativas de realização de um certo fim e é o que ocorre neste caso de estudo, como se poderá ver no próximo capítulo. Os problemas *multiobjectivo*, geralmente associados a situações muito elaboradas, correspondem a situações em que existe um conjunto de soluções admissíveis definidas através de um conjunto de restrições e onde os objectivos são explicitados através de funções objectivo. É muito comum em casos de planeamento e gestão ou problemas estratégicos.

Para melhor explicar os conceitos apresentados utiliza-se o exemplo já referido anteriormente, a aquisição dum carro. Na escolha do carro mais adequado ao consumidor (que funciona neste caso como o agente de decisão) os vários modelos de gamas de automóveis existentes no mercado revelam-se como as inúmeras alternativas que serão ponderadas. Tome-se como referência a compra dum automóvel de uso diário, para percorrer grandes distâncias. Alguns dos critérios que podem ser usados para a avaliação dessas alternativas são:

- A *eficiência* do automóvel;
- O *custo* do automóvel;
- O *desempenho* do automóvel.

Os atributos associados aos critérios expostos são, respectivamente:

- O *consumo* associado ao automóvel (l/100 km);
- O *custo total* do automóvel, que será medido numa escala monetária (€);
- A *potência* e a *cilindrada* do motor (*cv* e *cc*, respectivamente).

Os objectivos, que indicam o sentido de aumento de satisfação, serão bastante evidentes. Para os dois primeiros critérios, ou seja, a *eficiência* e o *custo* do automóvel, o objectivo será a sua maximização (o que implica uma minimização dos atributos associados, o *consumo* e o *custo total*). Relativamente ao critério *desempenho* o objectivo pretendido é a maximização do atributo.

Deve-se referir que os atributos associados aos critérios de avaliação escolhidos podem ser obtidos directamente ou então por meio de julgamentos. Quando tal acontece, os atributos podem ser previstos por uma combinação de outros atributos, a que são atribuídos uma distribuição quantitativa conforme a importância que estes assumem na satisfação do objectivo associado ao critério de avaliação. Estes “sub-atributos” encontram-se num nível superior, permitindo uma melhor caracterização do atributo principal.

Segue-se uma exemplificação dos diferentes atributos possíveis e da sua distribuição na escolha do automóvel.

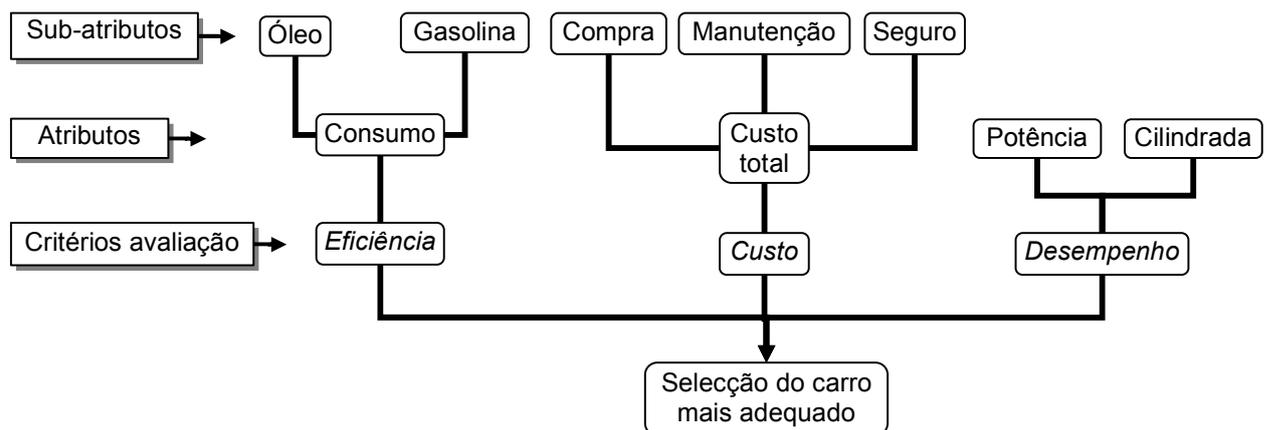


Figura 4.1 – Distribuição de atributos e dos sub-atributos associados aos critérios de avaliação escolhidos para o exemplo de selecção de um carro.

Os sub-atributos, quando existentes, permitem determinar/quantificar os atributos associados aos critérios de avaliação. O *consumo* é um atributo que é quantificado através de sub-atributos “individuais” diferentes, como o óleo ou a gasolina. Estes contribuem para estabelecer uma forma mais precisa o atributo mais “global” que é o consumo total do automóvel, tendo um peso associado conforme a sua relevância.

Será razoável estabelecerem-se valores de referência para os atributos em questão. Entre outras restrições, poder-se-á, por exemplo, fixar um valor máximo para o atributo *custo total*. Este assunto será desenvolvido mais aprofundadamente posteriormente (capítulo 4.4.2).

Existem três categorias de atributos:

- Os *fluxos monetários*, que são medidos em unidades monetárias (€, \$, etc.);
- Os *tangíveis*, que são quantificáveis mas não em unidades monetárias;
- Os *intangíveis*, que são estimados subjectivamente.

Os atributos que são medidos em unidades monetárias são avaliados usando o valor temporal do dinheiro. Se forem dadas distribuições de probabilidades então serão usados valores esperados. A segunda categoria de atributos, os tangíveis, inclui por exemplo (recorrendo uma vez mais ao modelo do carro) a potência do motor (número de cv), o consumo médio do carro (l/100 km), o número de portas do carro, entre outros. A terceira categoria de atributos, os intangíveis, inclui aqueles que não podem ser quantificáveis, tais como, por exemplo, a garantia de qualidade, os requisitos mínimos de manutenção ou a estética do carro (cor, forma, etc.).

4.3. FORMALIZAÇÃO

4.3.1. MODELO FORMAL

Usando a metodologia multi-critério, o modelo formal para um problema de decisão (supondo que se está a lidar com uma situação multiatributo) pode ser elaborado a partir dum conjunto Z de n_z alternativas:

$$Z = \{z_1, \dots, z_{n_z}\} \quad (4.1)$$

em que $z_i, (i = [1, \dots, n_z])$, representa a *alternativa* i (isto é, cada uma das hipóteses possíveis de escolha para o problema). As *alternativas* são descritas por um conjunto de *atributos* ($a_{i,j}$), que caracterizam as *alternativas* de acordo com os critérios de avaliação definidos. Isto pode ser formalizado da seguinte forma:

$$z_i = [a_{i,1}, \dots, a_{i,n_a}] \quad (4.2)$$

em que a *alternativa* z_i é caracterizada por n_a valores $a_{i,j}$ ($i = [1, \dots, n_z]$ e $j = [1, \dots, n_a]$) sendo que i representa a *alternativa* em análise e j a avaliação do *atributo* segundo essa *alternativa* i .

Problemas desta natureza podem ser representados por uma matriz de decisão **MD** com n_z linhas representando as *alternativas* e n_a colunas representados os *atributos*:

$$MD = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{\textit{n}_a \textit{atributos (colunas)}} \\ z_{1,1} \quad \dots \\ \vdots \quad \ddots \\ \quad \quad z_{i,j} \quad \dots \\ \quad \quad \quad \quad \ddots \quad \vdots \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \dots \quad z_{n_z, n_a} \end{matrix} \\ \begin{matrix} z_{1,1} \\ \vdots \\ z_{i,j} \\ \vdots \\ z_{n_z, n_a} \end{matrix} & \begin{matrix} \dots \\ \vdots \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \end{matrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} \text{\textit{n}_z \textit{alternativas (linhas)}} \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix}$$

A matriz **MD** pode ser ainda apresentada através de uma tabela (quadro 4.1), estando os *atributos* dispostos nas colunas e as *alternativas* nas linhas. As células contêm os valores dos *atributos* para cada *alternativa*.

Quadro 4.1 – Representação de MD na forma tabular.

| | Atributo 1 | Atributo 2 | ... | Atributo j | ... | Atributo n_a |
|---------------------------------|-------------|-------------|-----|-------------|-----|----------------|
| Alternativa 1 (z_1) | $a_{1,1}$ | $a_{1,2}$ | ... | $a_{1,j}$ | ... | a_{1,n_a} |
| Alternativa 2 (z_2) | $a_{2,1}$ | $a_{2,2}$ | ... | $a_{2,j}$ | ... | a_{2,n_a} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Alternativa i (z_i) | $a_{i,1}$ | $a_{i,2}$ | ... | $a_{i,j}$ | ... | a_{i,n_a} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Alternativa n_z (z_{n_z}) | $a_{n_z,1}$ | $a_{n_z,2}$ | ... | $a_{n_z,j}$ | ... | a_{n_z,n_a} |

A título de exemplo suponha-se que os objetivos para os *critérios de avaliação* são de maximização. O problema pode ser formalizado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} & \text{"max"} z_i \\ & \text{su}j : z_i \in Z \end{aligned} \quad (4.3)$$

ou seja, que se pretende maximizar todos os critérios de avaliação para a *alternativa* z_i e que esta pertence a um conjunto Z de *alternativas* admissíveis. Na sua generalidade os problemas não permitem a determinação duma solução “ótima” dentro da zona admissível devido à impossibilidade de satisfazer simultaneamente todos os *atributos* da melhor maneira possível. A presença de aspas na função “max” indica a impossibilidade de maximizar conjuntamente todos os *atributos*. Apenas se verifica a existência de solução ótima quando ocorre $n_a=1$, ou seja o problema tem apenas um único atributo ou quando os critérios não são conflituosos, permitindo assim encontrar um valor ótimo.

Os *atributos*, independentemente da categoria, podem ser apresentados segundo os diferentes tipos:

- Quantitativos ou numericamente, $z_{ij} \in \mathfrak{R}$ (ex.: 45; 8,2);
- Ordinais (ex.: 4º; 5º);
- Categorias, expressões linguísticas ou siglas (ex.: muito bom, suficiente; A, B, C);
- Intervalos onde se situa o valor de z_{ij} (ex.: [0; 10[, [10, 20]).

A representação mais usual é a quantitativa, por ser a de mais fácil utilização tanto para operações de normalização como de agregação e por se apresentar como a mais adequada para a generalidade das situações.

A representação ordinal distribui as *alternativas* ordenadamente (de forma crescente ou decrescente), indicando quais as mais vantajosas. No entanto tem a desvantagem de não indicar qual a distância relativa entre duas *alternativas*. É necessário saber se o benefício provocado por uma alternativa melhor classificada compensa o “custo” associado a esta.

Em certas situações, os *atributos* são descritos com base em representações não numéricas, usando escalas qualitativas. São geralmente estabelecidos com base numa classificação numérica, no entanto, à sua tradução para valores quantitativos associa-se perda de informação.

Por fim, as representações por intervalos são utilizadas quando a única informação que existe acerca de um atributo se refere aos limites entre os quais o seu valor se deve situar.

4.3.2. NORMALIZAÇÃO

Os dados obtidos são sujeitos a várias transformações de modo a facilitar as operações de análise envolvidas no método multi-critério. Neste trabalho apenas se faz referência à “normalização”, visto ser a única tarefa de processamento de dados relevante para este trabalho.

A normalização é necessária devido ao relacionamento de atributos com diferentes escalas ou para simplificar as operações quando se lida com atributos de grande dimensão.

É usual um mesmo problema lidar com atributos medidos em diferentes escalas de valor ou com diferentes limites ou ainda com objectivos inversos. A normalização permite uma uniformização dos valores dos atributos numa mesma escala, o que por sua vez possibilita a comparação entre estes. Pode-se estabelecer uma equação genérica para a normalização dos valores a_{ij} que se denominam $a_{i,j} - N$:

$$a_{i,j} - N = \text{Normalizar}(a_{i,j}) \quad (4.4)$$

Existe uma grande variedade de processos de normalização, com características próprias, que se adequam ao tipo de informação em análise. O utilizador deve usar o seu discernimento na escolha do processo mais apropriado ao tipo de dados com que está a lidar. Os dados disponíveis podem variar de cariz, podendo ser mais objectivos ou subjectivos, conforme o processo de medição destes. Para dados de teor objectivo, pode-se realizar uma normalização vectorial ou uma transformação linear de escala. No entanto, neste trabalho apenas se irá proceder à normalização de dados obtidos subjectivamente, daí que os processos referidos anteriormente não serão desenvolvidos neste capítulo. Para dados medidos de maneira

subjectiva, considera-se que uma maneira simples e eficaz de normalizar os valores será através duma escala de conversão, em que os valores medidos são traduzidos a partir de correspondências entre gamas de valores pré-definidas pelo utilizador.

4.3.3. DECISÕES MULTIATRIBUTO

Procede-se à apresentação de conceitos normalmente utilizados nos modelos de decisão. Uma vez mais, supõe-se a maximização do *atributo*.

A) *Solução dominada*: Uma alternativa z_b diz-se inferior ou dominada pela *alternativa* z_a se e só se:

$$z_{b,j} \leq z_{a,j}, j = 1, \dots, n_a \wedge z_a \neq z_b \quad (4.5)$$

Isto significa que os valores de todos os *atributos* de z_b são menores ou iguais aos valores correspondentes de z_a , devendo um deles ser obrigatoriamente menor. Tal situação é representada pela figura 4.2.

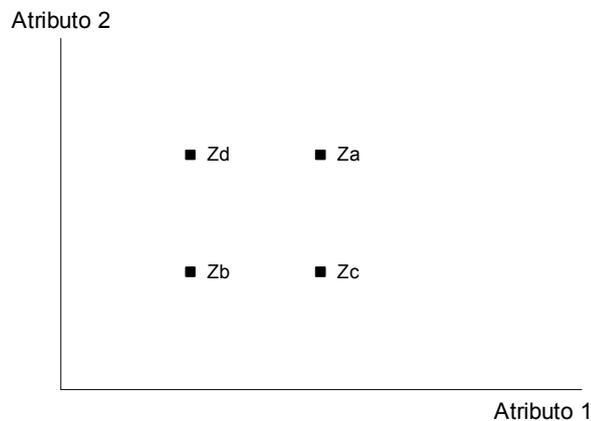


Figura 4.2 – Alternativa z_a domina as restantes alternativas.

Caso clássico em que uma alternativa é melhor ou igual em ambos os atributos considerados. Neste tipo de situação não é necessária uma análise por parte do agente de decisão, pois não há nenhuma razão para preferir a alternativa z_a em relação às outras.

B) *Solução eficiente*: Uma alternativa z_a diz-se eficiente ou não dominada se não existir nenhuma solução admissível que a domine, como se pode ver na figura 4.3.

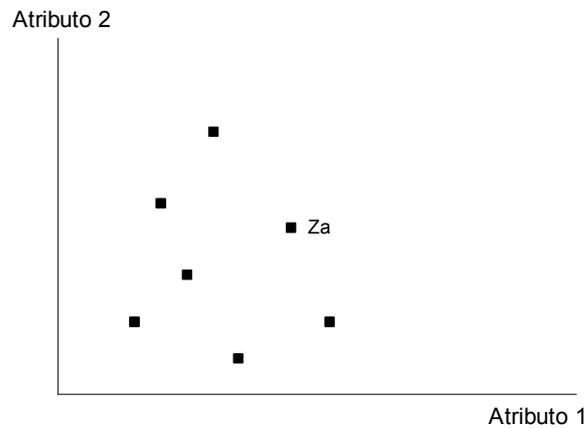


Figura 4.3 – Alternativa z_a é eficiente, não sendo dominada.

Esta solução eficiente, não sendo a melhor segundo todos os objectivos, garante um comportamento adequado. A escolha duma solução em detrimento de outra significa uma melhoria face a um atributo, piorando outros.

C) *Dominação convexa*: Uma alternativa z_a diz-se dominada convexamente por um conjunto $D \subset Z$ se e só se z_a não é dominada por nenhuma alternativa de D , mas existe uma combinação linear convexa das alternativas desse conjunto que domina z_a , como se pode ver na figura 4.4.

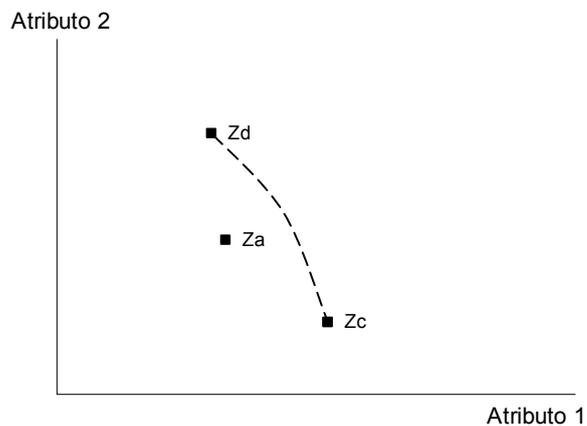


Figura 4.4 – Alternativa z_a não é dominada por z_d ou z_c mas é dominada convexamente por essas.

4.4. METODOLOGIA

4.4.1. INTRODUÇÃO

Encontram-se desenvolvidos várias metodologias para os processos de ajuda à decisão na selecção multi-critério. Neste capítulo procede-se à descrição do método mais adequado e que irá ser aplicado no problema em questão no âmbito do presente estudo. É importante que a metodologia adoptada seja eficaz, simples e clara. Faz-se também uma breve referência a métodos de análise preliminar.

4.4.2. ANÁLISE PRELIMINAR

Os métodos de análise preliminar permitem uma redução das alternativas (z_i) em estudo, facilitando a análise posterior. Destacam-se os métodos *conjuntivos* e *disjuntivos*, que são realizados com base em limites rígidos pré-definidos pelo agente de decisão.

O método *conjuntivo* estabelece valores de corte, eliminando alternativas (z_i) em que possuam pelo menos um atributo que tenha um valor que não cumpre os limites estabelecidos. Tem a desvantagem de não considerar os valores dos outros atributos, mesmo que sejam muito bons, ou seja a alternativa pode ser rejeitada apenas por uma pequena diferença no valor dos atributos face aos níveis de corte.

O método *disjuntivo* utiliza-se para situações onde se pretende seleccionar apenas alternativas (z_i) que possuam um atributo ou mais, com valores excepcionais, sendo irrelevantes os valores dos outros atributos. Resulta como uma expressão da preferência do agente de decisão em ter apenas alternativas que, por exemplo, sejam muito baratas.

4.4.3. MÉTODO ADITIVO SIMPLES

Tem como base a agregação dos valores dos atributos de cada alternativa (z_i) por uma fórmula linear, sendo o valor de cada atributo pesado de acordo com a importância que este assume, quantificando um valor final (v) que irá ser associado às alternativas conforme os valores dos atributos associados.

$$v(z_i) = \sum_{j=1}^{n_a} \omega_j \times a_{i,j} \quad (4.6)$$

Pode-se fazer uma normalização prévia dos atributos em estudo, como já se fez referência (ver subcapítulo 4.3.2.), e nesse caso os pesos (ω) reflectem a importância relativa dos critérios. Caso não se proceda a uma normalização dos valores dos atributos os pesos ω_j incluem um factor de escala, não tendo assim uma relação directa com o seu peso relativo.

A simplicidade deste método leva a que seja usado de modo indisciplinado sem ter em atenção a verificação do pressuposto de que os valores de compensação são constantes em relação aos valores dos atributos. Por outras palavras, se o grau de satisfação dum atributo aumentar, este tem que ser compensado à custa da diminuição do grau de satisfação associado a outros atributos, mantendo-se inalterável o nível de satisfação global. Para uma situação com dois atributos (a_1 e a_2), o valor de compensação (λ) será:

$$\lambda = \frac{a_1}{a_2} \quad (4.7)$$

Assim sendo, para uma alternativa z_i , a variação de Δ no valor do primeiro atributo (a_1) tem de ser compensado por uma variação de $-\lambda.\Delta$ no valor do segundo atributo (a_2), ou seja:

$$a_1.\omega_1 + a_2.\omega_2 = \omega_1.(a_1 + \Delta) + \omega_2.(a_2 - \lambda.\Delta) \quad (4.8)$$

4.5. APLICAÇÃO (EXEMPLO PRÁTICO)

De modo a tornar clara a formalização até aqui apresentada procede-se a uma exemplificação da metodologia exposta até agora, usando como objecto de estudo, a aquisição do automóvel, já debatida parcialmente neste capítulo.

Definidos os *critérios de avaliação*, os *atributos* e *objectivos* associados pode-se estabelecer a matriz de decisão. Usa-se a forma tabelar (quadros 4.2 e 4.3). Foram sugeridos três *critérios de avaliação* (c_i):

- c_1 : *eficiência* do automóvel;
- c_2 : *custo* do automóvel;
- c_3 : *desempenho* do automóvel.

Os atributos ($a_{i,j}$) associados aos critérios expostos e respectivos sub-atributos são:

- a_1 : *consumo* associado ao automóvel (l/100 km);
 - $a_{1,1}$: consumo de *óleo*;
 - $a_{1,2}$: consumo de *gasolina*.
- a_2 : *custo total* do automóvel (€);
 - $a_{2,1}$: custo de *compra*;
 - $a_{2,2}$: custo de *manutenção*;
 - $a_{2,3}$: custo do *seguro*.
- a_3 : *potência* (cv);
- a_4 : *cilindrada* (cm³).

Quadro 4.2 – Valores dos sub-atributos ($a_{i,j}$) para as alternativas (z_i) possíveis.

| Alternativas (z_i) | $a_{1,1}$ | $a_{1,2}$ | $a_{2,1}$ | $a_{2,2}$ | $a_{2,3}$ |
|---------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------------|
| | Consumo de óleo | Consumo de gasolina | Custo de compra | Custo de manutenção | Custo de seguro e imposto |
| | (l por 10.000 km) | (l por 100 km) | (€) | (€/ano) | (€/ano) |
| z_1 : Carro 1 | 0,5 | 6,0 | 13.500 | 1.300 | 180 |
| z_2 : Carro 2 | 1,0 | 4,5 | 15.000 | 1.000 | 200 |
| z_3 : Carro 3 | 0,8 | 4,5 | 20.000 | 2.000 | 220 |
| z_4 : Carro 4 | 1,3 | 7,5 | 26.000 | 2.000 | 240 |

Quadro 4.3 – Valores dos atributos (a_i) para as alternativas (z_i) possíveis.

| Alternativas (z_i) | a_3 | a_4 |
|---------------------------|------------------|---------------------------------|
| | Potência (cv) | Cilindrada (cm^3) |
| z_1 : Carro 1 | 74 | 1320 |
| z_2 : Carro 2 | 92 | 1560 |
| z_3 : Carro 3 | 121 | 1680 |
| z_4 : Carro 4 | 187 | 2245 |

Considera-se recomendável fazer uma *normalização* dos atributos. A título de exemplo, procede-se a uma normalização semelhante àquela conduzida no caso de estudo analisado a seguir no âmbito deste trabalho. As escalas de conversão adoptadas para os atributos a normalizar estão expostas nos quadros 4.4 e 4.5.

Nesta fase poder-se-ia fazer uma análise preliminar de modo a reduzir alternativas. Usando o método *conjuntivo* pode-se estabelecer um *valor de corte*, de modo a que qualquer alternativa que possua a classificação 0 (zero) para qualquer atributo seja eliminada do processo de análise. Pela análise do quadro 4.6 pode-se verificar que a alternativa “Carro 4” tem um atributo cuja classificação é 0, sendo assim retirada do processo de multi-critério.

De modo a calcular os atributos, é necessário atribuir pesos (ω) aos sub-atributos já normalizados, de acordo com o método aditivo simples. Como os atributos serão normalizados não é necessário incluir um factor de escala nos pesos a associar aos atributos. Estabeleceram-se os pesos, de acordo com a importância relativa dos atributos (quadro 4.7).

Quadro 4.4 – Escala de conversão para a normalização dos sub-atributos associados.

| $a_{1,1}$ | $a_{1,1_N}$ | $a_{1,2}$ | $a_{1,2_N}$ | $a_{2,1}$ | $a_{2,1_N}$ |
|---|------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|
| Consumo de óleo (l por 10.000 km) | Classificação normalizada | Consumo de gasolina (l por 100 km) | Classificação normalizada | Custo de compra ($\text{€} \times 10^3$) | Classificação normalizada |
| $\leq 0,5$ | 1,0 | $\leq 5,0$ | 1,0 | ≤ 9 | 1,0 |
|]0,5 : 1,0] | 0,8 |]5,0 : 8,0] | 0,8 |]9,0 : 12,0] | 0,8 |
|]1,0 : 1,5] | 0,5 |]8,0 : 10,0] | 0,6 |]12,0 : 15,0] | 0,6 |
|]1,5 : 2,0] | 0,2 |]10,0 : 12,0] | 0,4 |]15,0 : 18,0] | 0,4 |
| > 2 | 0,0 |]12,0 : 15,0] | 0,2 |]18,0 : 21,0] | 0,2 |
| | | $> 15,0$ | 0,0 | $> 21,0$ | 0,0 |

Quadro 4.4 – Escala de conversão para a normalização dos sub-atributos associados (continuação)

| $a_{2,2}$ | $a_{2,2_N}$ | $a_{2,3}$ | $a_{2,3_N}$ |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Custo de manutenção (€/ano) | Classificação normalizada | Custo de seguro e imposto (€/ano) | Classificação normalizada |
| ≤ 500 | 1,0 | ≤ 150 | 1,0 |
|]500 : 1000] | 0,8 |]150 : 200] | 0,7 |
|]1000 : 1500] | 0,6 |]200 : 250] | 0,3 |
|]1500 : 2000] | 0,4 | > 250 | 0,0 |
|]2000 : 2500] | 0,2 | | |
| > 2500 | 0,0 | | |

Quadro 4.5 – Escala de conversão para a normalização dos atributos a_3 (potência) e a_4 (cilindrada).

| a_3 | a_{3_N} | a_4 | a_{4_N} |
|------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Potência (cv) | Classificação normalizada | Cilindrada (cm ³) | Classificação normalizada |
| ≥ 150 | 1,0 | ≥ 2000 | 1,0 |
|]150 : 120] | 0,8 |]2000 : 1700] | 0,8 |
|]120 : 90] | 0,5 |]1700 : 1400] | 0,5 |
|]90 : 60] | 0,3 |]1400 : 1100] | 0,3 |
| < 60 | 0,0 | <1100 | 0,0 |

Quadro 4.6 – Valores normalizados dos sub-atributos (0 a 1).

| Alternativas (z_i) | $a_{1,1_N}$ Consumo de óleo | $a_{1,2_N}$ Consumo de gasolina | $a_{2,1_N}$ Custo de compra | $a_{2,2_N}$ Custo de manutenção | $a_{2,3_N}$ Custo de seguro e imposto |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---|
| z_1 : Carro 1 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,7 |
| z_2 : Carro 2 | 0,8 | 1,0 | 0,6 | 0,8 | 0,7 |
| z_3 : Carro 3 | 0,8 | 1,0 | 0,2 | 0,4 | 0,3 |
| z_4 : Carro 4 | 0,5 | 0,8 | 0,0 | 0,4 | 0,3 |

Quadro 4.7 – Valores dos pesos (ω) atribuídos aos sub-atributos (0 a 1).

| Atributo | Sub-atributo | Peso (w_j) |
|------------------------------|--|-----------------|
| a ₁ : consumo | a _{1,1} : consumo de óleo | 0,10 |
| | a _{1,2} : consumo de gasolina | 0,90 |
| | | $\Sigma = 1,00$ |
| a ₂ : custo total | a _{2,1} : custo de compra | 0,60 |
| | a _{2,2} : custo de manutenção | 0,35 |
| | a _{2,3} : custo de seguro e imposto | 0,05 |
| | | $\Sigma = 1,00$ |

Aplicando o método aditivo simples obtém-se então os atributos, que estão directamente relacionados com os critérios de avaliação (c_i). É necessário fazer ainda a normalização dos atributos *potência* e *cilindrada*, de modo a manter a coerência no processo. No quadro 4.8 apresentam-se os valores normalizados para os atributos associados.

Quadro 4.8 – Valores normalizados dos atributos associados (0 a 1).

| Alternativas (z_i) | a _{1_N} | a _{2_N} | a _{3_N} | a _{4_N} |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Consumo | Custo total | Potência | Cilindrada |
| z ₁ : Carro 1 | 0,82 | 0,61 | 0,30 | 0,30 |
| z ₂ : Carro 2 | 0,98 | 0,68 | 0,50 | 0,50 |
| z ₃ : Carro 3 | 0,98 | 0,28 | 0,80 | 0,50 |

Voltam-se a quantificar os pesos (ω) a associar a cada atributo, de acordo com o método aditivo simples (quadro 4.9). Pode-se agora estudar qual a melhor alternativa (z_i), face aos pesos considerados (quadro 4.10). De notar que os pesos atribuídos para cada atributo foram de acordo com as preferências do agente de decisão e que estes podem ser alterados, tendo em conta os valores de compensação, como já foi referido anteriormente neste capítulo.

Quadro 4.9 – Valores dos pesos (ω) atribuídos aos atributos associados (0 a 1).

| Atributo | Peso (w_j) |
|-----------------|----------------|
| Custo total | 0,50 |
| Consumo | 0,20 |
| Potência | 0,15 |
| Cilindrada | 0,15 |
| $\Sigma = 1,00$ | |

$$\begin{aligned}
 \text{Classificação} &= 0,5. \text{Custo total} + 0,2. \text{Consumo} + 0,15. \text{Potência} + 0,15. \text{Cilindrada} \\
 &= 0,5.(0,6. \text{Custo_compra} + 0,35. \text{Custo_manutenção} + 0,05. \text{Custo_seguro_imposto}) + \\
 &\quad 0,2.(0,1. \text{Consumo_óleo} + 0,9. \text{Consumo_gasolina}) + 0,15. \text{Potência} + 0,15. \text{Cilindrada}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Quadro 4.10 – Classificação das alternativas.

| Alternativa (z_i) | Classificação (v) |
|-----------------------|-----------------------|
| Carro 1 | 0,62 |
| Carro 2 | 0,78 |
| Carro 3 | 0,74 |

Pode-se assim concluir que perante os pesos escolhidos de acordo com as preferências do agente de decisão, a solução “Carro 2” apresenta-se como a melhor alternativa.

4.6. JUSTIFICAÇÃO DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MULTI-CRITÉRIO

O presente trabalho levanta algumas hipóteses para a sua resolução, havendo em consideração um conjunto de atributos. Está-se perante um problema multi-critério, de índole multiatributo, devido ao grande número de alternativas existentes para a sua resolução, estando os atributos explicitamente definidos. Tratando-se de um projecto de investigação, o número de hipóteses para resolver o problema de modo mais eficaz e completo possível é elevado.

Para a resolução do problema terão que se definir os *critérios de avaliação* (que vão dizer respeito à qualidade acústica da igreja, segundo diferentes abordagens) e os *atributos* associados a estes, que vão ser seleccionados entre os diversos parâmetros acústicos subjectivos. Toda esta metodologia é descrita no capítulo seguinte.

5

MÉTODO MULTI-CRITÉRIO EM ACÚSTICA DE IGREJAS

5.1. OBJECTIVOS

Neste capítulo pretende-se aplicar a metodologia multi-critério, usando o método aditivo simples, de modo a conseguir determinar um algoritmo que estabelecesse uma quantificação da qualidade acústica duma igreja.

Procede-se à definição dos *critérios de avaliação*, segundo os quais o problema vai ser abordado, assim como dos *atributos* associados a estes, que irão ser seleccionados entre os parâmetros acústicos subjectivos medidos nos trabalhos anteriores já referidos.

Pretende-se assim conseguir estabelecer um método simples e eficaz de modo a poder quantificar a *Qualidade Acústica da Igreja (QAI)*, sendo fiel à perspectiva que o utilizador possa ter do comportamento acústico da igreja.

5.2. REQUISITOS PARA UM COMPORTAMENTO ACÚSTICO ADEQUADO

Já aqui foi feita referência às mudanças que a liturgia nas igrejas católicas sofreu e o impacto que tiveram no desempenho acústico das igrejas, especialmente o Segundo Concílio do Vaticano, em 1965.

A igreja deve satisfazer simultaneamente boas condições para a expressão da *palavra* e da *música*, no entanto estes duas condições, indispensáveis para um bom comportamento acústico global, requerem diferentes requisitos, o que torna o carácter acústico das igrejas de difícil concretização e avaliação. No entanto deve-se ter em consideração que é a oração o principal veículo da fé e do serviço litúrgico, daí que seja natural que a qualidade da palavra seja a componente mais importante do comportamento acústico na igreja.

É fundamental que uma igreja possua propriedades acústicas que possibilitem uma boa inteligibilidade da palavra assim como uma boa percepção da música. No que diz respeito aos diferentes tempos de reverberação, para a palavra deseja-se um tempo de reverberação reduzido (na ordem dos 0,8 a 1 segundo), de maneira a perceber com clareza cada fragmento de som. No entanto, de modo a ter um bom desempenho acústico para a música deseja-se um tempo de reverberação maior (entre 2,0 a 2,2 segundos, eventualmente mais para situações específicas), de modo a tornar o som mais fluído e a

esconder pequenas imperfeições ou ruídos mecânicos. O tempo de reverberação ideal para um bom desempenho acústico da igreja face à música revela-se prejudicial para a inteligibilidade da palavra e vice-versa. De modo a haver uma boa inteligibilidade da palavra, é necessário ter em consideração outros factores além do tempo de reverberação. É importante que a intensidade do som directo, ou seja, a primeira onda sonora a atingir o receptor, tenha uma maior intensidade do que o som que é reflectido e a intensidade sonora com que é emitida. Estes factores podem ser estudados a partir dos parâmetros acústicos objectivos já referidos no capítulo 2.

Os materiais usados no interior da igreja também têm relevância na expressão da música. Por exemplo, é imprescindível que na área envolvente do coro e do órgão não haja materiais que funcionem como absorventes sonoros, tais como carpetes ou cortinas.

A arquitectura das igrejas católicas é tradicionalmente caracterizada por um tecto alto, volumes elevados e paredes muito reflectoras, o que tende a causar um longo tempo de reverberação e a criar problemas de cariz acústico. Estes no entanto podem ser de alguma forma colmatados através de certas práticas, tais como a implantação, ou a remoção de materiais absorventes em áreas específicas (recomenda-se a remoção de qualquer material deste género na área envolvente do coro e do órgão e, no caso de igrejas com ecos o uso de tais materiais nas paredes reflectoras). Outra forma de contornar estes problemas acústicos é ter as áreas destinadas ao coro e ao órgão em zonas mais elevadas do que a congregação e não em locais mais recolhidos, de modo a permitir a projecção do som. Conclui-se assim que as igrejas apresentam uma grande problemática face à acústica.

Pretende-se que o método aqui exposto consiga traduzir duma forma razoável o comportamento acústico global de uma igreja, tendo em conta os diferentes requisitos necessários para uma qualidade acústica aceitável para os padrões estabelecidos presentemente.

Como foi referido, os parâmetros acústicos objectivos e os parâmetros arquitectónicos tendem a influenciar bastante a acústica de uma igreja, sendo os elementos caracterizadores da qualidade do som, daí que esses elementos serão usados para traduzir o comportamento dos *atributos* associados aos *critérios de avaliação* definidos.

5.3. DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Antes de se proceder a uma tentativa da resolução do problema será necessário proceder à definição dos *critérios de avaliação* (c_d) a considerar na sua abordagem. Como já foi referido, a cada *critério de avaliação* estão associados *atributos* ($a_{i,j}$) que medem os níveis de satisfação do critério para cada *alternativa* (z_i) considerada assim como um objectivo que indica o sentido de aumento dessa satisfação.

De acordo com o que foi enunciado anteriormente, de modo a uma igreja possuir um bom comportamento acústico global é necessário uma boa inteligibilidade da palavra assim como uma boa percepção da música. Como tal, foram escolhidos os seguintes *critérios de avaliação* (c_1 e c_2):

- c_1 : A qualidade da *palavra* na igreja;
- c_2 : A qualidade da *música* na igreja.

Dos dois critérios enumerados, convencionou-se que o que está relacionado com a qualidade da palavra será o mais importante na abordagem ao problema. Como já foi referido, a oração ocupa hoje um lugar de destaque nas igrejas católicas, sendo, tradicionalmente, a actividade de maior importância nos serviços religiosos. A *música* também ocupa um lugar importante, não possuindo porém tanta relevância como a palavra. A satisfação destes dois critérios garante uma impressão geral satisfatória da qualidade da acústica por parte do auditor.

Os *atributos* associados aos *critérios de avaliação* serão parâmetros acústicos subjectivos. A escolha de parâmetros subjectivos para este efeito prende-se com o facto de estes traduzirem de uma forma eficaz a qualidade da palavra e da música numa igreja do ponto de vista do auditor, que é o que se pretende quantificar. Os parâmetros acústicos objectivos (ver capítulo 2) são conceitos um tanto abstractos que não indicam directamente qual o comportamento acústico perceptível da igreja. Em seguimento do que foi dito, consideram-se que os parâmetros acústicos subjectivos traduzem melhor a percepção do auditor, sendo mais adequados para medir os níveis de satisfação dos *critérios de avaliação*.

5.4. DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS

Ao *critério de avaliação* c_1 (referente à qualidade da *palavra* na igreja), o *atributo* associado será o parâmetro acústico subjectivo (a_1):

- a_1 : P80.

Esta medida foi avaliada na tese “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998) e discutida no subcapítulo 2.2.4.3. Este parâmetro quantifica as palavras correctamente compreendidas por cada auditor, numa lista de 80 palavras lidas, estando portanto directamente relacionado com a inteligibilidade da palavra no local. Não foi considerado mais nenhum parâmetro pois este é o único directamente relacionado com a inteligibilidade da palavra, sendo o único parâmetro acústico subjectivo utilizado para a avaliação da mesma.

Ao *critério de avaliação* c_2 (referente à qualidade da *música* na igreja), irá estar associado (em forma de *atributos*) parâmetros acústicos subjectivos utilizados para a avaliação da música, medidos na tese “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos*” (Morgado, 1996) e já referidos anteriormente (ver subcapítulo 2.2.4.2). Considera-se que estas medidas conseguem avaliar adequadamente a qualidade da música na igreja. No entanto, ponderar conjuntamente todos os dez parâmetros sem uma análise preliminar é uma atitude precipitada. De modo a escolher quais os *atributos* que melhor reflectem o comportamento acústico da igreja face à música, considerou-se necessário fazer uma escolha dos parâmetros acústicos subjectivos de modo a evitar a inclusão de medidas irrelevantes ou desnecessárias. Esta avaliação recorreu a algumas conclusões alcançadas num dos trabalhos precedentes a este (Morgado, 1996).

O parâmetro *impressão geral* (IMPG) é de importância vital neste trabalho. Irá servir de base de comparação às alternativas testadas, ou seja, os valores registados para o parâmetro *impressão geral* - que indica a percepção global que o auditor tem da qualidade da música da igreja - serão comparados com as classificações atribuídas à qualidade acústica da música das igrejas pelas diferentes alternativas em estudo. Apesar deste parâmetro poder ser correlacionado directamente com a qualidade da música considera-se

que o uso de mais parâmetros proporciona uma análise mais fina, ou seja, consegue fornecer mais pontos de vista sobre a qualidade da música do que apenas pelo análise do parâmetro *impressão geral*.

Apresenta-se no quadro 5.1 os coeficientes de correlação ($|R|$) entre os parâmetros subjectivos, realçando-se os considerados neste trabalho.

Quadro 5.1 – Coeficientes de correlação ($|R|$) entre parâmetros acústicos subjectivos (usando as médias dos dados para cada igreja), (Morgado, 1996).

| Parâmetros | INTS | CLA | REV | ECO | INTM | DIR | ENV | EQT | IMPG |
|-------------|------|------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|
| RF | 0,15 | 0,13 | 0,06 | 0,11 | 0,19 | 0,20 | 0,05 | 0,31 | 0,15 |
| INTS | - | 0,54 | 0,39 | 0,51 | 0,82 | 0,54 | 0,58 | 0,60 | 0,66 |
| CLA | - | - | 0,92 | 0,90 | 0,82 | 0,96 | 0,11 | 0,79 | 0,94 |
| REV | - | - | - | 0,84 | 0,69 | 0,90 | 0,27 | 0,68 | 0,80 |
| ECO | - | - | - | - | 0,74 | 0,89 | 0,18 | 0,85 | 0,88 |
| INTM | - | - | - | - | - | 0,81 | 0,29 | 0,78 | 0,88 |
| DIR | - | - | - | - | - | - | 0,08 | 0,82 | 0,93 |
| ENV | - | - | - | - | - | - | - | 0,08 | 0,11 |
| EQT | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,86 |

Parâmetros acústicos subjectivos: Ruído de fundo (RF); Intensidade do som (INTS); Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Ecos (ECO); Intimidade (INTM); Direcionalidade (DIR); Envolvimento (ENV); Equilíbrio tímbrico (EQT); Impressão geral (IMPG).

Na tese “Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos” (Morgado, 1996), o autor ao utilizar a média dos valores para cada igreja encontrou uma baixa correlação entre o parâmetro *impressão geral* (IMPG) e os parâmetros acústicos subjectivos *ruído de fundo* (RF), *envolvimento* (ENV) e *intensidade do som* (INTS) ($|R|=0,15$, $|R|=0,11$ e $|R|=0,66$, respectivamente). As baixas correlações verificadas vêm afastar a escolha destes parâmetros como *atributos* adequados para a avaliação da qualidade da *música*. Além da baixa correlação com a *impressão geral* (IMPG) é possível fazer outras considerações de modo a fazer uma melhor avaliação dos parâmetros acústicos subjectivos a utilizar como atributos.

Verifica-se também que o *ruído de fundo* (RF) é o parâmetro que demonstra menor correlação com os restantes parâmetros acústicos subjectivos ($|R| \leq 0,31$, usando os valores médios para cada igreja). O *ruído de fundo* tende a depender do ambiente geral envolvente, interior e exterior, isto é o ruído provocado por pessoas e/ou equipamento dentro da igreja, assim como ruído proveniente do exterior (tráfego ou condições meteorológicas, por exemplo). Por isso, este parâmetro é muito dependente do local exterior e não seria adequado incluí-lo neste método.

A *intensidade do som* (INTS) pode ser quantificada (dum modo um tanto simplista) em três categorias: baixo (em que o auditor não ouve a emissão sonora ou ouve mal); aceitável (em que a *intensidade do som* é suficiente para uma boa audição) e alta (em que o auditor sente-se incomodado pela elevado nível da

intensidade sonora). Esta última não se considera como provável de acontecer em igrejas. Tendo em conta que para níveis médios e baixos a *intensidade do som* não apresenta grande influência sobre os outros parâmetros, excepto talvez para a *intimidade* com que apresenta um grau de correlação elevado ($|R|=0,82$), não se considera este parâmetro como um atributo necessário.

O parâmetro *eco* (ECO), apesar de apresentar uma correlação significativa com outros parâmetros acústicos subjectivos, não se reflecte directamente nos critérios de avaliação considerados. É fácil de avaliar a presença ou não de ecos, no entanto fazer uma quantificação numérica do parâmetro torna-se difícil. A sua dificuldade de graduação para o auditor torna-a sua utilização como atributo inadequada.

Em conclusão, considera-se desnecessário o uso dos quatro parâmetros acústicos subjectivos enunciados, ou seja, o *ruído de fundo* (RF), a *intensidade do som* (INTS), o *eco* (ECO) e o *envolvimento* (ENV), preterindo o seu uso a favor dos parâmetros *clareza do discurso musical* (CLA), *reverberância* (REV), *intimidade* (INTM), *direccionalidade* (DIR) e *equilíbrio tímbrico* (EQT), que apresentam as maiores correlações ($|R|$) com a *impressão geral* (IMPG).

Sendo assim, para o critério c_2 , a qualidade da música na igreja, irão ser associados cinco parâmetros subjectivos como *atributos*, nomeadamente (a_2 a a_6):

- a_2 : *Clareza do discurso musical* (CLA);
- a_3 : *Reverberância* (REV);
- a_4 : *Intimidade* (INTM);
- a_5 : *Direccionalidade* (DIR);
- a_6 : *Equilíbrio tímbrico* (EQT).

A escolha destes parâmetros prende-se com o facto de poderem ser todos relacionados com o comportamento do espaço em estudo perante a música. A *clareza do discurso musical* (CLA) mede o grau de definição com que a música é percebida pelo auditor. A *reverberância* (REV), que indica a persistência do som no espaço, tem, como já se viu, um papel fundamental na música. A *intimidade* (INTM) reflecte a sensação de proximidade da fonte sonora, factor que se revela muito importante para o conforto do espectador. O *equilíbrio tímbrico* (EQT) diz respeito à igualdade (ou falta desta) entre frequências graves ou agudas, sendo essencial na música, de modo a garantir uma boa percepção. A inclusão do último parâmetro pode ser algo disputável, pois uma má *direccionalidade* (DIR) não implica necessariamente uma má percepção da música mas pode influenciar negativamente a experiência do auditor, daí se considerar que é um atributo necessário.

5.5. MÉTODO MULTI-CRITÉRIO ADITIVO SIMPLES

5.5.1. TRATAMENTO DE DADOS

O método multi-critério aditivo simples, tal como foi explicado no capítulo 4, agrega os valores dos *atributos* de cada *alternativa* por uma fórmula linear, sendo o valor de cada *atributo* pesado de acordo com a importância que este assume. Desta forma serão atribuídos pesos aos parâmetros acústicos subjectivos de acordo com a relevância que estes assumem na satisfação do *critério de avaliação* a que estão associados. Este método adequa-se bastante bem a este tipo de problema, em que é necessário uma quantificação dos *atributos* de modo a perceber o sentido de satisfação dos *critérios de avaliação*.

Determinados os *critérios de avaliação* (c_1 e c_2) e os respectivos *atributos* associados (a_1 a a_6) é necessário definir os *objectivos* para os *critérios de avaliação*. Sendo assim, para o *critério* c_1 , referente à qualidade da palavra, o *objectivo* é a maximização numérica do atributo *P80*. Para o *critério* c_2 , referente à qualidade da música, pretende-se maximizar numericamente todos os cinco *atributos* associados, com a excepção da *reverberância* (REV), em que o valor óptimo é intermédio. Foi feita uma avaliação do comportamento desejado para todos os parâmetros referentes ao *critério* c_2 segundo as indicações dispostas no quadro 5.2, fornecidas aos auditores aquando a avaliação *in situ* dos parâmetros acústicos subjectivos.

Verifica-se que o desejado para cada parâmetro acústico subjectivo é a obtenção da classificação máxima (7), excepto para a *reverberância*, em que classificação ideal é “5”. Uma classificação superior indica uma *reverberância* acima daquilo que é desejado. Além disso a escala adoptada para cada parâmetro não é linear, no sentido que entre duas classificações consecutivas poderá haver uma diferença qualitativa menor do que entre outras, por exemplo, para o parâmetro *direccionabilidade* a diferença entre as classificações “2” e “3” (*má* e *mediocre*, respectivamente) é mais significativa do que entre as classificações “6” e “7” (*muito boa* e *excelente*).

Apesar de quantificados na mesma escala considera-se necessária uma normalização destes cinco atributos. Como se está a lidar com dados medidos de maneira subjectiva, considera-se a aplicação duma escala de conversão, em que os valores medidos são traduzidos a partir de correspondências entre gamas de valores pré-definidas pelo utilizador. A normalização será feita baseada na descrição qualitativa atribuída a cada classificação. No entanto, para o atributo *equilíbrio tímbrico* (EQT) não foi fornecida uma classificação qualitativa, havendo apenas a indicação que às notas mínima e máxima correspondiam as classificações de *desequilibrado* e *equilibrado*, respectivamente. Como tal, para o parâmetro *equilíbrio tímbrico* será feita uma uniformização baseada numa distribuição proporcional dos valores.

Com base no exposto estabeleceram-se escalas de conversão para a normalização dos atributos usando os valores dispostos no quadro 5.3. Os atributos normalizados irão ter uma nomenclatura diferente (a_{i,j_N}), visto que a normalização acarreta alguma perda de rigor na informação, assim como uma mudança de escala, o que torna inadequado continuar a considerar os novos valores normalizados de igual forma. Devido à uniformização dos atributos será desnecessário atribuir um factor de escala aos pesos (ω_j) associados a estes.

Quadro 5.2 – Quadro com as indicações fornecidas aos auditores para preenchimento do teste de avaliação acústica subjectiva à música nas igrejas (Morgado, 1996).

| Clareza do discurso musical (CLA) | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| nada claro | muito pouco claro | pouco claro | clareza aceitável | clareza boa | clareza bastante boa | extremamente claro |
| Reverberância (REV) | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| totalmente seco | muito pouco reverberante | pouco reverberante | reverberância aceitável | boa reverberância | reverberância bastante alta | extremamente reverberante |

Quadro 5.2 – Quadro com as indicações fornecidas aos auditores para preenchimento do teste de avaliação acústica subjectiva à música nas igrejas (Morgado, 1996) (continuação).

| Intimidade (INTM) | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------|------------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| ausência de intimidade | muito pouco íntimo | pouco íntimo | intimidade confortável | boa intimidade | intimidade bastante boa | extremamente íntimo |
| Direccionalidade (DIR) | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| muito má | má | mediocre | suficiente | boa | muito boa | excelente |
| Equilíbrio tímbrico (EQT) | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| desequilibrado | | | | | | equilibrado |

Quadro 5.3 – Escala de conversão para a normalização (_N) dos atributos originais.

| Classificação original parâmetro | Classificação normalizada | Classificação original parâmetro | Classificação normalizada | Classificação original parâmetro | Classificação normalizada |
|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| CLA | CLA_N | REV | REV_N | INTM | INTM_N |
| 1 | 0,0 | 1 | 0,0 | 1 | 0,0 |
| 2 | 0,1 | 2 | 0,1 | 2 | 0,1 |
| 3 | 0,3 | 3 | 0,4 | 3 | 0,3 |
| 4 | 0,5 | 4 | 0,7 | 4 | 0,6 |
| 5 | 0,7 | 5 | 1,0 | 5 | 0,8 |
| 6 | 0,9 | 6 | 0,7 | 6 | 0,9 |
| 7 | 1,0 | 7 | 0,2 | 7 | 1,0 |
| Classificação original parâmetro | Classificação normalizada | Classificação original parâmetro | Classificação normalizada | | |
| DIR | DIR_N | EQT | EQT_N | | |
| 1 | 0,0 | 1 | 0,00 | | |
| 2 | 0,1 | 2 | 0,17 | | |
| 3 | 0,4 | 3 | 0,33 | | |
| 4 | 0,5 | 4 | 0,50 | | |
| 5 | 0,7 | 5 | 0,67 | | |
| 6 | 0,9 | 6 | 0,83 | | |
| 7 | 1,0 | 7 | 1,00 | | |

Parâmetros acústicos subjectivos: Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direccionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT).

Os valores considerados neste estudo são os valores médios para cada parâmetro para cada igreja. Tendo isto em atenção, é fácil de deduzir que muitos dos valores disponíveis poderão não ser valores inteiros, pois são a média aritmética das várias respostas dos auditores face aos diferentes parâmetros em análise. As escalas de conversão adoptadas foram construídas com base nas disposições descritas no quadro 5.2, que apenas considera valores inteiros. É necessária então fazer uma interpolação para as igrejas que registam valores não inteiros, de modo a obter um valor mais preciso. A escala adoptada para os valores normalizados foi unitária (0 a 1).

Procedeu-se também a uma normalização do parâmetro *P80*, pois este está quantificado numa escala diferente dos parâmetros acústicos subjectivos para a avaliação acústica da música (0 a 80). Para este parâmetro é apenas necessário uma conversão linear de escala, traduzindo os valores registados para uma escala unitária (0 a 1).

Apresenta-se no quadro 5.4 os valores normalizados para os atributos associados.

Quadro 5.4 – Valores normalizados médios para os atributos para cada igreja (escala 0 a 1).

| Igreja | CLA_N | REV_N | INTM_N | DIR_N | EQT_N | P80_N |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,52 | 0,96 | 0,69 | 0,59 | 0,74 | 0,90 |
| 2 | 0,92 | 0,54 | 0,82 | 0,84 | 0,86 | 0,97 |
| 3 | 0,80 | 0,61 | 0,70 | 0,66 | 0,50 | 0,93 |
| 4 | 0,23 | 0,70 | 0,17 | 0,33 | 0,58 | 0,75 |
| 5 | 0,63 | 0,90 | 0,67 | 0,68 | 0,75 | 0,93 |
| 6 | 0,70 | 0,79 | 0,68 | 0,65 | 0,72 | 0,90 |
| 7 | 0,35 | 0,81 | 0,56 | 0,48 | 0,68 | 0,93 |
| 8 | 0,53 | 0,98 | 0,72 | 0,62 | 0,78 | 0,92 |
| 9 | 0,73 | 0,75 | 0,83 | 0,73 | 0,78 | 0,89 |
| 10 | 0,77 | 0,80 | 0,81 | 0,80 | 0,81 | 0,91 |
| 11 | 0,71 | 0,88 | 0,36 | 0,61 | 0,49 | 0,89 |
| 12 | 0,27 | 0,57 | 0,36 | 0,39 | 0,47 | 0,84 |
| 13 | 0,66 | 0,70 | 0,38 | 0,61 | 0,73 | 0,89 |

5.5.2. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO MULTI-CRITÉRIO

Estão reunidas as condições para finalmente aplicar a metodologia multi-critério através do método aditivo simples. Considera-se útil e recomendável fazer um resumo em forma de um esquema gráfico (ver figuras 5.1 e 5.2) da metodologia aplicada até este ponto de modo a ajudar o leitor a compreender e a sintetizar os vários processos necessários para a aplicação do método multi-critério ao caso de estudo proposto.

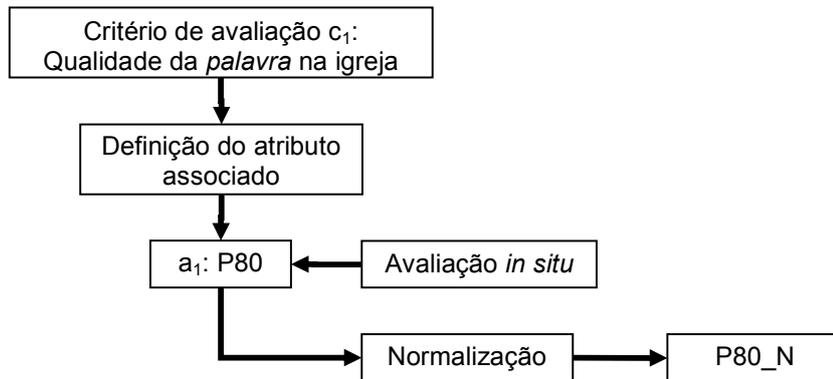


Figura 5.1 – Esquema tipo da metodologia aplicada para a determinação e tratamento dos atributos associados ao critério de avaliação c_1 (qualidade da *palavra*).

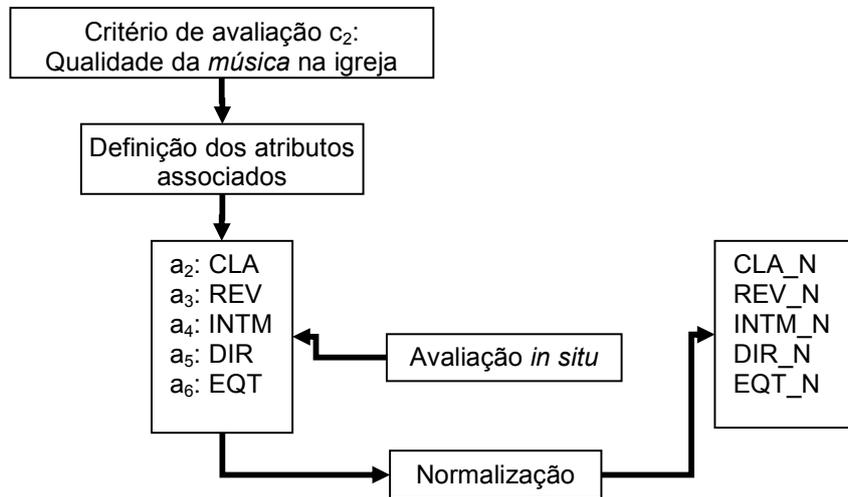


Figura 5.2 – Esquema tipo da metodologia aplicada para a determinação e tratamento dos atributos associados ao critério de avaliação c_2 (qualidade da *música*).

Efectuado o tratamento de dados necessários, pode-se por fim determinar o algoritmo final para calcular a *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI). A equação a determinar será caracterizada em função dos dois *critérios de avaliação* definidos (c_1 e c_2), traduzidos a partir dos *atributos* associados a cada um. Usa-se a seguinte formalização:

$$\begin{aligned}
 & \text{Qualidade Acústica da Igreja} = c_1 + c_2 \\
 \Leftrightarrow & \text{QAI} = \text{Qualidade da palavra} + \text{Qualidade da música} \\
 \Leftrightarrow & \text{QAI} = \omega_1 \cdot \text{Qualidade da palavra} + \omega_2 \cdot \text{Qualidade da música} \\
 \Leftrightarrow & \text{QAI} = (\omega_1 \cdot P80_N) + (\omega_{2,1} \cdot CLA_N + \omega_{2,2} \cdot REV_N + \omega_{2,3} \cdot INTM_N + \omega_{2,4} \cdot DIR_N + \omega_{2,5} \cdot EQT_N)
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

onde

$$\omega_2 = \omega_{2,1} + \omega_{2,2} + \omega_{2,3} + \omega_{2,4} + \omega_{2,5} \text{ e } \omega_j = \text{pesos}, \left(\sum_{j=1}^{n_a} \omega_j = 1 \right)$$

Parâmetros acústicos subjectivos: P80 (número de palavras entendidas numa lista de 80 palavras); Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direccionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT).

Realizada a normalização, pode-se agora com base no método aditivo simples, avaliar diversas hipóteses para o algoritmo final. Estabelecem-se algumas condições prévias, que reflectem as condições acústicas existentes (ou desejáveis) numa igreja e que devem ser consideradas na elaboração do algoritmo.

Como já se referiu a qualidade da *palavra* na igreja é o *critério de avaliação* mais importante (c_1), sendo que (na vasta maioria dos casos) a principal função da igreja é a oração. A *música* tende a funcionar como um complemento ao serviço litúrgico realizados nas igrejas, e não como a principal forma de expressão entre os fiéis. Considera-se então como inválida qualquer algoritmo que agregue ao *atributo* associado ao *critério de avaliação* c_1 (a medida P80) um peso inferior a 50%.

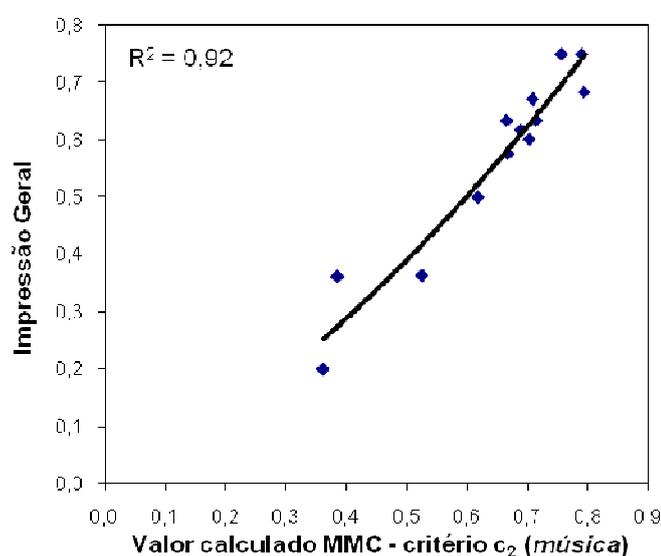
Relativamente ao *critério de avaliação* c_2 , referente à qualidade da música na igreja, existem cinco atributos associados aos quais serão atribuídos pesos ($\omega_{2,j}$) de acordo com a relevância que estes assumem na satisfação do critério de avaliação. Os parâmetros mais directamente relevantes para uma boa perceptibilidade da música são a *clareza do discurso musical* (CLA) e a *reverberância* (REV), logo terão mais peso que a *intimidade* (INTM), a *direccionalidade* (DIR) e o *equilíbrio tímbrico* (EQT). Os parâmetros *intimidade* e *direccionalidade* estão mais relacionados com o conforto do auditor enquanto que o *equilíbrio tímbrico* reflecte a perceptibilidade da música.

De modo a simplificar o processo de avaliação procede-se primeiro à avaliação do *critério de avaliação* c_2 , referente à qualidade da música. De acordo com o que foi considerado avalia-se primeiramente uma hipótese que tende a favorecer os atributos *clareza do discurso musical* (CLA) e *reverberância* (REV), atribuindo-lhes pesos mais significativos. Como a *intimidade* (INTM) e a *direccionalidade* (DIR) estão mais relacionados com o conforto do auditor (que é algo que vai afectar muito a percepção que o auditor tem da qualidade da música) atribui-se pesos maiores a estes parâmetros do que ao *equilíbrio tímbrico*. Como se está a considerar apenas a satisfação do *critério de avaliação* para a qualidade da *música*, os pesos associados terão um somatório total de 1, que serão depois convertidos para a escala adequada, dependendo do peso que será associado ao atributo P80.

Foi possível obter uma correlação bastante elevada da *impressão geral* com os cinco parâmetros acústicos subjectivos considerados ($R^2=0,92$), o que valida as ponderações feitas. Os valores finais considerados para os pesos agregados aos *atributos* associados apresentam-se no quadro 5.5. Pode-se constatar na figura 5.3 a relação entre o parâmetro *impressão geral* (IMPG) e o valor determinado pelo método multi-critério referente ao *critério de avaliação* c_2 .

Quadro 5.5 – Valores dos pesos ($\omega_{2,j}$) dados aos atributos associados ao critério de avaliação (c_2) para a qualidade da música.

| Atributo | Peso ($\omega_{2,j}$) |
|-----------------------------|-------------------------|
| Clareza do discurso musical | 0,37 |
| Reverberância | 0,23 |
| Intimidade | 0,16 |
| Direccionalidade | 0,21 |
| Equilíbrio tímbrico | 0,03 |
| $\Sigma = 1,00$ | |

Figura 5.3 – Representação gráfica da relação entre o parâmetro acústico subjectivo *Impressão Geral* e *Avaliação MMC* para o critério de avaliação c_2 (música), com curva de ajuste polinomial.

De notar que estes pesos (ver quadro 5.5) foram determinados com base na amostra de igrejas disponível, num total de 13, para a qual se revelaram eficazes. Pode-se concluir que o parâmetro acústico subjectivo mais relevante para a avaliação da qualidade da música na igreja parece ser a *clareza do discurso musical* (CLA), o que era expectável, visto que este parâmetro reflecte o grau de definição com que os sons são percebidos. A *reverberância* (REV), como era de esperar, tem uma influência bastante significativa. O parâmetro *direccionalidade* (DIR) assume uma ponderação semelhante o que justifica a sua selecção, revelando-se um parâmetro necessário na avaliação da percepção da música por parte do auditor. De referir ainda o baixo valor associado ao *equilíbrio tímbrico* (EQT).

Procede-se à quantificação do peso (ω_1) a associar ao atributo *P80* e estabelecer assim a escala aos pesos já agregados aos atributos referentes à avaliação da qualidade da música. Como já foi mencionado, tendo em conta a importância da perceptibilidade da palavra, qualquer hipótese que assumia um valor menor que

0,5 para o peso associado ao atributo *P80* não pode ser considerada. Ponderaram-se várias hipóteses (h_i), em que diferem os pesos para o atributo *P80* (ver quadro 5.6). Consequentemente o somatório dos pesos para os atributos associados ao critério de avaliação para a qualidade da música será igual à diferença entre 1 e o peso do atributo *P80*.

Foi possível comprovar que quanto maior o peso atribuído ao parâmetro *P80*, melhores são as classificações atribuídas às igrejas, ou seja, uma maior valorização do critério de avaliação c_1 (referente à qualidade da palavra) significa um aumento da *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI). Isto vem reforçar a ideia de que a *palavra* é de facto o critério mais importante para um bom desempenho acústico da igreja, sendo mais relevante para o conforto acústico dos auditores. Tendo isto em conta, as hipóteses que atribuem um peso mais elevado para o atributo *P80* revelam-se mais adequadas, eliminando-se assim a hipótese h_1 .

Quadro 5.6 – Hipóteses (h_i) propostas para a quantificação dos pesos atribuídos aos atributos associados.

| Hipótese 1 (h_1) | | | | | | | |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------------|
| Atributo | a_1 : P80 | a_2 : CLA | a_3 : REV | a_4 : INTM | a_5 : DIR | a_6 : EQT | |
| Pesos (ω_j) | 0,500 | 0,185 | 0,115 | 0,080 | 0,105 | 0,015 | $\Sigma = 1,000$ |
| Hipótese 2 (h_2) | | | | | | | |
| Atributo | a_1 : P80 | a_2 : CLA | a_3 : REV | a_4 : INTM | a_5 : DIR | a_6 : EQT | |
| Pesos (ω_j) | 0,600 | 0,148 | 0,092 | 0,064 | 0,084 | 0,012 | $\Sigma = 1,000$ |
| Hipótese 3 (h_3) | | | | | | | |
| Atributo | a_1 : P80 | a_2 : CLA | a_3 : REV | a_4 : INTM | a_5 : DIR | a_6 : EQT | |
| Pesos (ω_j) | 0,700 | 0,111 | 0,069 | 0,048 | 0,063 | 0,009 | $\Sigma = 1,000$ |

Parâmetros acústicos subjectivos: *P80* (número de palavras entendidas numa lista de 80 palavras); Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direcionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT).

Conclusivamente, tendo em contas todas as considerações e dados disponíveis, crê-se que as hipóteses h_2 e h_3 são viáveis, assim como qualquer uma que apresenta um valor intermédio entre 0,6 e 0,7 para os pesos a atribuir ao atributo *P80*. A partir do valor de 0,70 receia-se uma subvalorização do critério referente à qualidade da *música* na igreja, focando-se o algoritmo quase exclusivamente na qualidade da *palavra*, que apesar de ser o critério de valorização mais importante na avaliação da *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI), não pode anular o peso que a *música* assume nesta. Sugere-se então o seguinte algoritmo, que estabelece um compromisso equilibrado entre os dois critérios de avaliação considerados na avaliação deste problema:

$$Qualidade\ Acústica\ da\ Igreja = c_1 + c_2 \tag{5.2}$$

$$\Leftrightarrow QAI = Qualidade\ da\ palavra + Qualidade\ da\ música$$

$$\Leftrightarrow QAI = 0,65.Qualidade\ da\ palavra + 0,35.Qualidade\ da\ música$$

$$\Leftrightarrow QAI = (0,65.P80_N) + (0,1295.CLA_N + 0,0805.REV_N + 0,0560.INTM_N + 0,0735.DIR_N + 0,0105.EQT_N)$$

Parâmetros acústicos subjectivos: Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direcionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT).

Os pesos atribuídos a cada atributo pelo algoritmo proposto estão dispostos no quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Pesos atribuídos aos atributos associados.

| Atributo | a ₁ : P80 | a ₂ : CLA | a ₃ : REV | a ₄ : INTM | a ₅ : DIR | a ₆ : EQT | |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Pesos (ω_j) | 0,6500 | 0,1295 | 0,0805 | 0,0560 | 0,0735 | 0,0105 | $\Sigma = 1,0000$ |

Parâmetros acústicos subjectivos: P80 (número de palavras entendidas numa lista de 80 palavras); Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direcionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT).

Este algoritmo apresenta-se como uma hipótese viável, garantindo uma interpretação adequada da *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI). Mais adiante este algoritmo irá ser aplicado às igrejas em estudo, de modo a testar a sua eficácia.

6

MODELOS DE PREVISÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS

6.1. INTRODUÇÃO

A metodologia multi-critério aqui desenvolvida baseia-se na avaliação de cada igreja através de parâmetros acústicos subjectivos, como já foi referido previamente. Em geral, os parâmetros acústicos subjectivos não estão disponíveis, tendo-se apenas os dados relativos aos parâmetros acústicos objectivos e/ou aos parâmetros arquitectónicos duma igreja. É necessário estudar a relação entre os parâmetros acústicos subjectivos e os parâmetros acústicos objectivos assim como com os parâmetros arquitectónicos de modo a poder analisar modelos de correspondência e estabelecer modelos de previsão.

Geralmente a avaliação dos parâmetros acústicos subjectivos é preterida a favor dos parâmetros acústicos objectivos pois as medições destes implicam menos recursos (exclui a presença dum largo grupo de auditores) e tempo. Em outras situações poderá não haver qualquer tipo de medições acústicas, daí a importância de modelos de previsão em função unicamente de parâmetros arquitectónicos, que podem ser facilmente calculados através da consulta da planta da igreja ou medidos *in situ*. No entanto para dois dos parâmetros arquitectónicos considerados, nomeadamente *Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total* (ABSO_TOT) e *Coefficiente de Absorção Sonora Médio de todas as superfícies* (CABSO_ME) são sempre necessárias avaliações *in situ*, (embora de carácter meramente documental) de modo a determinar o tipo e a área dos materiais de revestimento existentes.

Serão estabelecidas duas abordagens relativamente aos modelos de previsão, usando os parâmetros arquitectónicos ou os parâmetros acústicos objectivos (ver figura 6.1). Caso haja medições para os parâmetros acústicos subjectivos (ou se for da vontade do utilizador realizar tais medições) nada impede que os valores registados sejam usados directamente. Aliás, com o uso de valores medidos *in situ* em vez de valores calculados através dos modelos de previsão, consegue-se resultados mais fiáveis e precisos.

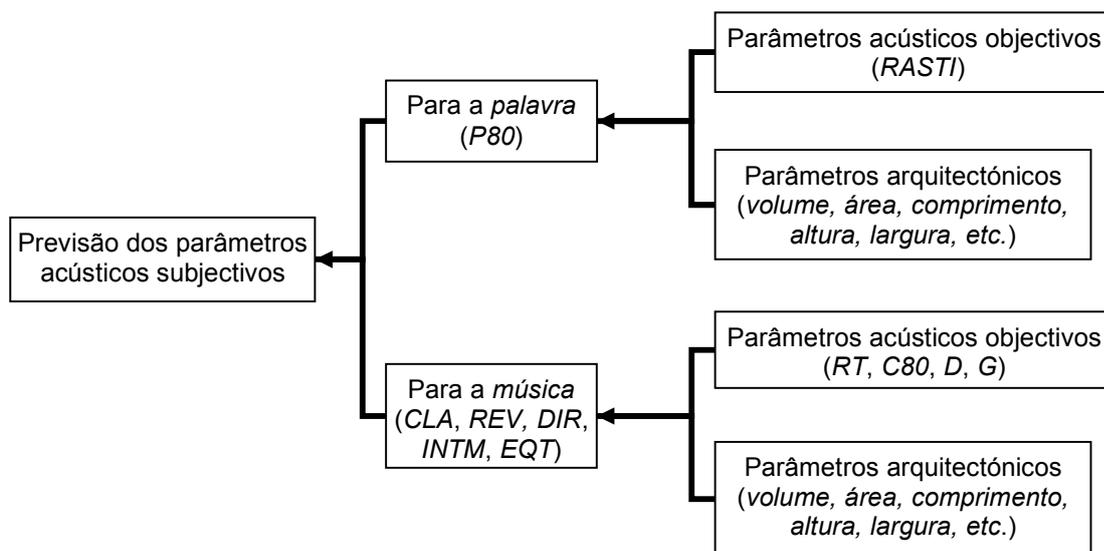


Figura 6.1 – Esquema enunciativo dos modelos a adoptar para a previsão dos parâmetros acústicos subjectivos.

Tal como foi indicado no capítulo 4, os *atributos* associados aos *critérios de avaliação* podem ser obtidos directamente ou então previstos por uma combinação de outros *atributos*, que funcionam como “*sub-atributos*”, que é o que efectivamente acontece neste caso de estudo. Os parâmetros arquitectónicos ou os parâmetros acústicos objectivos, dependendo do modelo de previsão usado no cálculo dos parâmetros acústicos subjectivos, irão então funcionar como sub-atributos, localizados num nível superior aos atributos associados aos critérios de avaliação.

6.2. MODELOS DE PREVISÃO PARA PARÂMETRO ACÚSTICO SUBJECTIVO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA PALAVRA

6.2.1. PALAVRA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETRO ACÚSTICO SUBJECTIVO E PARÂMETRO ACÚSTICO OBJECTIVO

Relativamente ao critério c_1 , referente à qualidade da palavra na igreja, o atributo associado é o parâmetro $P80$. A determinação deste atributo pode ser feita recorrendo a dois tipos de dados, a parâmetros acústicos objectivos e a parâmetros arquitectónicos. No trabalho “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998) foram desenvolvidos três tipos de modelos de previsão para o parâmetro $P80$: em função do parâmetro acústico objectivo $RASTI$; em função dos parâmetros arquitectónicos da igreja e finalmente, em função do parâmetro $RASTI$ e dos parâmetros arquitectónicos.

A correlação determinada entre as medições do $RASTI$ e os resultados dos testes de audição com discurso ao vivo ($P80$) foi $R^2 = 0,50$, o que significa que cerca de 50% da variabilidade dos valores do $P80$ pode ser explicada unicamente pelo uso do $RASTI$. Confirma-se assim o uso do parâmetro $RASTI$, como um parâmetro útil para avaliar a inteligibilidade da palavra. Pode-se constatar na figura 6.2 a relação entre o parâmetro $P80$ e a medida $RASTI$ e o ajuste quadrático adoptado. A fórmula de previsão encontrada para $P80$ em função da medida $RASTI$, com o melhor ajuste foi:

$$P80 = -62,224.(RASTI)^2 + 88,652.(RASTI) + 48,089 \quad (6.1)$$

$$R^2 = 0,50$$

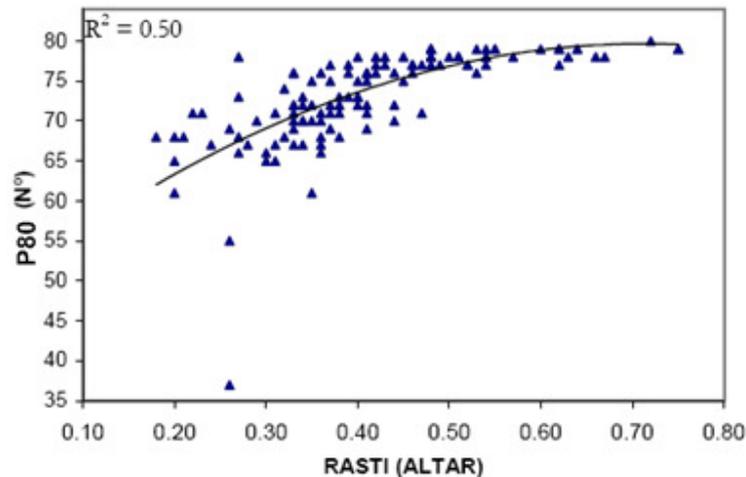


Figura 6.2 – Representação gráfica da relação Palavras ($P80$) vs. $RASTI$ (Altar), com curva de ajuste quadrática (Lencastre, 1998).

6.2.2. PALAVRA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETRO ACÚSTICO SUBJECTIVO E PARÂMETROS ARQUITECTÓNICOS

No trabalho “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998) foram desenvolvidos modelos de previsão para o parâmetro $P80$ também em função dos parâmetros arquitectónicos da igreja. No entanto, os modelos de previsão para $P80$ em função dos parâmetros arquitectónicos determinados nesse trabalho não serão considerados, pois na determinação desse modelo foi considerado, além dos treze parâmetros arquitectónicos já aqui referidos (ver capítulo 2), um outro parâmetro, a *Distância ao Altar*. Este parâmetro varia dentro da mesma igreja, uma vez que representa a distância entre o emissor (posicionado no altar) e o receptor, que pode assumir quatro diferentes posições-tipo dentro da igreja (ver capítulo 2). Como não é possível quantificar um valor único caracterizador para cada igreja para a *Distância ao Altar*, os modelos de previsão que fazem uso deste parâmetro não podem agora ser usados no âmbito deste trabalho.

Em função disto determinaram-se novas fórmulas de previsão. Relacionou-se o parâmetro $P80$ com os parâmetros arquitectónicos de modo a determinar um modelo de previsão em função destes. Foi estabelecido um modelo geral linear, considerando o parâmetro $P80$ como o factor dependente e introduzindo os treze parâmetros arquitectónicos como variáveis independentes. Estes modelos foram obtidos com os valores registados para as 31 igrejas estudadas no trabalho “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998) através do programa estatístico *SYSTAT*.

O modelo de previsão alcançado (equação 6.2) apresenta um $R^2=0,40$, mais baixo do que o do modelo previamente apresentado (equação 6.1) (Lencastre, 1998). É fácil de deduzir que a distância a que o

receptor se encontra da fonte emissora condiciona grandemente a perceptibilidade da palavra, daí que a exclusão do parâmetro arquitectónica *Distância ao Altar* do modelo de previsão tenha diminuído o grau de correlação. Este modelo prova-se pouco eficaz, sendo que a inteligibilidade da palavra é melhor traduzida através do uso exclusivo da medida *RASTI* ($R^2=0,50$) do que pelos parâmetros arquitectónicos considerados.

$$\begin{aligned} P80 &= 76,977 + 3,700 \cdot 10^{-4} \cdot VOL_TOTAL - 0,135 \cdot L_NAVE - 0,356 \cdot H_NAVE \\ &\quad - 6,800 \cdot 10^{-3} \cdot ABSO_TOT - 49,935 \cdot CABS_ME \end{aligned} \quad (6.2)$$
$$R^2 = 0,40$$

Parâmetros arquitectónicos: *VOL_TOT* -Volume Total (m^3), *L_NAVE* – Largura da Nave (m), *H_NAVE* – Altura da Nave (m), *ABSO_TOT* - Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total (m^2) e *CABS_ME* - Coeficiente de Absorção Sonora Médio de todas as superfícies.

6.2.3. PALAVRA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETRO ACÚSTICO SUBJECTIVO, PARÂMETROS ARQUITECTÓNICOS E PARÂMETRO ACÚSTICO OBJECTIVO

Uma vez mais, não se considerou o modelo de previsão determinado anteriormente no trabalho “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análise de Carácter Subjectivo e Objectivo*” (Lencastre, 1998), pela mesma razão apresentada previamente. Assim sendo, determinou-se um novo modelo de previsão para o parâmetro acústico subjectivo *P80* em função do parâmetro acústico objectivo *RASTI* e dos treze parâmetros arquitectónicos. A medida *P80* foi considerada como o factor dependente e o *RASTI* e os treze parâmetros arquitectónicos são tratados como variáveis. Foi obtido uma correlação superior do que no modelo linear anterior (equação 6.2) ($R^2=0,61$), o que era de esperar. Obteve-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} P80 &= 62,886 + 6,440 \cdot 10^{-3} \cdot AREA_TOT - 0,2274 \cdot L_MAX + 0,108 \cdot H_MAX \\ &\quad - 6,33 \cdot 10^{-3} \cdot ABSO_TOT + 8,750 \cdot CABS_ME + 34,742 \cdot RASTI \end{aligned} \quad (6.3)$$
$$R^2 = 0,61$$

Parâmetros arquitectónicos: *AREA_TOT* – Área Total (m^2), *L_MAX*– Comprimento Máximo (m), *H_MAX* – Altura Máxima (m), *ABSO_TOT* - Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total (m^2) e *CABS_ME* - Coeficiente de Absorção Sonora Médio de todas as superfícies.

Será preferível para o utilizador o uso do modelo de previsão que calcula o parâmetro *P80* em função da medida *RASTI* e dos parâmetros arquitectónicos (equação 6.3). É um modelo mais preciso, possuindo a maior correlação entre os três tipos de modelos testados ($R^2=0,61$), logo fornecerá valores mais exactos no cálculo do *P80*, o que irá resultar num melhor desempenho do algoritmo aqui desenvolvido. Possui porém, a desvantagem de ser necessário dados de ambos os tipos, arquitectónicos e objectivos (*RASTI*). Seria ideal possuir um bom modelo de previsão em função apenas de parâmetros arquitectónicos, cuja obtenção é mais imediata ou simples do que a da medida *RASTI*.

6.3. MODELOS DE PREVISÃO PARA PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MÚSICA

6.3.1. MÚSICA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS E PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJECTIVOS

Tal como para a escolha dos parâmetros acústicos subjectivos a utilizar, procedeu-se a uma análise preliminar dos parâmetros acústicos objectivos quantificados na tese “*Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*” (Carvalho, 1994), de modo a considerar quais seriam adequados para serem utilizados nos modelos de previsão para os parâmetros subjectivos já escolhidos. Esta seriação pretende retirar qualquer parâmetro acústico objectivo da equação que seja supérfluo, procurando reduzir os elementos de cálculo no algoritmo final, promovendo uma maior simplicidade.

Como já foi referido previamente, os parâmetros acústicos objectivos estudados e registados no estudo precedente a este (Carvalho, 1994) foram seis: *tempo de reverberação* (RT), *tempo de decaimento curto* (TS), *claridade* (C80), *definição* (D), *tempo central* (TS) e *intensidade sonora* (G).

Para obter um valor único para cada igreja e para cada medida acústica objectiva, foram utilizados vários métodos de ponderação dos dados registados usando diferentes gamas de frequências, sendo necessária a escolha do método mais adequado aos objectivos estabelecidos. Está disponível em trabalhos anteriores (Carvalho, 1994; Morgado, 1996) informação mais detalhada sobre cada um dos diferentes métodos considerados e os critérios adoptados para a escolha do método mais adequado aos fins em vista. Verificou-se que o cálculo dos parâmetros objectivos em função das bandas de frequências intermédias de 500 e 1k Hz é o mais indicado para os estudos propostos.

Por muitos anos o único parâmetro acústico objectivo considerado na avaliação do comportamento acústico de auditórios, salas de espectáculo ou igrejas foi o *tempo de reverberação* (RT), situação que ainda hoje se verifica em muitos casos. Seria um erro realizar este estudo utilizando o *tempo de reverberação* como o único parâmetro acústico objectivo, pois está hoje claramente demonstrado que o *tempo de reverberação* só por si, não fornece informação suficiente para uma correcta avaliação do comportamento acústico dum espaço. No entanto, alguma capacidade de discernimento e reflexão é necessária na escolha dos parâmetros acústicos objectivos a utilizar. Usou-se como auxiliar de decisão algumas conclusões feitas em trabalhos prévios (Carvalho, 1994; Morgado, 1996; Lencastre, 1998), em que era abordada a mesma temática.

É sabido que a direcionalidade é determinada pelo impulso inicial do som emitido e que os impulsos secundários contribuem para uma percepção da dimensão da fonte sonora e do espaço em que está inserida. O *tempo de reverberação*, como referido anteriormente, diz respeito ao intervalo de tempo que o som demora a enfraquecer 60 dB. A fase inicial do decaimento sonoro é que é responsável pela impressão subjectiva que os auditores têm da reverberação pois a porção final é geralmente mascarada por novos sons. Para quantificar este decaimento sonoro inicial é usado o parâmetro *tempo de decaimento curto* (EDT), que é medido tal como o *tempo de reverberação* mas apenas extrapolando para um enfraquecimento inicial de 10 dB. Já o parâmetro *tempo central* (TS) estabelece o ponto no tempo para o qual a energia recebida antes deste ponto é igual à energia recebida depois daquele ponto.

No trabalho “*Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*” (Carvalho, 1994), o autor concluiu que este grupo de parâmetros acústicos objectivos, nomeadamente *tempo de reverberação* (RT), *tempo de decaimento curto* (EDT) e *tempo central* (TS) podem ser correlacionados. Verifica-se que o *tempo de reverberação* e o *tempo de decaimento curto* apresentam, tal como esperado, uma correlação muito alta ($|R| > 0,99$), pois são duas grandezas com significado físico muito semelhante, medindo ambas o decaimento sonoro em função dum intervalo de tempo. Os parâmetros *tempo de decaimento curto* e *tempo central* também apresentam uma forte correlação entre eles ($|R| > 0,94$). Estes dois factores sugerem que qualquer uma destas três medidas (*tempo de reverberação*, *tempo de decaimento curto* e *tempo central*) pode ser usada para prever as outras duas. Assume-se então que a utilização dos três parâmetros seja redundante e desnecessária. O *tempo de decaimento curto* pode ser considerado como mais indicado para traduzir a reverberação e mais útil se for desejada uma análise subjectiva. No entanto, considera-se que o uso do parâmetro *tempo de reverberação* seja a escolha mais razoável, por causa do seu significado físico inequívoco e também porque, devido ao seu uso tradicional nesta área, existe uma grande quantidade de informação disponível, o que permite um melhor tratamento dos dados.

Para além deste grupo de medidas (RT/EDT/TS), também se verificou uma correlação elevada entre os parâmetros *claridade* (C80) e *definição* (D). A *claridade* e a *definição* dizem respeito à facilidade com que o ouvinte pode distinguir sons individuais inseridos numa emissão sonora, que pode assumir a forma duma conversa, dum trecho musical ou a exibição dum filme, por exemplo. O grau de *claridade* está relacionado com a perceptibilidade para a música e a *definição* para a palavra. No mesmo estudo (Carvalho, 1994) conclui-se que para o grupo de igrejas estudadas os parâmetros objectivos *claridade* e *definição*, apresentam uma correlação muito elevada ($|R| > 0,94$). Porém a escolha duma medida em detrimento de outra não se mostra justificável, porque além de quantificarem aspectos diferentes do espectro sonoro em estudo (*música* e *palavra*, nomeadamente), a correlação elevada é devido maioritariamente pela configuração matemática muito semelhante das equações propostas para o cálculo das parâmetros. Com base nisto, ambos os parâmetros foram utilizados na análise multi-critério.

A *intensidade sonora* (G) não demonstrou qualquer correlação significativa com os outros parâmetros, confirmando assim a sua independência, o que justifica a sua inclusão como um dos parâmetros a usar no estudo.

Em conclusão, considera-se que os parâmetros acústicos objectivos *tempo de decaimento curto* (EDT) e *tempo central* (TS) são desnecessários, utilizando-se para os modelos de previsão apenas os parâmetros acústicos objectivos *tempo de reverberação* (RT), *claridade* (C80), *definição* (D) e *intensidade sonora* (G).

Estas correlações podem ser verificadas no quadro 6.1, assim como graficamente através da figura 6.3, informação retirada do estudo “*Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*” (Carvalho, 1994).

Quadro 6.1 – Coeficientes de correlação (|R|) entre parâmetros acústicos objectivos (usando as médias dos dados para cada igreja) (Carvalho, 1994).

| Parâmetro | EDT | C80 | D | TS | G |
|-----------|------|------|------|------|------|
| RT | 0,99 | 0,90 | 0,80 | 0,99 | 0,26 |
| EDT | - | 0,90 | 0,80 | 0,99 | 0,26 |
| C80 | - | - | 0,97 | 0,92 | 0,33 |
| D | - | - | - | 0,84 | 0,25 |
| TS | - | - | - | - | 0,27 |

Tempo de reverberação (RT); Tempo de decaimento curto (EDT); Claridade (C80); Definição (D); Tempo central (TS); Intensidade Sonora (G).

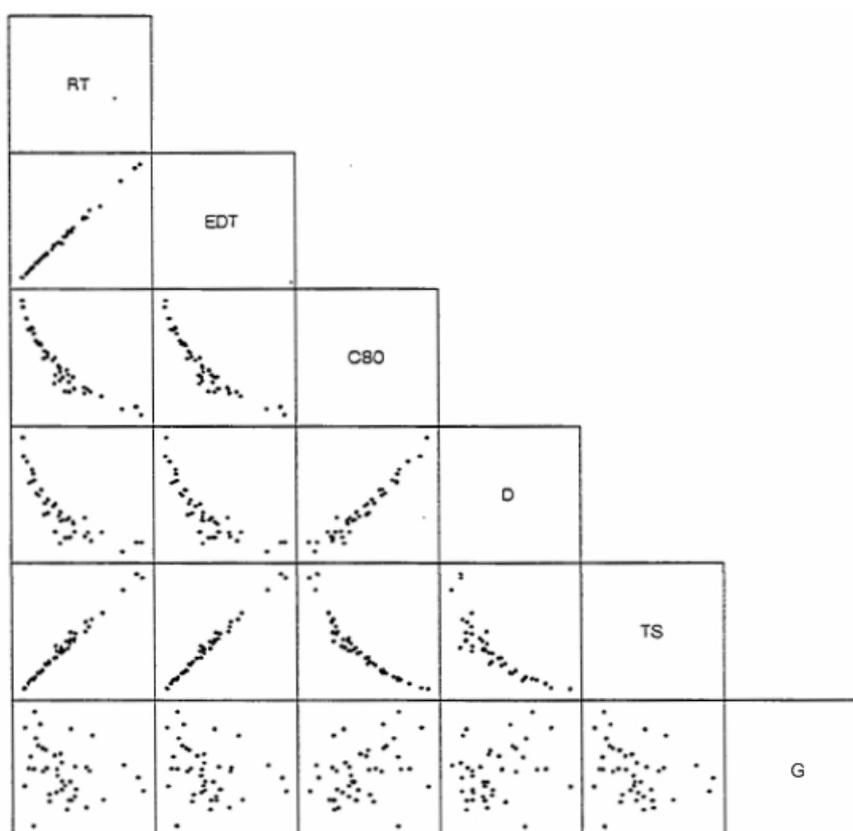


Figura 6.3 – Gráficos de dispersão para as relações entre os parâmetros acústicos objectivos (Carvalho, 1994).

(RT) Tempo de reverberação; (EDT) Tempo de decaimento curto; (C80) Claridade; (D) Definição; (TS) Tempo central; (G) Intensidade Sonora.

Já foram anteriormente estabelecidos modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos em função de parâmetros acústicos objectivos, no trabalho “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através*

de *Parâmetros Subjectivos*” (Morgado, 1996). Os modelos de previsão foram calculados usando os dados médios dos parâmetros acústicos em cada igreja testada, 36 ao todo. Como já foi referido, foram utilizados vários métodos diferentes de cálculo em função das bandas de frequências usadas (Carvalho, 1994), de maneira a obter um valor único representativo do comportamento global da igreja. Foram estabelecidos modelos de previsão para cada um dos métodos de cálculo usado. O método adoptado para o estudo proposto é o calculado em função das duas bandas de frequência intermédias de 500 e 1k Hz, como já havia sido estabelecido anteriormente (ver capítulo 3). Ir-se-á apenas analisar portanto, os modelos de previsão para os dados calculados em função das bandas de frequência de 500 e 1k Hz.

Na tese “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos*” (Morgado, 1996) esse autor considerou todos os parâmetros acústicos objectivos inicialmente referidos (ver capítulo 2), nomeadamente: *tempo de reverberação* (RT); *tempo de decaimento curto* (TS); *claridade* (C80); *definição* (D); *tempo central* (TS) e *intensidade sonora* (G). Entre os parâmetros acústicos objectivos considerados a *reverberância* (REV) e a *intimidade* (INTM), são calculados em função de parâmetros acústicos objectivos não considerados, nomeadamente o *tempo de decaimento curto* (EDT) e o *tempo central* (TS). Como tal, os dois modelos de previsão para a *reverberância* e a *intimidade* não podem ser utilizados no âmbito deste trabalho.

Com o objectivo de se obterem fórmulas de previsão de acordo com as considerações realizadas foram estabelecidos também novos modelos gerais lineares entre os parâmetros acústicos objectivos e os parâmetros acústicos subjectivos, usando para isso, os valores médios de cada parâmetro de cada igreja. Estes modelos foram obtidos com os valores registados para as 36 igrejas estudadas no trabalho “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos*” (Morgado, 1996).

Apresenta-se no quadro 6.2 os modelos de previsão dos parâmetros acústicos subjectivos considerados usando as duas médias das bandas de frequência de 500 e 1k Hz.

Quadro 6.2 – Modelos gerais lineares entre os parâmetros acústicos subjectivos e os parâmetros acústicos objectivos usando os dados médios de cada igreja calculados em função das bandas de frequência de 500 e 1K Hz.

| Equação | Modelos de previsão | Estimativa do erro-padrão do valor estimado | R ² |
|---------|--|---|----------------|
| (6.4) | $CLA = 6,336 - 0,629.RT + 0,052.G$ | 0,52 | 0,83 |
| (6.5) | $REV = 2,678 + 0,409.RT - 0,140.C80 - 0,014.G$ | 0,48 | 0,85 |
| (6.6) | $INTM = 3,474 - 0,313.RT - 0,0085.C80 + 0,151.G$ | 0,48 | 0,77 |
| (6.7) | $DIR = 5,328 - 0,397.RT + 0,055.G$ | 0,39 | 0,79 |
| (6.8) | $EQT = 5,971 - 0,329.RT + 0,050.G$ | 0,42 | 0,70 |

Parâmetros acústicos subjectivos: Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direccionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT) – classificados de 1 a 7.

Parâmetros acústicos objectivos: Tempo de reverberação (RT), s; Claridade (C80), dB; Intensidade Sonora (G), dB.

6.3.2. MÚSICA: RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJECTIVOS E PARÂMETROS ARQUITECTÓNICOS

Como já foi referido no capítulo 2, foram analisados 13 parâmetros arquitectónicos, caracterizadores do espaço físico das igrejas. Na tese “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas Através de Parâmetros Subjectivos*” (Morgado, 1996) foram estabelecidos modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos com base nos parâmetros arquitectónicos, utilizando os valores médios dos parâmetros em uso. Para os cinco parâmetros subjectivos aqui considerados, as fórmulas de previsão determinadas estão expostas no quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Modelos gerais lineares entre os parâmetros acústicos subjectivos e os parâmetros arquitectónicos.

| Equação | Modelo de previsão | Estimativa do erro-padrão do valor | R ² |
|---------|---|------------------------------------|----------------|
| (6.9) | $CLA = 6,833 - 0,116.H_NAVE - 0,100.LARG_MED + 10,932.CABSO_ME$ | 0,80 | 0,61 |
| (6.10) | $REV = 1,179 - 8,2 \cdot 10^{-3}.AREA_NAVE + 0,179.L_NAVE + 0,220.LARG_MED - 17,090.CABSO_ME$ | 0,75 | 0,63 |
| (6.11) | $INTM = 5,858 + 3,6 \cdot 10^{-3}.AREA_TOT - 0,048.L_MAX - 0,060.LARG_NAVE - 7,3 \cdot 10^{-3}.ABSO_TOT + 14,860.CABSO_ME$ | 0,39 | 0,87 |
| (6.12) | $DIR = 6,833 + 4,0 \cdot 10^{-3}.AREA_NAVE - 0,100.L_NAVE - 0,041.H_NAVE - 0,095.LARG_MED + 10,831.CABSO_ME$ | 0,52 | 0,66 |
| (6.13) | $EQT = 6,881 - 0,107.H_NAVE - 0,036.LARG_NAVE + 5,819.CABSO_ME$ | 0,43 | 0,70 |

Parâmetros acústicos subjectivos: Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direccionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT) – classificados de 1 a 7.

Parâmetros arquitectónicos: Área Total (AREA_TOT); Área da Nave (AREA_NAVE); Comprimento Máximo (L_MAX); Comprimento da Nave (L_NAVE); Altura da Nave (H_NAVE); Largura da Nave (LARG_NAVE); Largura média (LARG_MED); Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total (ABSO_TOT); Coeficiente de Absorção Médio de todas as superfícies (CABSO_ME).

6.4. CONCLUSÕES

A inclusão de modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos revelou-se necessária de modo a complementar a possível falta de informação relativa a esses mesmos parâmetros, necessários para a aplicação do método multi-critério. Estabelece-se assim que esses valores podem ser determinados directamente (*in situ*) ou através de modelos de previsão. Apresenta-se uma formalização da metodologia (ver figuras 6.4 e 6.5) e das abordagens possíveis para a obtenção dos dados necessários para o cálculo da *Qualidade Acústica da Igreja (QAI)*.

Analisados os modelos de previsão considerados adequados (no âmbito deste trabalho) para a obtenção dos parâmetros acústicos subjectivos (através dos parâmetros acústicos objectivos e arquitectónicos), podem-se estabelecer algumas conclusões sobre estes, tendo em conta o grau de correlação assim como o erro-padrão estimado para cada modelo. A fiabilidade dos modelos analisados foi julgada principalmente pelo seu R², que representa a percentagem de variação explicada e também pela estimativa do erro-padrão, que representa a magnitude das diferenças entre os valores observado e os valores estimados.

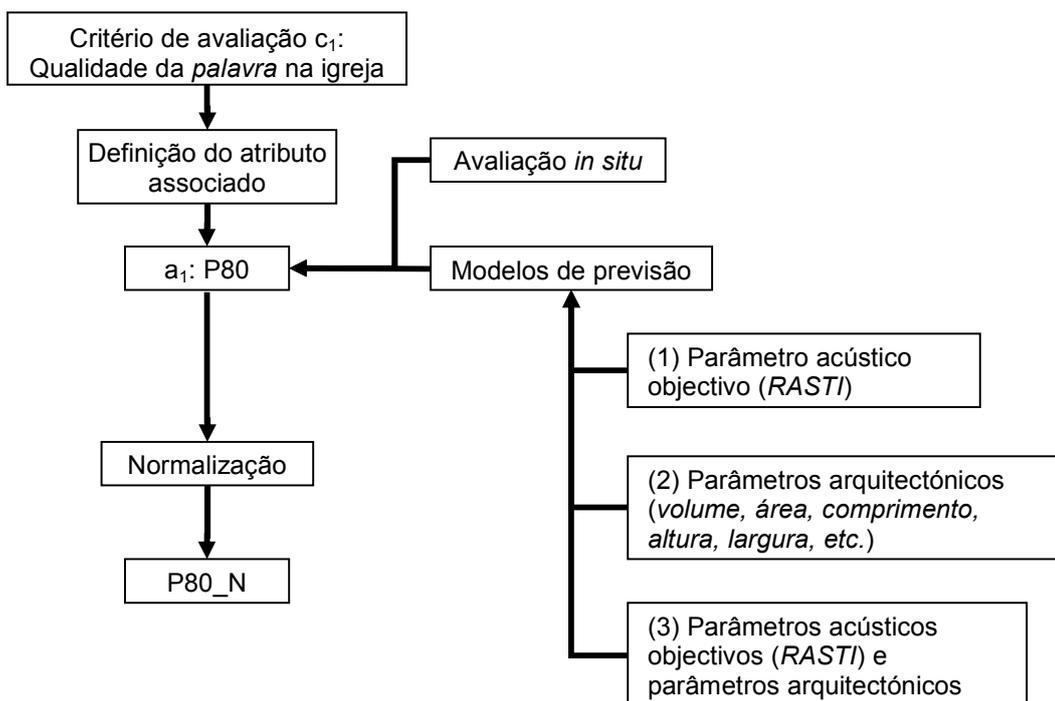


Figura 6.4 – Esquema tipo da metodologia aplicada para a determinação e tratamento dos atributos associados ao critério de avaliação c_1 (qualidade da *palavra*) – considerando ou não o uso de modelos de previsão (1, 2 e 3).

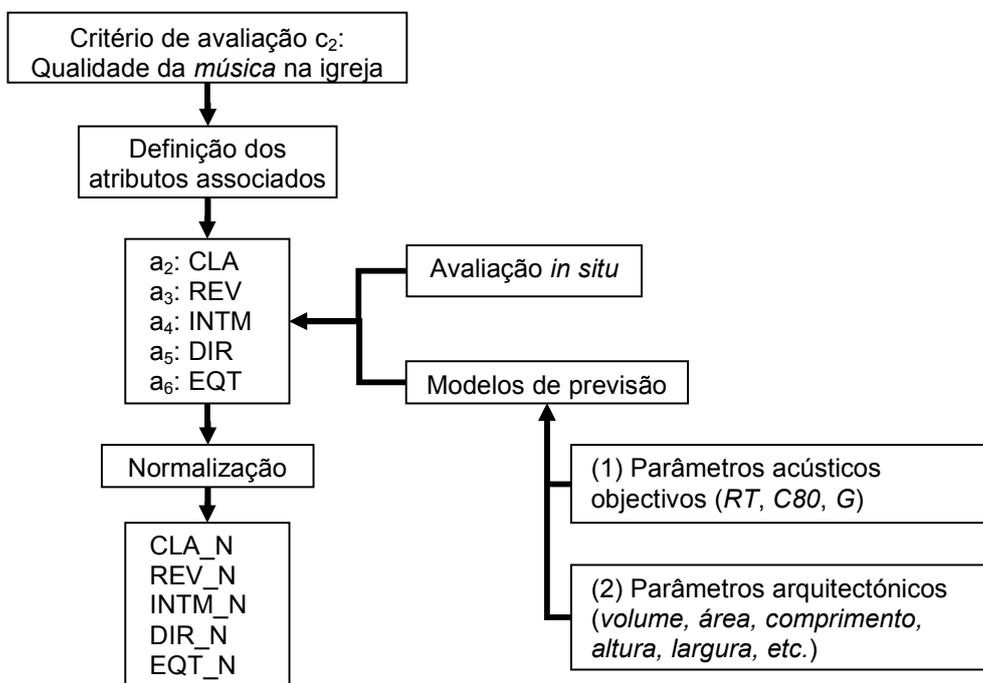


Figura 6.4 – Esquema tipo da metodologia aplicada para a determinação e tratamento dos atributos associados ao critério de avaliação c_2 (qualidade da *música*) – considerando ou não o uso de modelos de previsão (1 e 2).

No quadro 6.4 estão apresentados em forma de resumo todos os modelos de previsão considerados para o cálculo do parâmetro acústico subjectivo para a *palavra*, $P80$, com o respectivo grau de correlação e erro-padrão.

Quadro 6.4 – Modelos de previsão para o parâmetro $P80$.

| Equação | Modelos de previsão | Estimativa do erro-padrão do valor | R^2 |
|---------|---|------------------------------------|-------|
| (6.1) | (1) Usando o parâmetro acústico objectivo <i>RASTI</i> : $P80 = -62,224.(RASTI)^2 + 88,652.(RASTI) + 48,089$ | Não fornecido | 0,50 |
| (6.2) | (2) Usando parâmetros arquitectónicos: $P80 = 76,977 + 3,700.10^{-4}.VOL_TOTAL - 0,135.L_NAVE - 0,356.H_NAVE - 6,800.10^{-3}.ABSO_TOT - 49,935.CABSO_ME$ | 3,1 | 0,40 |
| (6.3) | (3): Usando parâmetros arquitectónicos e o parâmetro acústico objectivo <i>RASTI</i> : $P80 = 62,886 + 6,440.10^{-3}.AREA_TOT - 0,2274.L_MAX + 0,1081.H_MAX - 0,00633.ABSO_TOT + 8,750.CABSO_ME + 34,742.RASTI$ | 2,5 | 0,61 |

Parâmetros arquitectónicos: Volume Total (VOL_TOT); Área Total (AREA_TOT); Comprimento Máximo (L_MAX); Comprimento da Nave (L_NAVE); Altura Máxima (H_MAX); Altura da Nave (H_NAVE); Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total (ABSO_TOT); Coeficiente de Absorção Sonora Médio de todas as superfícies (CABSO_ME).

Verifica-se que o parâmetro *RASTI* só por si consegue explicar 50% da variabilidade dos valores de $P80$. Não se considera adequado o modelo de previsão em função apenas dos parâmetros arquitectónicos, devido ao baixo grau de correlação ($R^2=0,40$). Pode-se concluir que para a previsão de $P80$ o modelo de previsão mais adequado é aquele que efectua o cálculo do parâmetro em função dos parâmetros arquitectónicos e da medida *RASTI*. Apresenta melhor correlação ($R^2=0,61$) assim como um menor erro-padrão (2,5).

A *Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total* (ABSO_TOT) e o *Coeficiente de Absorção Sonora Médio de todas as Superfícies* (CABSO_ME) são os únicos parâmetros comuns a ambos os modelos de previsão que fazem uso dos parâmetros arquitectónicos, confirmando assim relevância do tipo de materiais usados no interior da igreja e a sua importância para uma boa perceptibilidade da palavra.

Relativamente aos parâmetros acústicos subjectivos para a avaliação da música, pode-se verificar que o *tempo de reverberação* (RT) está presente em todos os modelos de previsão em função dos parâmetros acústicos objectivos. Isto vem comprovar (uma vez mais) a importância que este parâmetro tem na caracterização do comportamento acústico dum espaço. Também se verifica que o parâmetro *definição* (D) não foi incluído em nenhum modelo geral linear, o que pode ser explicado pelo facto da medida estar relacionada com a percepção da palavra e que estas fórmulas de previsão destinam-se ao cálculo de

parâmetros subjectivos para a avaliação da música. O maior grau de correlação verifica-se na previsão do parâmetro *claridade* (CLA) ($R^2=0,83$).

Quanto aos modelos de previsão em função dos parâmetros arquitectónicos, constata-se que se obtém o grau de correlação mais elevado para a *intimidade* (INTM) ($R^2=0,87$) enquanto que os restantes modelos de previsão apresentam um R^2 consideravelmente menor. Uma vez mais, verifica-se que o parâmetro arquitectónico *Coefficiente de Absorção Sonora Médio de todas as Superfícies* (CABSO_ME) é comum a todos os modelos de previsão.

Conclui-se que para os parâmetros acústicos subjectivos *claridade* (CLA), *reverberância* (REV) e *direccionalidade* (DIR), os modelos de previsão em função dos parâmetros acústicos objectivos apresentam um maior grau de correlação assim como um menor erro-padrão do valor estimado. O parâmetro *intimidade* (INTM) é melhor previsto pelos parâmetros arquitectónicos, apresentando um grau de correlação bastante elevado, como já tinha sido referido. Para o *equilíbrio tímbrico* (EQT) verifica-se que é indiferente o uso do modelo de previsão, apresentando ambas as fórmulas um grau de correlação igual ($R^2=0,70$) e uma estimativa para o erro-padrão do valor estimado semelhante (cerca de 0,42).

7

APLICAÇÃO DO MÉTODO MULTI-CRITÉRIO PROPOSTO

7.1. CÁLCULO DA QUALIDADE ACÚSTICA DA IGREJA

7.1.1. NOTA PRÉVIA

Neste capítulo procede-se à aplicação do método multi-critério e do algoritmo proposto de modo a testar a sua eficácia e analisar a sua viabilidade. A *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI) será calculada usando as duas abordagens possíveis no que diz respeito aos valores dos atributos associados, isto é, usando os valores dos parâmetros acústicos subjectivos determinados directamente (*in situ*) assim como os valores calculados através dos modelos de previsão referidos no capítulo 6.

Procede-se ainda a uma análise dos valores de QAI calculados para as igrejas da amostra em estudo, mediante os dois tipos de abordagens considerados para a obtenção dos valores dos parâmetros acústicos subjectivos: através de avaliação *in situ* e através de modelos de previsão. Pretende-se com isto compreender o comportamento dos modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos face aos valores reais.

A partir dos resultados obtidos de QAI pode-se ainda diferenciar as igrejas que possuem um comportamento acústico mais ou menos adequado e aferir qual a influência dos diferentes parâmetros acústicos (objectivos e subjectivos) e arquitectónicos para a QAI.

7.1.2. AVALIAÇÃO *IN SITU*

Procede-se primeiramente ao cálculo de QAI usando os valores já disponíveis, quantificados em trabalhos anteriores (Morgado, 1996; Lencastre, 1998). Os valores médios registados em cada igreja para os parâmetros acústicos subjectivos encontram-se dispostos no capítulo 3 (ver quadros 3.3 e 3.5).

No quadro 7.1 estão dispostos os valores normalizados para os atributos medidos *in situ* e os valores de QAI calculados para as igrejas da amostra em estudo são os apresentados no quadro 7.2. (determinados com a equação 5.2).

Quadro 7.1 – Valores normalizados dos atributos (parâmetros acústicos subjectivos) medidos *in situ* (0 a 1).

| Igreja Nº | P80_N | CLA_N | REV_N | INTM_N | DIR_N | EQT_N |
|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 1 | 0,90 | 0,52 | 0,96 | 0,69 | 0,59 | 0,74 |
| 2 | 0,97 | 0,92 | 0,54 | 0,82 | 0,84 | 0,86 |
| 3 | 0,93 | 0,80 | 0,61 | 0,70 | 0,66 | 0,50 |
| 4 | 0,75 | 0,23 | 0,70 | 0,17 | 0,33 | 0,58 |
| 5 | 0,93 | 0,63 | 0,90 | 0,67 | 0,68 | 0,75 |
| 6 | 0,90 | 0,70 | 0,79 | 0,68 | 0,65 | 0,72 |
| 7 | 0,93 | 0,35 | 0,81 | 0,56 | 0,48 | 0,68 |
| 8 | 0,92 | 0,53 | 0,98 | 0,72 | 0,62 | 0,78 |
| 9 | 0,89 | 0,73 | 0,75 | 0,83 | 0,73 | 0,78 |
| 10 | 0,91 | 0,77 | 0,80 | 0,81 | 0,80 | 0,81 |
| 11 | 0,89 | 0,71 | 0,88 | 0,36 | 0,61 | 0,49 |
| 12 | 0,84 | 0,27 | 0,57 | 0,36 | 0,39 | 0,47 |
| 13 | 0,89 | 0,66 | 0,70 | 0,38 | 0,61 | 0,73 |

Quadro 7.2 – Classificação para a Qualidade Acústica de Igrejas (QAI) segundo a metodologia multi-critério, usando os valores medidos *in situ* (0 a 1).

| Nº | Igrejas | QAI |
|----|--|------|
| 1 | Bustêlo – Penafiel | 0,82 |
| 2 | Cabeça Santa – Penafiel | 0,91 |
| 3 | Clérigos – Porto | 0,85 |
| 4 | Lapa – Porto | 0,62 |
| 5 | Nossa Senhora da Boavista – Porto | 0,85 |
| 6 | Paço de Sousa – Penafiel | 0,83 |
| 7 | Santíssimo Sacramento – Porto | 0,79 |
| 8 | São Martinho da Cedofeita – Porto | 0,84 |
| 9 | S. Pedro de Ferreira - Paços de Ferreira | 0,85 |
| 10 | S. Pedro de Rates - Póvoa de Varzim | 0,87 |
| 11 | Sé - Porto | 0,81 |
| 12 | Serra do Pilar - Vila Nova de Gaia | 0,68 |
| 13 | Tibães (mosteiro) – Braga | 0,79 |

7.1.3. MODELOS DE PREVISÃO

Como se prevê que este método multi-critério será aplicado sem conhecimento dos valores para os parâmetros subjectivos da igreja (visto a sua difícil determinação para a generalidade dos casos), testou-se o algoritmo proposto admitindo que não há registo dos valores para os parâmetros acústicos subjectivos, usando já os modelos de previsão propostos no capítulo 6.

Podem ser usadas duas abordagens para o cálculo dos valores para os atributos associados ao critério de avaliação c_2 (referente à música):

- (1) em função dos parâmetros acústicos objectivos;
- (2) em função dos parâmetros arquitectónicos.

Para o cálculo do atributo $P80$, associado ao critério de avaliação c_1 (referente à palavra), além dos dois métodos supracitados é ainda possível usar um outro modelo de previsão:

- (3) em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo $RASTI$.

Visto o parâmetro $P80$ possuir um modelo de previsão em função de parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo $RASTI$, considera-se que se o utilizador optar por usar este método, ele poderá ter disponíveis os dados relativos aos parâmetros acústicos objectivos e aos parâmetros arquitectónicos. Neste caso é possível optar por conciliar o modelo de previsão 3 para o parâmetro $P80$ com qualquer um dos outros dois modelos de previsão (1 e 2) para o cálculo dos parâmetros acústicos subjectivos referentes à avaliação da música. Existem assim 4 conjunções possíveis dos modelos de previsão para o cálculo de QAI. As combinações possíveis (denominadas de métodos de cálculo) estão dispostas no quadro 7.3.

Quadro 7.3 – Combinações possíveis dos três modelos de previsão considerados para os parâmetros acústicos subjectivos para o cálculo de QAI.

| Método de cálculo QAI | Modelos de Previsão | | |
|-----------------------|---------------------------------|-----|-----|
| | (1) | (2) | (3) |
| (1) | P80 CLA, REV, INTM, DIR, EQT | | |
| (2) | P80 CLA, REV, INTM, DIR, EQT | | |
| (3.1) | CLA, REV, INTM, DIR, EQT | | P80 |
| (3.2) | CLA, REV, INTM, DIR, EQT | | P80 |

Parâmetros acústicos subjectivos: P80 (número de palavras entendidas numa lista de 80 palavras); Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direccionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT). (1) em função dos parâmetros acústicos objectivos; (2) em função dos parâmetros arquitectónicos; (3) em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo $RASTI$.

Apresentam-se no quadro 7.4 os valores calculados para os atributos associados aos critérios de avaliação c_1 e c_2 e no quadro 7.5 os valores já normalizados. Os valores calculados para QAI usando os valores fornecidos pelos modelos de previsão para as igrejas em estudo são os apresentados no quadro 7.6.

Quadro 7.4 – Valores dos atributos calculados segundo os diferentes modelos de previsão (1, 2 e 3).

| Atributo | P80 | | | CLA | | REV | | INTM | | DIR | | EQT | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | (1) | (2) | (3) | (1) | (2) | (1) | (2) | (1) | (2) | (1) | (2) | (1) | (2) |
| Modelo de Previsão | | | | | | | | | | | | | |
| Igreja 1 | 72,8 | 63,6 | 70,1 | 4,44 | 4,84 | 4,92 | 4,87 | 4,16 | 4,58 | 4,41 | 4,39 | 5,27 | 5,44 |
| 2 | 75,7 | 69,0 | 76,8 | 6,16 | 6,07 | 3,24 | 2,79 | 5,67 | 5,78 | 5,62 | 5,81 | 6,29 | 6,21 |
| 3 | 72,8 | 65,1 | 72,1 | 4,82 | 4,35 | 4,64 | 4,69 | 4,19 | 4,66 | 4,63 | 4,31 | 5,44 | 4,82 |
| 4 | 72,8 | 64,5 | 69,4 | 3,25 | 4,29 | 5,94 | 5,23 | 3,23 | 3,89 | 3,60 | 4,10 | 4,58 | 5,05 |
| 5 | 74,0 | 68,2 | 75,6 | 4,61 | 4,43 | 4,81 | 4,76 | 4,52 | 5,09 | 4,57 | 5,06 | 5,41 | 5,60 |
| 6 | 73,6 | 68,6 | 72,0 | 5,05 | 4,42 | 4,53 | 5,11 | 4,23 | 4,64 | 4,75 | 4,44 | 5,54 | 5,35 |
| 7 | 72,8 | 64,8 | 71,1 | 3,91 | 4,76 | 5,45 | 4,65 | 4,07 | 4,52 | 4,11 | 4,57 | 5,02 | 5,33 |
| 8 | 72,8 | 70,1 | 73,0 | 5,12 | 5,41 | 4,50 | 4,00 | 5,46 | 5,15 | 5,01 | 5,00 | 5,80 | 5,77 |
| 9 | 72,4 | 67,4 | 72,1 | 5,05 | 4,99 | 4,52 | 4,22 | 4,76 | 5,06 | 4,85 | 4,79 | 5,64 | 5,43 |
| 10 | 74,3 | 69,2 | 74,2 | 5,13 | 4,64 | 4,38 | 5,03 | 4,55 | 4,89 | 4,86 | 4,59 | 5,64 | 5,57 |
| 11 | 74,0 | 67,2 | 70,5 | 4,50 | 3,75 | 5,00 | 5,99 | 3,63 | 4,30 | 4,35 | 3,64 | 5,19 | 4,92 |
| 12 | 65,2 | 63,5 | 69,2 | 2,10 | 2,55 | 6,84 | 5,75 | 3,10 | 4,19 | 2,95 | 3,63 | 4,06 | 3,68 |
| 13 | 75,4 | 64,7 | 72,7 | 5,12 | 4,64 | 4,16 | 5,00 | 4,09 | 4,37 | 4,77 | 4,20 | 5,55 | 5,17 |

(1) em função dos parâmetros acústicos objectivos; (2) em função dos parâmetros arquitectónicos; (3) em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI*.

Parâmetros acústicos subjectivos: P80 (número de palavras entendidas numa lista de 80 palavras – classificado de 0 a 80); Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direcionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT) – classificados de 1 a 7.

Quadro 7.5 – Valores normalizados (escala 0 a 1) dos atributos calculados segundo os diferentes modelos de previsão.

| Atributo | P80_N | | | CLA_N | | REV_N | | INTM_N | | DIR_N | | EQT_N | |
|--------------------|-------|------|------|-------|------|-------|------|--------|------|-------|------|-------|------|
| | (1) | (2) | (3) | (1) | (2) | (1) | (2) | (1) | (2) | (1) | (2) | (1) | (2) |
| Modelo de Previsão | | | | | | | | | | | | | |
| Igreja 1 | 0,91 | 0,80 | 0,88 | 0,59 | 0,67 | 0,98 | 0,96 | 0,63 | 0,72 | 0,58 | 0,58 | 0,71 | 0,74 |
| 2 | 0,95 | 0,86 | 0,96 | 0,92 | 0,91 | 0,47 | 0,64 | 0,87 | 0,88 | 0,82 | 0,86 | 0,88 | 0,87 |
| 3 | 0,91 | 0,81 | 0,90 | 0,66 | 0,57 | 0,89 | 0,91 | 0,64 | 0,73 | 0,63 | 0,56 | 0,74 | 0,64 |
| 4 | 0,91 | 0,81 | 0,87 | 0,35 | 0,56 | 0,72 | 0,93 | 0,37 | 0,57 | 0,42 | 0,52 | 0,60 | 0,68 |
| 5 | 0,92 | 0,85 | 0,95 | 0,62 | 0,59 | 0,94 | 0,93 | 0,70 | 0,81 | 0,61 | 0,71 | 0,73 | 0,77 |
| 6 | 0,92 | 0,86 | 0,90 | 0,71 | 0,58 | 0,86 | 0,97 | 0,65 | 0,73 | 0,65 | 0,59 | 0,76 | 0,73 |
| 7 | 0,91 | 0,81 | 0,89 | 0,48 | 0,65 | 0,87 | 0,90 | 0,61 | 0,70 | 0,52 | 0,61 | 0,67 | 0,72 |
| 8 | 0,91 | 0,88 | 0,91 | 0,72 | 0,78 | 0,85 | 0,70 | 0,85 | 0,81 | 0,70 | 0,70 | 0,80 | 0,80 |
| 9 | 0,90 | 0,84 | 0,90 | 0,71 | 0,70 | 0,86 | 0,77 | 0,75 | 0,81 | 0,67 | 0,66 | 0,77 | 0,74 |
| 10 | 0,93 | 0,87 | 0,93 | 0,73 | 0,63 | 0,81 | 0,99 | 0,71 | 0,78 | 0,67 | 0,62 | 0,77 | 0,76 |
| 11 | 0,92 | 0,84 | 0,88 | 0,60 | 0,45 | 1,00 | 0,70 | 0,49 | 0,66 | 0,57 | 0,43 | 0,70 | 0,65 |
| 12 | 0,81 | 0,79 | 0,86 | 0,12 | 0,21 | 0,28 | 0,77 | 0,33 | 0,64 | 0,39 | 0,43 | 0,51 | 0,45 |
| 13 | 0,94 | 0,81 | 0,91 | 0,72 | 0,63 | 0,75 | 1,00 | 0,62 | 0,67 | 0,65 | 0,54 | 0,76 | 0,69 |

(1) em função dos parâmetros acústicos objectivos; (2) em função dos parâmetros arquitectónicos; (3) em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI*.

Quadro 7.6 – Classificação para a Qualidade Acústica de Igrejas (QAI) (0 a 1) segundo a metodologia multi-critério em função dos quatro métodos de cálculo.

| Igreja N° | Método de cálculo | (1) | (2) | (3.1) | (3.2) |
|-----------|----------------------------------|------|------|-------|-------|
| 1 | Bustêlo | 0,83 | 0,77 | 0,80 | 0,82 |
| 2 | Cabeça Santa | 0,90 | 0,85 | 0,91 | 0,91 |
| 3 | Clérigos - Porto | 0,85 | 0,77 | 0,84 | 0,82 |
| 4 | Lapa - Porto | 0,74 | 0,75 | 0,71 | 0,79 |
| 5 | Nossa Sra. da Boavista - Porto | 0,85 | 0,81 | 0,86 | 0,87 |
| 6 | Paço de Sousa | 0,86 | 0,80 | 0,85 | 0,83 |
| 7 | Santíssimo Sacramento - Porto | 0,79 | 0,78 | 0,78 | 0,83 |
| 8 | S. Martinho da Cedofeita - Porto | 0,87 | 0,83 | 0,87 | 0,86 |
| 9 | S. Pedro de Ferreira | 0,86 | 0,80 | 0,86 | 0,84 |
| 10 | S. Pedro de Rates | 0,87 | 0,82 | 0,87 | 0,86 |
| 11 | Sé do Porto | 0,83 | 0,73 | 0,80 | 0,76 |
| 12 | Serra do Pilar - V.N. Gaia | 0,60 | 0,68 | 0,64 | 0,73 |
| 13 | Tibães (mosteiro) | 0,86 | 0,77 | 0,84 | 0,84 |

(1) em função dos parâmetros acústicos objectivos; (2) em função dos parâmetros arquitectónicos; (3.1) em função dos parâmetros acústicos objectivos para o cálculo de CLA, REV, INTM, DIR e EQT e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*; (3.2) em função dos parâmetros arquitectónicos para o cálculo de CLA, REV, INTM, DIR e EQT e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*.

7.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Antes de se analisar os valores atingidos para a QAI, procede-se a uma reflexão sobre o desempenho dos modelos de previsão considerados. Através de análise estatística verifica-se que para o atributo *P80*, em cinco das igrejas regista-se uma diferença superior a 10% entre os valores calculados quando usados os modelos de previsão 2 e 3 (ver quadro 7.3). Entre os modelos 1 e 2 regista-se diferença superior a 10% entre os valores calculados para seis das igrejas. Entre os modelos 1 e 3 não há diferenças consideráveis a registar. Pode-se assim constatar que o cálculo do atributo *P80* em função apenas dos parâmetros arquitectónicos (modelo de previsão 2) difere consideravelmente dos outros dois métodos, que por sua vez, apresentam resultados mais ou menos semelhantes entre si. Como já tinha sido referido recomenda-se que se use os modelos de previsão que fazem uso do parâmetro *RASTI*, pois apresentam maiores graus de correlação. No entanto isto apresenta uma desvantagem para o utilizador que apenas dispõe dos dados relativos aos parâmetros arquitectónicos, visto que a quantificação do *RASTI* é um processo complexo que envolve medições *in situ* e equipamento próprio.

Para os atributos associados ao critério de avaliação c_2 (qualidade da música), os parâmetros que registam maiores diferenças entre os valores calculados consoante o modelo de previsão usado são a *clareza do discurso musical* (CLA) e a *reverberância* (REV), devido à grande diferença entre os graus de correlação

de cada modelo de previsão. As menores diferenças de resultados registam-se para o atributo *equilíbrio tímbrico* (EQT), visto os modelos de previsão terem um grau de correlação semelhante.

Os resultados de QAI calculados com valores determinados através dos modelos de previsão reflectem o comportamento descrito acima. Consta-se que os resultados para o método de cálculo 3.1 (quadro 7.7) são os que apresentam maior semelhança com os resultados calculados utilizando os valores medidos *in situ* (quadro 7.2) e que os métodos 2 e 3.2 são os que apresentam a menor semelhança. Conclui-se que os modelos de previsão em função dos parâmetros acústicos objectivos tendem a funcionar melhor. Como esperado, reflecte-se nos resultados de QAI o baixo grau de correlação do modelo de previsão em função dos parâmetros arquitectónicos para o cálculo do atributo *P80*. Isto é muito desvantajoso, pois sendo este o parâmetro com mais peso no algoritmo, vem condicionar consideravelmente os resultados finais. Conclui-se assim que, se possível, deve ser evitado o cálculo do parâmetro *P80* em função apenas dos parâmetros arquitectónicos.

Quadro 7.7 – Somatório das diferenças registadas (para as 13 igrejas testadas) na Qualidade Acústica de Igrejas (QAI) (0 a 1) para os quatro métodos de cálculo face aos valores *in situ*, segundo a metodologia multi-critério.

| Método de cálculo | (1) | (2) | (3.1) | (3.2) |
|---|------|------|-------|-------|
| Σ (diferenças) face <i>in situ</i> | 0,40 | 0,61 | 0,27 | 0,44 |

(1) em função dos parâmetros acústicos objectivos; (2) em função dos parâmetros arquitectónicos; (3.1) em função dos parâmetros acústicos objectivos para o cálculo de CLA, REV, INTM, DIR e EQT e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*; (3.2) em função dos parâmetros arquitectónicos para o cálculo de CLA, REV, INTM, DIR e EQT e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*.

Apresentam-se (quadros 7.8 a 7.12) as classificações distribuídas de acordo com valores crescentes de QAI para os quatro métodos de cálculo assim como para os dados avaliados *in situ*.

Quadro 7.8 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério de acordo com os valores avaliados *in situ*.

| Nº | Igreja | <i>In situ</i> |
|----|--|----------------|
| 4 | Lapa – Porto | 0,62 |
| 12 | Serra do Pilar - Vila Nova de Gaia | 0,68 |
| 7 | Santíssimo Sacramento – Porto | 0,79 |
| 13 | Tibães (mosteiro) – Braga | 0,79 |
| 11 | Sé - Porto | 0,81 |
| 1 | Bustêlo – Penafiel | 0,82 |
| 6 | Paço de Sousa – Penafiel | 0,83 |
| 8 | São Martinho da Cedofeita – Porto | 0,84 |
| 9 | S. Pedro de Ferreira - Paços de Ferreira | 0,85 |
| 3 | Clérigos – Porto | 0,85 |
| 5 | Nossa Senhora da Boavista – Porto | 0,85 |
| 10 | S. Pedro de Rates - Póvoa de Varzim | 0,87 |
| 2 | Cabeça Santa – Penafiel | 0,91 |

Quadro 7.9 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério segundo o método de cálculo (1).

| Nº | Igreja | Método de cálculo (1) |
|----|--|-----------------------|
| 12 | Serra do Pilar - Vila Nova de Gaia | 0,62 |
| 4 | Lapa – Porto | 0,75 |
| 7 | Santíssimo Sacramento – Porto | 0,80 |
| 1 | Bustêlo – Penafiel | 0,83 |
| 11 | Sé - Porto | 0,84 |
| 3 | Clérigos – Porto | 0,84 |
| 9 | S. Pedro de Ferreira - Paços de Ferreira | 0,85 |
| 5 | Nossa Senhora da Boavista – Porto | 0,85 |
| 6 | Paço de Sousa – Penafiel | 0,85 |
| 13 | Tibães (mosteiro) – Braga | 0,86 |
| 10 | S. Pedro de Rates - Póvoa de Varzim | 0,86 |
| 8 | São Martinho da Cedofeita – Porto | 0,86 |
| 2 | Cabeça Santa – Penafiel | 0,89 |

(1) em função dos parâmetros acústicos objectivos.

Quadro 7.10 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério segundo o método de cálculo (2).

| Nº | Igreja | Método de cálculo (2) |
|----|--|-----------------------|
| 12 | Serra do Pilar - Vila Nova de Gaia | 0,68 |
| 11 | Sé - Porto | 0,74 |
| 4 | Lapa – Porto | 0,75 |
| 3 | Clérigos – Porto | 0,77 |
| 1 | Bustêlo – Penafiel | 0,77 |
| 13 | Tibães (mosteiro) – Braga | 0,77 |
| 7 | Santíssimo Sacramento – Porto | 0,78 |
| 9 | S. Pedro de Ferreira - Paços de Ferreira | 0,80 |
| 6 | Paço de Sousa – Penafiel | 0,80 |
| 5 | Nossa Senhora da Boavista – Porto | 0,81 |
| 10 | S. Pedro de Rates - Póvoa de Varzim | 0,82 |
| 8 | São Martinho da Cedofeita – Porto | 0,83 |
| 2 | Cabeça Santa – Penafiel | 0,85 |

(2) em função dos parâmetros arquitectónicos.

Quadro 7.11 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério segundo o método de cálculo (3.1).

| Nº | Igreja | Método de cálculo (3.1) |
|----|--|-------------------------|
| 12 | Serra do Pilar - Vila Nova de Gaia | 0,65 |
| 4 | Lapa – Porto | 0,72 |
| 7 | Santíssimo Sacramento – Porto | 0,79 |
| 11 | Sé - Porto | 0,81 |
| 1 | Bustêlo – Penafiel | 0,81 |
| 3 | Clérigos – Porto | 0,83 |
| 13 | Tibães (mosteiro) – Braga | 0,84 |
| 6 | Paço de Sousa – Penafiel | 0,84 |
| 9 | S. Pedro de Ferreira - Paços de Ferreira | 0,85 |
| 10 | S. Pedro de Rates - Póvoa de Varzim | 0,86 |
| 8 | São Martinho da Cedofeita – Porto | 0,86 |
| 5 | Nossa Senhora da Boavista – Porto | 0,86 |
| 2 | Cabeça Santa – Penafiel | 0,90 |

(3.1) em função dos parâmetros acústicos objectivos para o cálculo de CLA, REV, INTM, DIR e EQT e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*.

Quadro 7.12 – Igrejas ordenadas de acordo com os valores crescentes de QAI para a metodologia multi-critério segundo o método de cálculo (3.2).

| Nº | Igreja | Método de cálculo (3.2) |
|----|--|-------------------------|
| 12 | Serra do Pilar - Vila Nova de Gaia | 0,72 |
| 11 | Sé - Porto | 0,76 |
| 4 | Lapa – Porto | 0,79 |
| 3 | Clérigos – Porto | 0,82 |
| 1 | Bustêlo – Penafiel | 0,82 |
| 7 | Santíssimo Sacramento – Porto | 0,83 |
| 6 | Paço de Sousa – Penafiel | 0,83 |
| 13 | Tibães (mosteiro) – Braga | 0,84 |
| 9 | S. Pedro de Ferreira - Paços de Ferreira | 0,84 |
| 8 | São Martinho da Cedofeita – Porto | 0,86 |
| 10 | S. Pedro de Rates - Póvoa de Varzim | 0,86 |
| 5 | Nossa Senhora da Boavista – Porto | 0,87 |
| 2 | Cabeça Santa – Penafiel | 0,91 |

(3.2) em função dos parâmetros arquitectónicos para o cálculo dos parâmetros acústicos subjectivos para a avaliação da música e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*.

De acordo com os valores avaliados *in situ* (quadro 7.8) regista-se para a igreja de Cabeça Santa a melhor classificação de QAI (0,91) enquanto a igreja da Lapa recebeu a pior classificação (0,62). Relativamente às classificações atribuídas em função dos modelos de previsão pode-se constatar que houve concordância entre os quatro métodos na classificação da melhor e da pior igreja no que diz respeito a QAI. A igreja de Cabeça Santa obteve a melhor classificação (variando entre 0,85 e 0,91) e a igreja da Serra do Pilar recebeu a pior classificação (que oscilou entre 0,62 e 0,72).

Estabeleceu-se uma tabela de conversão entre os valores calculados para a *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI) e qual a interpretação que se deve fazer desta com base nos resultados atingidos (ver quadro 7.13).

Quadro 7.13 – Tabela de conversão do valor de QAI numa escala subjectiva de interpretação do resultado obtido.

| QAI | Interpretação |
|---------------|---------------|
| ≤0,50 | Péssima |
|]0,50 : 0,70] | Má |
|]0,70 : 0,80] | Suficiente |
|]0,80 : 0,90] | Boa |
| >0,90 | Excelente |

Com base na escala de conversão adoptada pode-se verificar que apenas a igreja de Cabeça Santa atinge uma classificação *excelente*, tendo a grande maioria das igrejas atingido uma classificação *boa* ou *suficiente*. Apenas as igrejas da Lapa e da Serra do Pilar possuem uma classificação para QAI que pode ser considerada *má*, não havendo nenhum resultado *péssimo* a registar.

Pode-se analisar na figura 7.1 a distribuição da *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI), usando a escala subjectiva (ver quadro 7.13). Pode-se verificar a classificação obtida para cada igreja consoante foram utilizados valores medidos *in situ* para os parâmetros acústicos subjectivos ou métodos de cálculo para a determinação dos valores dos parâmetros acústicos subjectivos.

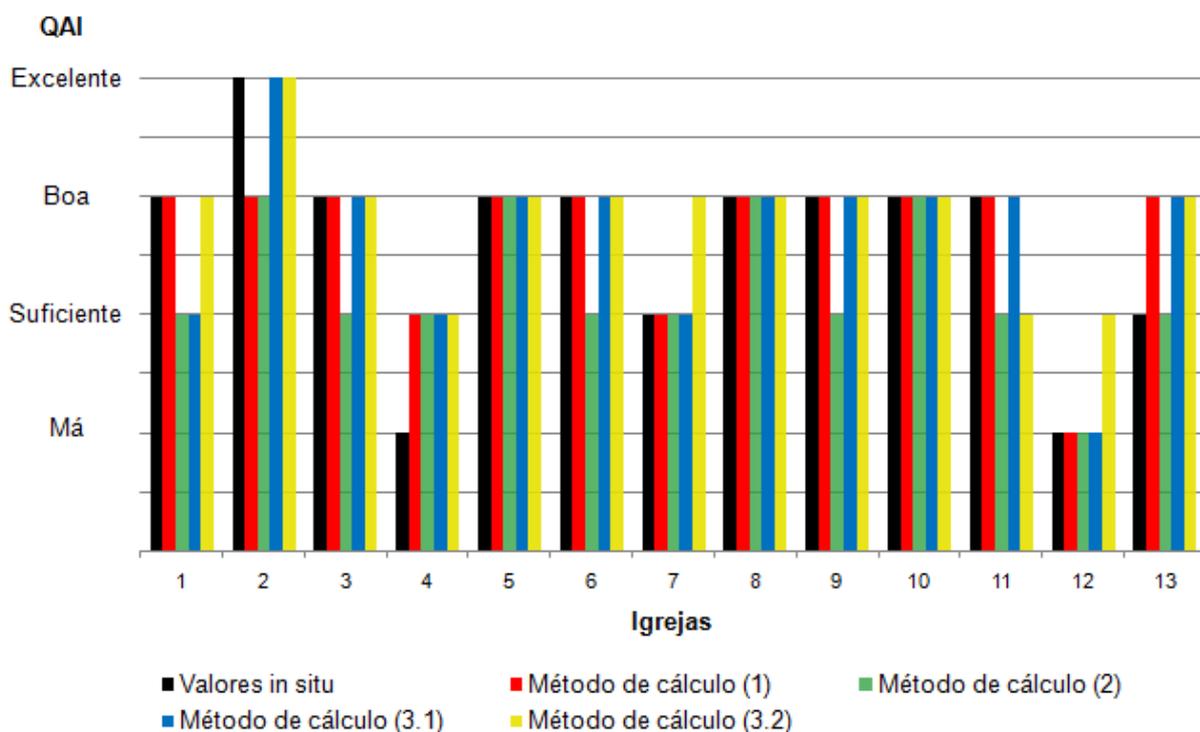


Figura 7.1 – Distribuição da classificação QAI (escala subjectiva) para as igrejas em estudo.

(1) em função dos parâmetros acústicos objectivos; (2) em função dos parâmetros arquitectónicos; (3.1) em função dos parâmetros acústicos objectivos para o cálculo de CLA, REV, INTM, DIR e EQT e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*; (3.2) em função dos parâmetros arquitectónicos para o cálculo dos parâmetros acústicos subjectivos para a avaliação da música e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*

Pode-se constatar que a igreja de Cabeça Santa (z_2) (ver figura 7.2) destaca-se como uma solução dominante, ou seja, as restantes *alternativas* (igrejas) assumem-se como *alternativas* dominadas. Isto significa que os valores para os atributos na alternativa z_2 são maiores ou iguais aos valores correspondentes nas restantes alternativas, o que corresponde a um maior nível de satisfação nos *critérios*

da avaliação (nomeadamente, a qualidade da *palavra* e da *música*). Esta solução (z_2) assume-se portanto, como a melhor segundo todos os objectivos.

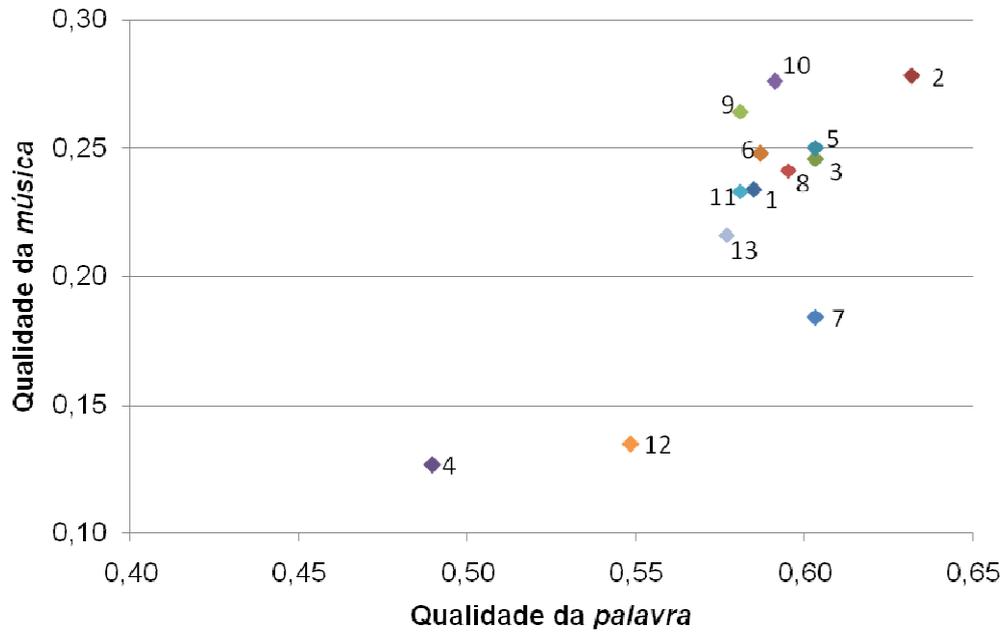


Figura 7.2 – Alternativa z_2 domina as restantes alternativas.

Verifica-se que as maiores diferenças entre os resultados para a QAI ocorrem para as igrejas da Lapa, Sé do Porto, Serra do Pilar e Tibães (nºs 4, 11, 12 e 13, respectivamente) (ver figura 7.3) sendo estas as igrejas que possuem os maiores volumes. Isto sugere que o desempenho de ambos os tipos de modelos de previsão (em função dos parâmetros acústicos objectivos e em função dos parâmetros arquitectónicos) tende a diminuir com o volume da igreja em análise.

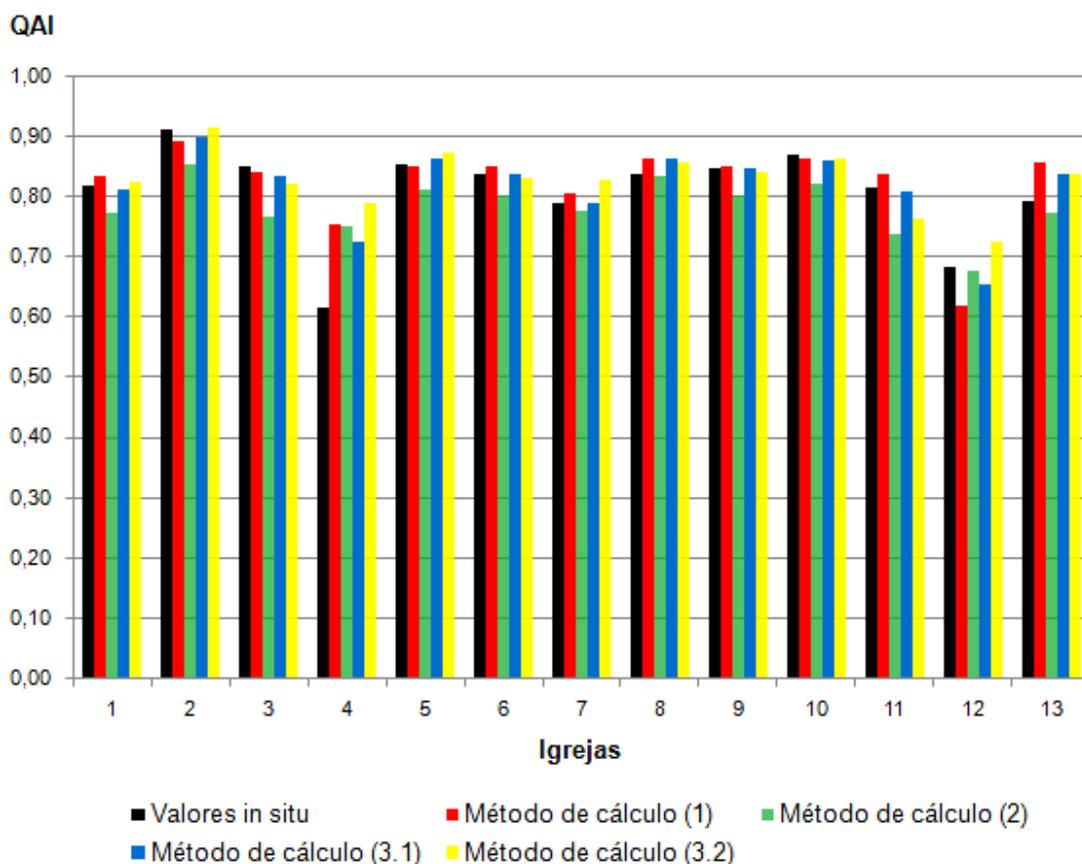


Figura 7.3 – Distribuição da classificação QAI (escala numérica 0 a 1) para as igrejas em estudo.

(1) em função dos parâmetros acústicos objectivos; (2) em função dos parâmetros arquitectónicos; (3.1) em função dos parâmetros acústicos objectivos para o cálculo de CLA, REV, INTM, DIR e EQT e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*; (3.2) em função dos parâmetros arquitectónicos para o cálculo dos parâmetros acústicos subjectivos para a avaliação da música e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de *P80*.

Ao se analisar os resultados obtidos dum ponto de vista dos parâmetros arquitectónicos, não se pode desassociar a boa classificação da igreja de Cabeça Santa do facto de apresentar uma dimensão reduzida, comparativamente às outras igrejas em estudo. No entanto, não se verifica a tendência de que para menores volumes e/ou áreas ocorra melhores classificações. As igrejas da Lapa e da Serra do Pilar são as que apresentam os piores resultados, consoante as abordagens de cálculo adoptadas para os valores dos atributos (*in situ* ou através de modelos de previsão, respectivamente), no entanto, os seus volumes ficam bastante aquém do volume máximo registado na amostra em estudo (Sé do Porto). É possível constatar que de maneira geral para igrejas de menores dimensões a QAI é mais elevada, ou seja, verifica-se que para menores valores dos volumes e áreas associadas às igrejas tende a resultar uma QAI superior, embora não seja possível estabelecer inequivocamente uma relação directa, pois às igrejas com piores

classificações não correspondem as maiores dimensões. Não existe uma correspondência clara entre um parâmetro arquitectónico individual e a QAI.

Pode-se ainda verificar que as igrejas de estilo Românico (Cabeça Santa, São Martinho da Cedofeita, S. Pedro de Ferreira, S. Pedro de Rates, Sé do Porto) são mais propícias, duma maneira geral, a melhores classificações. Quanto aos restantes estilos arquitectónicos presentes não é possível tirar conclusões mais aprofundadas face às poucas igrejas representativas para cada estilo e à dispersão dos resultados das mesmas.

Quanto aos parâmetros acústicos objectivos, é possível verificar que para a classificação obtida através do método de cálculo (1) obtêm-se uma correspondência entre a evolução dos valores registados para os parâmetros acústicos objectivos *tempo de reverberação* (RT) e *claridade* (C80) e os valores da *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI). À medida que o *tempo de reverberação* diminui e que a *claridade* aumenta a classificação para a *Qualidade Acústica da Igreja* é maior. Para o parâmetro acústico objectivo *intensidade sonora* (G) não foi possível retirar nenhuma ilação significativa, não sendo visível nenhuma correspondência directa entre o seu comportamento e as classificações atribuídas às igrejas. Para o parâmetro *RASTI*, apesar de à igreja com a melhor classificação (Cabeça Santa) corresponder o maior valor de *RASTI*, não é possível estabelecer uma correspondência directa para as outras igrejas, não havendo um comportamento linear do parâmetro.

7.5. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE CÁLCULO

Através do Microsoft Visual Basic desenvolveu-se uma ferramenta *software*, que põe em prática aquilo que foi exposto ao longo do trabalho. Esta ferramenta permite ao utilizador calcular a *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI), possibilitando recorrer aos dois tipos de abordagens considerados, ou seja, usando valores medidos *in situ* ou recorrendo a modelos de previsão.

Todos os métodos de cálculo considerados neste trabalho estão presentes, possibilitando o utilizador escolher o mais adequado de acordo com os dados disponíveis. É assim possível determinar os valores dos parâmetros acústicos subjectivos quando estes não estão quantificados, através dos modelos de previsão considerados.

Considera-se que o programa é um complemento importante ao trabalho apresentado, revelando-se como uma ferramenta útil para futuras aplicações.

8

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

8.1. CONCLUSÕES

O principal objectivo do estudo presente era determinar a viabilidade da aplicação da metodologia multi-critério para a avaliação acústica das igrejas, de modo a traduzir a percepção do auditor perante o comportamento acústico da igreja. Pretendia-se portanto desenvolver um algoritmo que traduzisse adequadamente o desempenho acústico da igreja para a *palavra* e para a *música* num índice único.

Este trabalho continuou os estudos já desenvolvidos no âmbito do Programa de Investigação “Acústica de Igrejas”, centrando-se na avaliação multi-critério da qualidade acústica existente nas igrejas.

Verificou-se que a metodologia multi-critério é um método fiável e facilmente reproduzível, revelando-se adequada ao problema proposto, conseguindo reproduzir de forma adequada a dualidade acústica presente nas igrejas no que diz respeito ao comportamento para a *palavra* e para a *música*. O método multi-critério aditivo simples, que agrega os valores dos *atributos* por uma fórmula linear (sendo o valor de cada *atributo* pesado de acordo com a importância que este assume) demonstrou-se adequado, sendo de aplicação simples e directa. O algoritmo proposto revela-se como eficiente, estabelecendo um compromisso equilibrado entre os dois critérios de avaliação considerados (qualidade da *palavra* e da *música*), de acordo com a sua relevância para o comportamento acústico das igrejas.

Conclui-se que quanto maior o peso atribuído ao parâmetro *P80*, melhores são as classificações atribuídas às igrejas, ou seja, para uma maior valorização do critério de avaliação c_1 (referente à qualidade da *palavra*) resulta um aumento da *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI). Isto vem reforçar a ideia de que a *palavra* é de facto o critério mais importante para um bom desempenho acústico da igreja, o que corresponde à percepção que os auditores têm do comportamento acústico das igrejas: que a qualidade da *palavra* é mais importante do que a qualidade da *música*. Tendo isso em conta, conclui-se que um algoritmo que atribua um peso mais elevado para o atributo *P80* é mais adequado. No entanto o algoritmo não descarta a importância (embora menor) da música.

Uma das vantagens deste método é a possibilidade de refinamento dos pesos atribuídos aos atributos considerados, o que será possível mediante uma maior amostra.

Para os *atributos* associados aos *critérios de avaliação* foram usados parâmetros acústicos subjectivos, que se apresentavam como uma forma adequada de traduzir o desempenho acústico duma igreja do ponto de vista do auditor.

O parâmetro *P80* revelou-se apropriado para a avaliação da qualidade da *palavra*, estando directamente relacionado com a inteligibilidade desta. O uso dos parâmetros acústicos subjectivos *clareza do discurso musical* (CLA), *reverberância* (REV), *intimidade* (INTM), *direccionabilidade* (DIR) e *equilíbrio tímbrico* (EQT) como atributos associados ao critério de avaliação c_2 (referente à *música*) revela-se adequado. Consegue-se uma correlação muito elevada com a *impressão geral* (IMPG) ($R^2=0,92$), que indica a percepção global que o auditor tem da qualidade da música da igreja, o que comprova a eficácia do uso de parâmetros acústicos subjectivos para a avaliação do comportamento acústico da igreja face à música.

Conclui-se assim que os parâmetros acústicos subjectivos são apropriados para avaliar o nível da qualidade acústica da *palavra* e da *música*, demonstrando uma relação directa com o desempenho acústico da igreja, tal como percebido pelos auditores.

Foi apresentado o seguinte algoritmo:

$$\text{Qualidade Acústica da Igreja} = c_1 + c_2 \quad (5.2)$$

$$\Leftrightarrow \text{QAI} = \text{Qualidade da palavra} + \text{Qualidade da música}$$

$$\Leftrightarrow \text{QAI} = 0,65 \cdot \text{Qualidade da palavra} + 0,35 \cdot \text{Qualidade da música}$$

$$\Leftrightarrow \text{QAI} = (0,65 \cdot P80_N) + (0,1295 \cdot \text{CLA_N} + 0,0805 \cdot \text{REV_N} + 0,0560 \cdot \text{INTM_N} + 0,0735 \cdot \text{DIR_N} + 0,0105 \cdot \text{EQT_N})$$

Parâmetros acústicos subjectivos: Clareza do discurso musical (CLA); Reverberância (REV); Intimidade (INTM); Direccionalidade (DIR); Equilíbrio tímbrico (EQT).

A valorização de cada critério de avaliação revela-se ajustada, reflectindo de forma coerente a relevância destes para a *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI).

Foram necessários estabelecer modelos de previsão porque baseou-se a metodologia multi-critério adoptada na avaliação de cada igreja através de parâmetros acústicos subjectivos, como já foi referido. Em geral, os parâmetros acústicos subjectivos não estão disponíveis, tendo-se apenas os dados relativos aos parâmetros acústicos objectivos e/ou aos parâmetros arquitectónicos duma igreja, daí a necessidade de modelos de previsão.

Para o cálculo do parâmetro acústico subjectivo referente à qualidade da música (*P80*) foi possível retirar as seguintes conclusões:

- o modelo de previsão em função do parâmetro acústico objectivo *RASTI* consegue explicar 50% da variabilidade dos valores de *P80*, superior ao modelo de previsão em função dos parâmetros arquitectónicos ($R^2=0,40$);
- deve-se recorrer ao modelo de previsão em função dos parâmetros arquitectónicos e da medida *RASTI*, que é o que apresenta melhor correlação ($R^2=0,61$);
- a *Superfície de Absorção Sonora Equivalente Total* (ABSO_TOT) e o *Coefficiente de Absorção Sonora Médio de todas as Superfícies* (CABSO_ME) são os únicos parâmetros

comuns a todos os modelos de previsão que fazem uso dos parâmetros arquitectónicos, confirmando assim a importância do tipo de materiais usados no interior da igreja e como estes podem condicionar tanto a qualidade da palavra como da música.

Para os modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos para a avaliação da música, conclui-se que:

- o *tempo de reverberação* (RT) está presente em todos os modelos de previsão em função dos parâmetros acústicos objectivos, o que vem a comprovar (uma vez mais) a importância que este parâmetro tem na caracterização do comportamento acústico dum espaço;
- a *definição* (D) não é necessária para o cálculo de parâmetros subjectivos para a avaliação da música;
- o *Coefficiente de Absorção Sonora Médio de todas as Superfícies* (CABSO_ME) é comum a todos os modelos de previsão em função dos parâmetros arquitectónicos;
- o parâmetro *intimidade* (INTM) é melhor previsto pelos parâmetros arquitectónicos ($R^2=0,87$);
- para os parâmetros acústicos subjectivos *claridade* (CLA), *reverberância* (REV) e *direccionabilidade* (DIR), os modelos de previsão em função dos parâmetros acústicos objectivos apresentam um maior grau de correlação ($R^2=0,83$, $R^2=0,85$ e $R^2=0,79$, respectivamente) do que os respectivos modelos de previsão em função dos parâmetros arquitectónicos;
- para o *equilíbrio tímbrico* (EQT) é indiferente o uso do modelo de previsão, apresentando ambas as fórmulas um grau de correlação igual ($R^2=0,70$).

Conclui-se assim que os modelos de previsão em função dos parâmetros acústicos objectivos são melhores, fornecendo resultados mais aproximados aos valores medidos *in situ* do que os modelos de previsão em função dos parâmetros arquitectónicos.

Os resultados de QAI calculados a partir de valores determinados através dos modelos de previsão reflectem o comportamento descrito acima. Consta-se que os resultados para o método de cálculo 3.1 (em função dos parâmetros acústicos objectivos para o cálculo de CLA, REV, INTM, DIR e EQT e em função dos parâmetros arquitectónicos e do parâmetro acústico objectivo *RASTI* para o cálculo de P80) são os que apresentam maior semelhança com os resultados para QAI calculados utilizando os valores medidos *in situ*. Os métodos 2 e 3.2 são os que apresentam a menor semelhança. Conclui-se que os métodos de cálculo que fazem uso dos parâmetros acústicos objectivos tendem a funcionar melhor.

Verifica-se ainda que as maiores diferenças entre os resultados para a QAI ocorrem para as igrejas que possuem os maiores volumes o que sugere que o desempenho de ambos os tipos de modelos de previsão (em função dos parâmetros acústicos objectivos e em função dos parâmetros arquitectónicos) tende a diminuir com o volume da igreja em análise.

É ainda possível chegar a algumas conclusões relativamente à influência que as características acústicas e arquitectónicas das igrejas que mais influenciam a percepção final do som, avaliando a variação que estas medidas provocam na Qualidade Acústica da Igreja (QAI).

Para os parâmetros acústicos objectivos conclui-se que à medida que o *tempo de reverberação* (RT) diminui e que a *claridade* (C80) aumenta a classificação para a QAI é maior. O comportamento oposto destes parâmetros parece lógico, pois para *tempos de reverberação* menores estão associados maiores valores de *claridade*. No entanto admite-se que isto apenas ocorre até ao parâmetro acústico objectivo *tempo de reverberação* atingir um certo valor. A partir de um valor mínimo (pode-se considerar 0,8 segundos como o valor limite abaixo do qual a inteligibilidade começa a decair) isto deixaria de acontecer, no entanto um valor assim baixo dificilmente será atingido numa igreja. Para a medida acústica objectiva *intensidade sonora* (G) não foi possível retirar nenhuma ilação, não havendo nenhuma correspondência directa entre o seu comportamento e as classificações atribuídas às igrejas. Para a medida *RASTI*, apesar de à igreja com a melhor classificação (Cabeça Santa) corresponder o maior valor de *RASTI*, não é possível estabelecer uma correspondência directa para as outras igrejas, não havendo um comportamento linear da medida.

Para os parâmetros arquitectónicos pode-se concluir que de maneira geral para igrejas de menores dimensões a QAI é mais elevada, mas não é possível estabelecer uma relação directa entre QAI e o comportamento dos parâmetros arquitectónicos pois os valores registados não têm uma evolução linear que acompanhe as classificações atribuídas às igrejas. No entanto, conclui-se que as igrejas de estilo predominantemente Românico (Cabeça Santa, São Martinho da Cedofeita, S. Pedro Ferreira, S. Pedro de Rates, Sé do Porto) obtêm melhores classificações.

8.2. PISTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De modo a melhorar o método estabelecido é importante fazer futuras avaliações de modo a testar o algoritmo sugerido neste estudo (assim como outras possíveis hipóteses) e verificar a sua precisão e se é possível optimizá-lo, tendo em conta os pesos agregados aos atributos considerados. Uma amostra mais extensa de igrejas pode assim possibilitar refinar os valores adoptados.

É necessário abordar a problemática da inteligibilidade da palavra, no sentido de conseguir traduzir este parâmetro através dum modelo de previsão mais exacto, especialmente em função dos parâmetros arquitectónicos. No entanto sugere-se a aplicação apenas de parâmetros que possam ser quantificados para um valor único caracterizador de cada igreja, visto a inaplicabilidade do parâmetro nesta metodologia caso contrário.

É necessária uma validação prática. Recomenda-se a realização de testes subjectivos usando auditores com uma forte experiência de como a envolvente acústica deve funcionar, como grupos corais (no caso da música) e entrevistas a entidades religiosas (sacerdotes, etc.) para validar ou optimizar o peso atribuído a cada um dos critérios de avaliação, tentando resolver a questão da dualidade registada entre a qualidade da música e a qualidade da palavra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahnert, Wolfgang., Schmidt, Wolfgang. *Fundamentals to perform acoustical measurements*. <http://www.rh.com/easera/EASERAAppendixUSPV.pdf>. Acedido em 23 de Abril de 2008.
- Belton, Valerie., Stewart, Theodor J. (2001). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Bogetoft, Peter., Pruzan, Peter. (1991). *Planning with multiple criteria: investigation, communication, choice*. North Holland, Amesterdão.
- Carvalho, António Pedro Oliveira de. (1994). *Influence of architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*, FEUP.
- Carvalho, António Pedro Oliveira de. (2008). *Acústica Ambiental e de Edifícios.*, FEUP Edições, Porto.
- CEI IEC 268-16, Rapport de la Commission Electrotechnique Internationale "Equipements pour systèmes électroacoustiques - Seizième partie : Evaluation objective de l'intelligibilité de la parole dans les salles de conférence par la méthode "RASTI", 1988.
- Churcher, B. G. (1963). *The Acoustics of Churches*. British Journal of Applied Physics, 25/11/1963, 14 páginas, Enville Cottage, Cheshire.
- Engel, Zbigniew., Kosala, Krzysztof. (2005) *Acoustic Properties Of The Selected Churches In Poland*. Czasopisma elektroniczne agh,mechanics, 24/3/2005, 9 páginas, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.
- Germano, J. P. da Conceição Carreira. (1995). *Ajuda à Decisão na Seleção Multicritério de Projectos*, FEUP.
- Kinsler, Lawrence E. (1982). *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, New York.
- Knudsen, V. O., Harris, C. M. (1957). *Le projet acoustique en architecture*. Dunod, Paris.
- Lee, Sangjun. (2003). *Comparative Analysis of Speech Intelligibility in Church Acoustics using Computer Modeling*, University of Florida.
- Lencastre, Margarida Maria Mendes de Freitas de Queiroz e. (1998). *Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análises de Carácter Objectivo e Subjectivo*, FEUP.
- Morgado, António Eduardo Jorge. (1996). *Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas através de Parâmetros Subjectivos*, FEUP.
- Recuero Lopez, Manuel., Gil Gonzalez, Constantino. (1993). *Acustica arquitectonica*. Benzal, Madrid.
- Ribezi, Eva. (2006). *Architectural Acoustics.*, University of Ljubljana.
- Silva, P. Martins da. (1998). *Acústica de edifícios*. LNEC, Lisboa.
- Sítio 1, http://pt.wikipedia.org/wiki/Conc%C3%ADlio_Vaticano_II acedido em Junho de 2008.
- Sítio 2, <http://www.ippar.pt> acedido em Maio de 2008.
- Sítio 3, <http://barrocoenportugal.blogspot.com> acedido em Maio de 2008.
- Sítio 4, <http://commons.wikimedia.org> acedido em Maio de 2008.
- Sítio 5, <http://www.revistatemalivre.com> acedido em Maio de 2008.

Sítio 6, http://www.agencia.ecclesia.pt/catolicopedia/artigo.asp?id_entrada=66 acessado em Maio de 2008.

Vincke, Philippe. (1992). *Multicriteria Decision-aid*. John Wiley & Sons, Chichester.