

# METODOLOGIA MULTI-CRITÉRIO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE ACÚSTICA EM IGREJAS

**António P. O. Carvalho, José P. G. Loureiro**

Laboratório de Acústica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto  
carvalho@fe.up.pt  
josepedro.loureiro@gmail.com

## **Resumo**

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 (denominado QAI – *Qualidade Acústica de Igrejas*) a partir de parâmetros acústicos subjectivos, objectivos e até mesmo a partir de parâmetros arquitectónicos. Com base numa amostra de 13 igrejas foi desenvolvido um algoritmo para obtenção do QAI com base no método multi-critério aditivo simples, que agrega os valores de parâmetros acústicos subjectivos, sendo cada valor pesado de acordo com a importância que cada parâmetro assume no desempenho acústico global da igreja. O QAI pode ser obtido através de valores medidos *in situ* ou por valores previstos. Foram pois estabelecidos modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos a partir de parâmetros acústicos objectivos e/ou parâmetros arquitectónicos.

**Palavras-chave:** Acústica, Igrejas, multi-critério, parâmetros acústicos, parâmetros arquitectónicos.

## **Abstract**

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 global Acoustic Quality of a Church in a single index using either acoustic or architectural parameters. In order to quantify the Church Acoustic Quality index (QAI), subjective acoustic parameters were used so that the receptor's perception of the acoustic behavior can be adequately translated. Using a multi-criteria method, and data from a sample of 13 churches, subjective acoustic parameters were associated with weight factors, whose values were calculated according to the relevance of each parameter in the acoustic behavior of the church. Prediction models were established to calculate the subjective acoustic parameters, using either objective acoustic parameters or architectural parameters.

**Keywords:** Acoustics, Multi-criteria, Churches, Acoustic parameters, Architectural parameters.

## **1 Introdução**

Um bom comportamento acústico é essencial para o conforto e qualidade global de um edifício. Esta realidade não se reflecte ainda genericamente no caso de igrejas, salvo honrosas excepções. Existe assim uma necessidade de estudar e desenvolver métodos para caracterizar a qualidade acústica

existente numa igreja. Uma igreja deve possuir propriedades acústicas que possibilitem um discurso perceptível e uma reverberação e clareza adequadas à música. Isto constitui um dos maiores problemas na temática de acústica de igrejas, pois *palavra* e *música* requerem diferentes exigências acústicas, o que torna complexa a obtenção de um adequado comportamento acústico global numa igreja que seja um bom compromisso entre diversos requisitos.

## 2 Metodologia

### 2.1 Selecção de Igrejas

A lista de igrejas estudadas no âmbito deste trabalho foi seleccionada de acordo com a bibliografia do Programa de Investigação em Acústica de Igrejas da FEUP que incidiu num total de 54 igrejas [5]. Destas, foram usados os dados já disponíveis relativos a 13 igrejas que dispunham da totalidade dos parâmetros necessários (Tabela 1).

Tabela 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 de Cedofeita (antiga) – 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                            |

### 2.2 Parâmetros arquitectónicos

Os parâmetros arquitectónicos utilizados foram seleccionados tendo como base as escolhas feitas em estudos já realizados previamente (Tabela 2).

Tabela 2 – Descrição dos treze parâmetros arquitectónicos considerados.

| Sigla      | Designação  | Sigla      | Designação              |
|------------|---|------------|-------------------------|
| VOL_TOT    | Volume Total (m <sup>3</sup> )                                    | L_NAVES    | Comprimento da Nave (m) |
| VOL_NAVES  | Volume da Nave (m <sup>3</sup> )                                  | H_MAX      | Altura Máxima (m)       |
| AREA_TOT   | Área Total (m <sup>2</sup> )                                      | H_NAVES    | Altura da Nave (m)      |
| AREA_NAVES | Área da Nave (m <sup>2</sup> )                                    | LARG_NAVES | Largura da Nave (m)     |
| L_MAX      | Comprimento Máximo (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 <sup>2</sup> ) |            |                         |
| CABSO_ME   | Coef. de Absorção Sonora Médio de todas as superfícies            |            |                         |

## 2.3 Parâmetros acústicos

### 2.3.1 Parâmetros acústicos objectivos

Para uma descrição adequada das funções da *palavra* e da *música* numa igreja usaram-se valores para os seguintes sete parâmetros acústicos objectivos:

- Tempo de reverberação (RT), s
- Claridade (C80), dB
- Tempo central (TS), ms
- *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI)
- Tempo de decaimento curto (EDT), s
- Definição (D50)
- Intensidade Sonora (G), dB

### 2.3.2 Parâmetros acústicos subjectivos

Para a avaliação acústica de cada igreja face à *música* foram usados dez parâmetros acústicos subjectivos avaliados *in situ* (com trechos musicais de clarinete e oboé ao vivo avaliados por grupo de auditores) numa escala finita de 1 (*pouco*) a 7 (*muito*) [3]:

- *Ruído de fundo* (RF): Os sons escutados no local que não os da fonte; ruídos que perturbem a audição e/ou a comunicação.
- *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.
- *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.
- *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.
- *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.
- *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.
- *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.
- *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.
- *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.
- *Impressão geral* (IMPG): a impressão geral da qualidade acústica sentida.

Para avaliação da acústica no local face à *palavra* foi utilizado o parâmetro *P80*. Este parâmetro quantifica as palavras correctamente compreendidas por cada auditor, numa lista de 80 palavras lidas *in situ* (de 0 a 80) [1].

### 3 Dados arquitectónicos e acústicos

A Tabela 3 apresenta o conjunto de valores dos parâmetros arquitectónicos para as igrejas em estudo.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros arquitectónicos para as igrejas em estudo [1].

| Igreja Nº                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VOL_TOT (m <sup>3</sup> )    | 6476  | 751   | 5130  | 11423 | 3740  | 6028  | 6816  |
| VOL_NAVES (m <sup>3</sup> )  | 5166  | 558   | 4032  | 8787  | 3108  | 4564  | 4894  |
| AREA_TOT (m <sup>2</sup> )   | 515   | 108   | 273   | 753   | 499   | 546   | 510   |
| AREA_NAVES (m <sup>2</sup> ) | 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 <sup>2</sup> )   | 226   | 40    | 112   | 328   | 152   | 119   | 233   |
| CABSO_ME                     | 0,091 | 0,070 | 0,061 | 0,076 | 0,083 | 0,047 | 0,085 |
| Igreja Nº                    | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |       |
| VOL_TOT (m <sup>3</sup> )    | 1117  | 2912  | 3918  | 15260 | 11566 | 8608  |       |
| VOL_NAVES (m <sup>3</sup> )  | 922   | 2301  | 3386  | 11232 | 10400 | 5416  |       |
| AREA_TOT (m <sup>2</sup> )   | 126   | 233   | 427   | 982   | 591   | 595   |       |
| AREA_NAVES (m <sup>2</sup> ) | 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 <sup>2</sup> )   | 21    | 72    | 94    | 261   | 228   | 259   |       |
| CABSO_ME                     | 0,030 | 0,055 | 0,044 | 0,047 | 0,069 | 0,073 |       |

As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores, para cada igreja, de todos os parâmetros acústicos (objectivos e subjectivos) avaliados.

Tabela 4 – Valores médios para cada igreja dos parâmetros acústicos objectivos para as bandas de frequência de 500 e 1k Hz [2].

| Igreja Nº | RT (s) | EDT (s) | C80 (dB) | D50  | 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  |

Tabela 5 – Valores médios para cada igreja dos parâmetros acústicos subjectivos (escala 1 a 7) e do parâmetro acústico subjectivo P80 (escala de 0 a 80) [1,3].

| Igreja Nº | RF   | INTS | CLA  | REV  | ECO  | INTM | DIR  | ENV  | EQT  | IMPG | P80   |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1         | 2,85 | 4,77 | 4,08 | 5,15 | 5,62 | 4,46 | 4,46 | 4,62 | 5,46 | 4,38 | 72,00 |
| 2         | 2,85 | 4,69 | 6,15 | 2,46 | 6,77 | 5,15 | 5,69 | 3,62 | 6,15 | 4,92 | 77,75 |
| 3         | 5,40 | 4,60 | 5,50 | 3,70 | 6,00 | 4,50 | 4,80 | 4,10 | 4,00 | 4,50 | 74,25 |
| 4         | 4,83 | 3,67 | 2,67 | 6,00 | 4,67 | 2,33 | 3,17 | 3,50 | 4,50 | 2,33 | 60,25 |
| 5         | 2,17 | 4,83 | 4,67 | 4,67 | 5,58 | 4,33 | 4,92 | 4,42 | 5,50 | 4,67 | 74,25 |
| 6         | 2,00 | 4,46 | 5,00 | 4,31 | 5,92 | 4,38 | 4,77 | 4,92 | 5,31 | 4,85 | 72,25 |
| 7         | 1,54 | 4,38 | 3,23 | 5,62 | 4,38 | 3,85 | 3,92 | 4,85 | 5,08 | 3,31 | 74,25 |
| 8         | 3,83 | 5,42 | 4,17 | 5,08 | 5,25 | 4,58 | 4,58 | 5,42 | 5,67 | 4,58 | 73,25 |
| 9         | 2,92 | 5,33 | 5,17 | 4,17 | 5,42 | 5,33 | 5,17 | 5,08 | 5,67 | 5,25 | 71,50 |
| 10        | 3,67 | 4,75 | 5,33 | 4,33 | 6,17 | 5,08 | 5,50 | 4,50 | 5,83 | 5,25 | 72,75 |
| 11        | 2,80 | 4,13 | 5,07 | 4,60 | 5,33 | 3,20 | 4,53 | 4,00 | 3,93 | 4,67 | 71,50 |
| 12        | 2,40 | 4,47 | 2,87 | 6,27 | 3,67 | 3,20 | 3,47 | 4,67 | 3,80 | 2,87 | 67,50 |
| 13        | 1,82 | 3,73 | 4,82 | 4,00 | 5,82 | 3,27 | 4,55 | 3,91 | 5,36 | 4,00 | 71,00 |

#### 4 Método Multi-Critério em Acústica de Igrejas

O Método Multi-Critério é um algoritmo matemático com uma metodologia que procura, em situações com critérios múltiplos, ajudar o utilizador a explorar diferentes soluções (*alternativas*) e a escolher ou identificar aquela que representa o melhor compromisso. Para escolher a *alternativa* preferida são utilizados *critérios de avaliação* (linhas de orientação segundo as quais se aborda o problema em questão) a que estão associados *atributos* (parâmetros com a função de medir os níveis de satisfação dos *critérios de avaliação* para cada *alternativa*).

O método multi-critério aditivo simples [4], agrega os valores dos *atributos* de cada *alternativa* (neste caso, uma igreja) por uma fórmula linear, sendo o valor de cada *atributo* pesado de acordo com a importância que este assume para a avaliação do fenómeno (a qualidade acústica global da igreja). 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.

Para uma igreja possuir um bom comportamento acústico global é necessário ter uma boa inteligibilidade da *palavra* assim como uma boa percepção da *música*. Como tal, foram escolhidos os dois seguintes *critérios de avaliação* ( $c_1$  e  $c_2$ ):

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

O critério  $c_1$  relacionado com a qualidade da *palavra* é o mais importante, pois presentemente, a oração (e a leitura) é a actividade de maior importância nos serviços religiosos católicos. 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, pois traduzem de uma forma eficaz a qualidade da *palavra* e da *música* numa igreja do ponto de vista do auditor.

Ao *critério de avaliação*  $c_1$  (referente à qualidade da *palavra* na igreja), o *atributo* associado será o parâmetro acústico subjectivo ( $a_1$ ): *P80*. Este é o único parâmetro directamente relacionado com a inteligibilidade da palavra.

Ao critério de avaliação  $c_2$  (referente à qualidade da *música* na igreja) associam-se os parâmetros que apresentam maior correlação com a *impressão geral*, [3] nomeadamente:

- $a_2$ : *Clareza do discurso musical* (CLA) ( $|R| = 0,94$ );
- $a_3$ : *Reverberância* (REV) ( $|R| = 0,80$ );
- $a_4$ : *Intimidade* (INTM) ( $|R| = 0,88$ );
- $a_5$ : *Direccionalidade* (DIR) ( $|R| = 0,93$ );
- $a_6$ : *Equilíbrio tímbrico* (EQT) ( $|R| = 0,86$ ).

Excluiu-se o uso do parâmetro *eco*, apesar da elevada correlação deste com a *impressão geral* devido à sua dificuldade de gradação.

Tabela 6 – Escalas de conversão para a normalização ( $_N$ ) dos atributos originais.

| Classificação original avaliada | Classificação normalizada | Classificação original avaliada | Classificação normalizada | Classificação original avaliada | 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 avaliada | Classificação normalizada | Classificação original avaliada | 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                      |                                 |                           |

É necessária uma normalização dos valores dos parâmetros acústicos pois eles apresentam escalas e objectivos diferentes. 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 passando de valores de um *parâmetro* para valores normalizados de um *parâmetro<sub>N</sub>* (Tabela 6).

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).

A equação determinada para QAI é caracterizada em função dos dois *critérios de avaliação* definidos ( $c_1$  e  $c_2$ ), traduzidos a partir dos *atributos* ( $a_i$ ) associados a cada um. Usa-se a seguinte formalização:

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

$$\text{QAI} = \text{Qualidade da palavra} + \text{Qualidade da música} \quad (1)$$

$$\text{QAI} = w_1 \cdot \text{Qualidade da palavra} + w_2 \cdot \text{Qualidade da música}$$

$$\text{QAI} = w_1 (P80\_N) + w_2 (w_{2,1} \text{CLA\_N} + w_{2,2} \text{REV\_N} + w_{2,3} \text{INTM\_N} + w_{2,4} \text{DIR\_N} + w_{2,5} \text{EQT\_N})$$

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. Quanto maior o peso ( $w_1$ ) atribuído ao parâmetro *P80*, melhores são as classificações atribuídas às igrejas, o que confirma a ideia de que a *palavra* é de facto o critério mais importante para um bom desempenho acústico da igreja. Porém, 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:

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

Procede-se à determinação dos pesos  $w_i$  a atribuir aos *atributos* ( $a_i$ ) para avaliação da qualidade da *música* na igreja. Foi possível obter uma correlação bastante elevada da *impressão geral* com os cinco parâmetros acústicos subjectivos considerados ( $R^2 = 0,92$ ) (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores dos pesos ( $w_{2,j}$ ) dados aos atributos associados ao critério de avaliação ( $c_2$ ) para a qualidade da música.

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

A expressão final para o QAI é a seguinte:

$$\text{QAI} = 0,65 (P80\_N) + (0,1295 \text{CLA\_N} + 0,0805 \text{REV\_N} + 0,0560 \text{INTM\_N} + 0,0735 \text{DIR\_N} + 0,0105 \text{EQT\_N}) \quad (2)$$

## 5 Modelos de Previsão

Em geral, os valores dos parâmetros acústicos subjectivos de uma igreja não estão disponíveis, tendo-se apenas os dados relativos aos parâmetros arquitectónicos ou, quanto muito, os parâmetros acústicos objectivos (*RT*, etc.). É necessário então estudar 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.

### 5.1 Modelos de previsão para o parâmetro *P80*

A Tabela 8 apresenta os três modelos de previsão para o parâmetro *P80*:

- *A* - Usando só o parâmetro acústico objectivo *RASTI*;
- *B* - Usando só parâmetros arquitectónicos;
- *C* - Usando parâmetros arquitectónicos e o parâmetro acústico objectivo *RASTI*.

O modelo mais adequado é aquele que efectua o cálculo do parâmetro em função dos parâmetros arquitectónicos e da medida *RASTI* (modelo *C*). 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 ambos os modelos de previsão que fazem uso dos parâmetros arquitectónicos (*B* e *C*), confirmando assim relevância do tipo de materiais usados no interior da igreja e a sua importância para uma boa perceptibilidade da palavra.

Tabela 8 – Modelos de previsão para o parâmetro *P80* (tipo *A*, *B* e *C*).

| Equação N° | Modelos de previsão para <i>P80</i>  | EP  | R <sup>2</sup> |
|------------|--|-----|----------------|
| (3)        | (A) Usando só o parâmetro acústico objectivo <i>RASTI</i> :<br>$P80 = -62,224.RASTI^2 + 88,652.RASTI + 48,089$   | nd  | 0,50           |
| (4)        | (B) Usando só parâmetros arquitectónicos:<br>$P80 = 76,977 + 3,700.10^{-4}.VOL\_TOTAL - 0,135.L\_NAVE$<br>$- 0,356.H\_NAVE - 6,800.10^{-3}.ABSO\_TOT - 49,935.CABSO\_ME$   | 3,1 | 0,40           |
| (5)        | (C) Usando parâmetros arquitectónicos e o parâmetro acústico objectivo <i>RASTI</i> :<br>$P80 = 62,886 + 6,440.10^{-3}.AREA\_TOT - 0,2274.L\_MAX$<br>$+ 0,1081.H\_MAX - 0,00633.ABSO\_TOT + 8,750.CABSO\_ME$<br>$+ 34,742.RASTI$ | 2,5 | 0,61           |

EP - Estimativa do erro-padrão do valor estimado

### 5.2 Modelos de previsão para os parâmetros acústicos subjectivos para avaliação da qualidade da música

As Tabelas 9 e 10 apresentam os modelos gerais lineares para obter os valores dos parâmetros acústicos subjectivos através dos parâmetros acústicos objectivos (tipo *A*) ou dos parâmetros arquitectónicos (tipo *B*).



Tabela 9 – Modelos gerais lineares de previsão para obter os parâmetros acústicos subjectivos através dos parâmetros acústicos objectivos (tipo A) usando os dados médios de cada igreja calculados em função das bandas de frequência de 500 e 1k Hz.

| Equação N° | Modelos de previsão (tipo A: com parâmetros acústicos objectivos) | EP   | R <sup>2</sup> |
|------------|---|------|----------------|
| (6)        | $CLA = 6,336 - 0,629.RT + 0,052.G$                                | 0,52 | 0,83           |
| (7)        | $REV = 2,678 + 0,409.RT - 0,140.C80 - 0,014.G$                    | 0,48 | 0,85           |
| (8)        | $INTM = 3,474 - 0,313.RT - 0,0085.C80 + 0,151.G$                  | 0,48 | 0,77           |
| (9)        | $DIR = 5,328 - 0,397.RT + 0,055.G$                                | 0,39 | 0,79           |
| (10)       | $EQT = 5,971 - 0,329.RT + 0,050.G$                                | 0,42 | 0,70           |

*Estimativa do erro-padrão do valor estimado*

O *tempo de reverberação* (RT) está presente em todos os modelos de previsão em função dos parâmetros acústicos objectivos (tipo A), o que indica a importância que este parâmetro tem na caracterização do comportamento acústico dum espaço.

O parâmetro arquitectónico *Coefficiente de Absorção Sonora Médio de todas as Superfícies* (CABSO\_ME) é comum a todos os modelos de previsão em função dos parâmetros arquitectónicos (tipo B).

Para os parâmetros acústicos subjectivos *claridade* (CLA), *reverberância* (REV) e *direccionabilidade* (DIR), os modelos de previsão em função dos parâmetros acústicos objectivos são mais adequados, enquanto que o parâmetro *intimidade* (INTM) é melhor previsto pelos parâmetros arquitectónicos (tipo B). Para o *equilíbrio tímbrico* (EQT) verifica-se que é indiferente o uso do modelo de previsão.

Tabela 10 – Modelos gerais lineares de previsão para obter os valores dos parâmetros acústicos subjectivos através dos parâmetros arquitectónicos (tipo B) [3].

| Equação N° | Modelo de previsão (tipo B: com parâmetros arquitectónicos)   | EP   | R <sup>2</sup> |
|------------|---|------|----------------|
| (11)       | $CLA = 6,833 - 0,116.H\_NAVE - 0,100.LARG\_MED + 10,932.CABSO\_ME$  | 0,80 | 0,61           |
| (12)       | $REV = 1,179 - 8,2 \cdot 10^{-3}.AREA\_NAVE + 0,179.L\_NAVE + 0,220.LARG\_MED - 17,090.CABSO\_ME$                               | 0,75 | 0,63           |
| (13)       | $INTM = 5,858 + 3,6 \cdot 10^{-3}.AREA\_TOT - 0,048.L\_MAX - 0,060.LARG\_NAVE - 7,3 \cdot 10^{-3}.ABSO\_TOT + 14,860.CABSO\_ME$ | 0,39 | 0,87           |
| (14)       | $DIR = 6,833 + 4,0 \cdot 10^{-3}.AREA\_NAVE - 0,100.L\_NAVE - 0,041.H\_NAVE - 0,095.LARG\_MED + 10,831.CABSO\_ME$               | 0,52 | 0,66           |
| (15)       | $EQT = 6,881 - 0,107.H\_NAVE - 0,036.LARG\_NAVE + 5,819.CABSO\_ME$  | 0,43 | 0,70           |

*Estimativa do erro-padrão do valor estimado*

## 6 Resultados obtidos com a aplicação do método multi-critério proposto

A Tabela 11 apresenta a classificação para o índice único de *Qualidade Acústica de Igrejas* (QAI) com escala de 0 a 1, segundo a metodologia multi-critério preconizada neste estudo (Eq. 2), usando os valores reais dos parâmetros acústicos subjectivos avaliados *in situ*.

Tabela 11 – Classificação para a *Qualidade Acústica de Igrejas* (QAI) segundo a metodologia multi-critério, usando os valores medidos *in situ*.

| Nº Igreja      | QAI * | Nº Igreja          | QAI * | Nº Igreja         | QAI * |
|----------------|-------|--------------------|-------|-------------------|-------|
| 1 Bustêlo      | 0,82  | 6 Paço de Sousa    | 0,83  | 10 Rates          | 0,87  |
| 2 Cabeça Santa | 0,91  | 7 Sant. Sacramento | 0,79  | 11 Sé Porto       | 0,81  |
| 3 Clérigos     | 0,85  | 8 Cedofeita        | 0,84  | 12 Serra do Pilar | 0,68  |
| 4 Lapa         | 0,62  | 9 Ferreira         | 0,85  | 13 Tibães         | 0,79  |
| 5 Boavista     | 0,85  |                    |       |                   |       |

\* escala 0 a 1

Estabeleceu-se uma tabela de relação entre os valores calculados para a *Qualidade Acústica da Igreja* (QAI) e a interpretação que se deve fazer desta com base nos resultados atingidos (Tabela 12). Com base na escala de relação 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.

Tabela 12 – Tabela de conversão do valor de QAI numa escala subjectiva de interpretação do resultado obtido.

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

Como se prevê que este método multi-critério poderá ser 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 (cf. Eq. 3 a 15). Podem ser usadas duas abordagens para o cálculo dos valores para os atributos associados ao critério de avaliação  $c_2$  (referente à *música*):

- (A) em função dos parâmetros acústicos objectivos;
- (B) 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:

- (C) 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 *C* para o parâmetro *P80* com qualquer um dos outros dois modelos de previsão (*A* e *B*) para o cálculo dos parâmetros acústicos subjectivos referentes à avaliação da música. Existem assim 4 conjugações possíveis dos modelos de previsão para o cálculo de QAI. As combinações possíveis (denominadas de métodos de cálculo) estão dispostas na Tabela 13.

Tabela 13 – Combinações possíveis dos três modelos de previsão (*A*, *B* e *C*) para os parâmetros acústicos subjectivos para o cálculo de QAI segundo quatro métodos de cálculo (*I*, *II*, *III.A* e *III.B*).

| Métodos de cálculo<br>para o QAI | Modelos de Previsão             |                          |          |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------|
|                                  | <i>A</i>                        | <i>B</i>                 | <i>C</i> |
| <i>I</i>                         | P80<br>CLA, REV, INTM, DIR, EQT |                          |          |
| <i>II</i>                        | P80<br>CLA, REV, INTM, DIR, EQT |                          |          |
| <i>III.A</i>                     | CLA, REV, INTM, DIR, EQT        |                          | P80      |
| <i>III.B</i>                     |                                 | CLA, REV, INTM, DIR, EQT | P80      |

Tabela 14 – Classificação para a Qualidade Acústica de Igrejas (QAI) (0 a 1) segundo a metodologia multi-critério em função dos quatro métodos de cálculo para previsão.

| Igreja Nº | Método de cálculo                | <i>I</i> | <i>II</i> | <i>III.A</i> | <i>III.B</i> |
|-----------|----------------------------------|----------|-----------|--------------|--------------|
| 1         | Bustêlo - Penafiel               | 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         |

Os resultados de QAI calculados com valores determinados através dos modelos de previsão reflectem o comportamento descrito na Tabela 15. Constatam-se que os resultados para o método de cálculo *III.A* são os que apresentam maior semelhança com os resultados calculados utilizando os valores medidos *in situ* (Tabela 11) e que os métodos *II* e *III.B* 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.

Tabela 15 – 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                         | <i>I</i> | <i>II</i> | <i>III.A</i> | <i>III.B</i> |
|---|----------|-----------|--------------|--------------|
| $\Sigma$ (diferenças) face <i>in situ</i> | 0,40     | 0,61      | 0,27         | 0,44         |

*I* em função dos parâmetros acústicos objectivos;

*II* em função dos parâmetros arquitectónicos;

*III.A* 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*;

*III.B* 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*.

Verifica-se que as maiores diferenças entre os resultados para a QAI (Tabela 14) ocorrem para as igrejas da Sé do Porto e Serra do Pilar (n<sup>os</sup> 11 e 12) sendo estas as igrejas que possuem os maiores volumes. Isto sugere que o desempenho dos tipos de métodos de cálculo tende a ser mais díspar com o aumento do volume da igreja em análise.

Ao se analisar os resultados obtidos na QAI dum ponto de vista dos parâmetros arquitectónicos, não se pode desassociar a boa classificação da igreja de Cabeça Santa (QAI = 0,91) do facto de apresentar uma dimensão reduzida, comparativamente às outras igrejas em estudo (o menor volume). No entanto, não se verifica a tendência de que para menores volumes e/ou áreas ocorram melhores classificações. As igrejas da Lapa e da Serra do Pilar são as que apresentam os piores resultados e, 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 pois uma correspondência clara entre um parâmetro arquitectónico individual e a QAI.

## Referências

- [1] Lencastre, Margarida M. M. F. Q., (1998). *Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análises de Carácter Objectivo e Subjectivo*, Tese de Mestrado, FEUP.
- [2] Carvalho, António P. O., (1994). *Influence of architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*, Ph.D. dissertation, U. Florida.
- [3] Morgado, António E. J., (1996). *Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas através de Parâmetros Subjectivos*, Tese de Mestrado, FEUP.
- [4] Vincke, Philippe, (1992). *Multicriteria Decision-aid*. John Wiley & Sons, Chichester.
- [5] [www.fe.up.pt/~carvalho/igrejas.htm](http://www.fe.up.pt/~carvalho/igrejas.htm).