

IGREJAS MODERNAS COM PROBLEMAS ACÚSTICOS O CASO DA IGREJA NOSSA SENHORA DA CONCEIÇÃO (PORTO)

PACS: 43.55.Gx

António P. O. Carvalho e Marlene T. Cruz
Laboratório de Acústica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto
Portugal
Tel. +351.225081931
Fax +351.225081940
carvalho@fe.up.pt; ec09254@fe.up.pt

ABSTRACT

This paper presents the characterization of the N^a Sra. da Conceição church interior acoustics (Porto, Portugal). RASTI, background noise and RT were analyzed. This paper also presents a comparison with churches with similar volume and the identification of problems and some solutions for acoustic interventions in this church.

RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização acústica interior da Igreja N^a Sra. da Conceição (Porto, Portugal) aonde são analisados: Tempo de Reverberação (TR), RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) e ruído de fundo. É feita também uma comparação com igrejas de volumetria semelhante, identificação de problemas acústicos e apresentadas propostas de correcção.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Igreja de Nossa Senhora da Conceição

Este estudo caracteriza uma igreja com graves problemas acústicos, a Igreja de N^a Sra. da Conceição (Praça Marquês de Pombal, Porto, Portugal) através de medições *in situ* dos parâmetros: Tempo de Reverberação (TR), RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) e nível de pressão sonora do ruído de fundo. A igreja foi inaugurada em 1947 com projecto do arquitecto (e monge beneditino) francês Paul Bellot (Figs. 1 a 5). O interior da igreja é dividido em três naves separadas por duas séries de pilares de secção ortogonal que se ramificam dando origem a arcos (Figs. 2 e 3). O tecto é formado por nove abóbadas, no sentido longitudinal, separadas entre si por oito vigas do mesmo comprimento com recortes circulares côncavos (Figs. 2 e 3). As paredes são revestidas de mármore e frescos. Os bancos são em madeira, não almofadados, com encosto e sob o assento têm um equipamento de aquecimento (Fig. 4). O piso na zona dos bancos é em madeira e nas restantes zonas em mármore. A igreja não tem sistemas de climatização de ar. O sistema de reforço electroacústico é constituído por

dez altifalantes localizados nos pilares e dois perto do altar (Fig. 5). No Quadro 1 estão sintetizados os valores dos principais parâmetros arquitectónicos da igreja [1, 2].



Figuras 1 e 2 – Igreja Nª Sra. da Conceição (fachada principal e nave).



Figuras 3 e 4 – Igreja Nª Sra. da Conceição, Tecto (esq.) e Bancos (dir.).

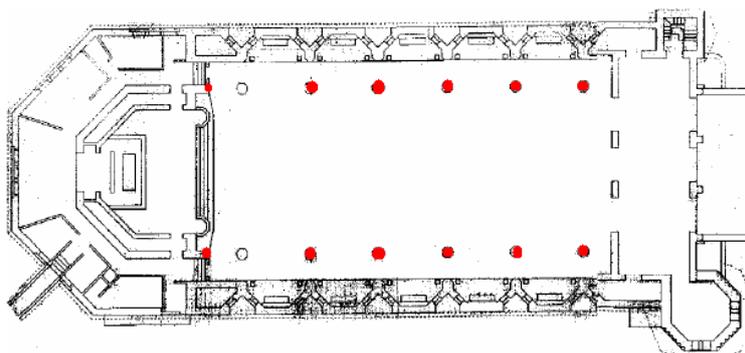


Figura 5 - Planta da igreja com locais onde estão colocados os altifalantes [adaptado de 2].

Quadro 1 – Principais parâmetros arquitectónicos da Igreja Nª Sra. da Conceição.

Denominação	Valor	Denominação	Valor
Volume total (m ³)	12532	Área da nave (m ²)	725
Área total (m ²)	1011	Comprimento da nave (m)	39,0
Comprimento máximo (m)	49,0	Altura da nave (m)	15,0
Altura máxima (m)	17,0	Largura da nave (m)	18,6
Largura média (m)	22,0	Número de lugares sentados	453
Volume da nave (m ³)	9065		

1.2. Objectivos para os Parâmetros Acústicos

O principal objectivo da Acústica numa igreja é conseguir uma boa percepção da palavra, obtendo também um ambiente sonoro tão bom para a música quanto a inteligibilidade da palavra o permita. Os valores do ruído de fundo devem revelar grande preocupação com o silêncio, pois a igreja é um local de oração e recolhimento pessoal. O parâmetro RASTI deve ter valores elevados e os valores do tempo de reverberação devem ser baixos, para haver uma boa percepção da palavra. Para isso os valores aconselháveis para os parâmetros acústicos para a Igreja N^a Sra. da Conceição seriam: LAeq ≤ 30 dB [3]; NR ≤ 30 [4]; NC ≤ 25 [5]; RASTI ≥ 0,50 e TR(500, 1k Hz) ≈ 1,5 a 2 s.

2. MEDIÇÕES

2.1. Método

As medições *in situ* foram realizadas em Março de 2011 com a igreja desocupada com um sonómetro 2260, fonte sonora 4224 e RASTI 3361 (tudo *B&K*). Os parâmetros acústicos analisados foram: TR por bandas de oitava; RASTI com e sem recurso ao sistema de reforço electroacústico existente na igreja; Nível de pressão sonora (Leq) e Nível sonoro contínuo equivalente (LAeq) do ruído de fundo.

2.2. Nível Sonoro do Ruído de Fundo

Os níveis de pressão sonora do ruído de fundo (do ruído exterior pois não existem equipamentos AVAC) foram obtidos por medições de 10 minutos, em dois pontos da igreja (Quadro 2). Os valores registados são baixos, ou seja, o ruído de fundo no interior da igreja é muito baixo. Para uma análise mais detalhada do nível de incomodidade na igreja recorreu-se às curvas de incomodidade *Noise Criteria* (NC) e *Noise Rating* (NR), embora o seu uso seja um pouco desajustado pois não existe sistema de condicionamento termo-higrotérmico nesta igreja. Verificou-se que o ruído de fundo sem equipamento AVAC apresenta um valor (NC19 e NR21) inferior ao máximo recomendado (NC ≤ 25 e NR ≤ 30). O facto da igreja cumprir as especificações para os NR, NC e LAeq é um bom indicador que o campo sonoro existente é propício ao recolhimento e oração.

Quadro 2 – Resultados obtidos para os níveis de pressão sonora do ruído de fundo.

Freq. (Hz)	Leq (dB)	LAeq (dB)	Freq. (Hz)	Leq (dB)	LAeq (dB)
31	45,8	5,8	1000	19,9	19,9
63	44,2	18,2	2000	19,2	20,2
125	33,3	17,9	4000	17,1	18,1
250	25,3	16,7	8000	15,7	14,7
500	21,1	18,1	Σ	48,3	27,3

2.3. RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*)

Nas medições do RASTI a fonte sonora (FS) foi colocada no altar e foram seleccionados seis pontos receptores na igreja (Fig. 6). Em cada ponto realizaram-se quatro leituras sendo realizada uma média aritmética dos valores. De forma a avaliar o sistema de reforço electroacústico realizaram-se medições com e sem este a funcionar.

Sem o sistema de reforço electroacústico a igreja apresenta valores de RASTI (0,31) que induz a um nível de inteligibilidade da palavra *mediocre* (Fig. 7). Verifica-se que conforme a distância à fonte sonora aumenta, a “inteligibilidade da palavra” diminui. O valor mais elevado ocorre na posição 2, uma vez que está mais próxima da fonte sonora.

Com o sistema de reforço electroacústico a igreja continua abaixo do adequado, obtendo apenas um RASTI médio de 0,39 (Fig. 7). As posições 3 e 5 apresentam os valores mais elevados do RASTI pois localizam-se perto dos altifalantes situados nos pilares. Relativamente

às restantes posições verifica-se uma ligeira perda, devido à sua distância em relação aos altifalantes.

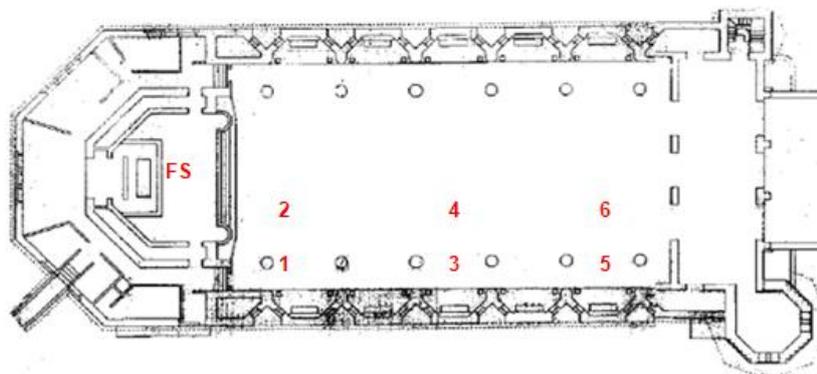


Figura 6 - Localização da fonte sonora (FS) e dos seis pontos de medição na igreja para avaliação do RASTI.

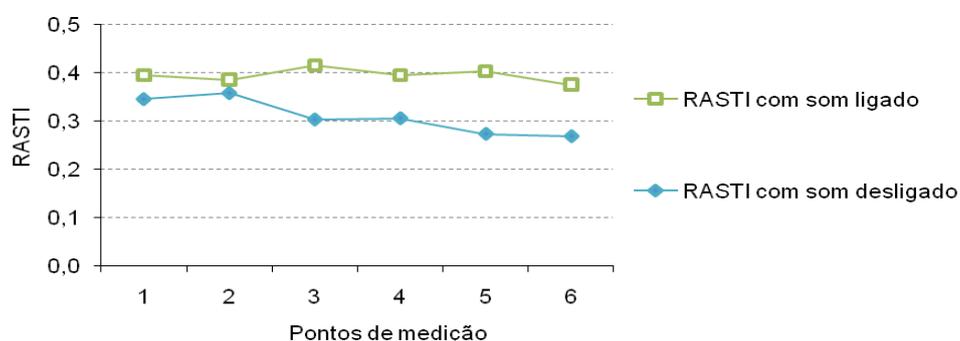


Figura 7 - Resultados médios obtidos nos ensaios de RASTI com e sem o uso do sistema de reforço electroacústico existente na igreja.

2.4. Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação foi medido na igreja por bandas de oitava entre os 125 Hz e os 4000 Hz. Foram seleccionados quatro pontos em metade da igreja visto esta ser simétrica (Fig. 8). Os resultados estão presentes na Fig. 9 com valores do tempo de reverberação mais baixos nas altas frequências (devido ao grande volume de ar). O grau de variabilidade dos valores por gama de frequência é muito baixo. Na Figura 9 pode-se verificar que o valor médio do TR é bastante superior ao TR máximo aconselhável (2 s).

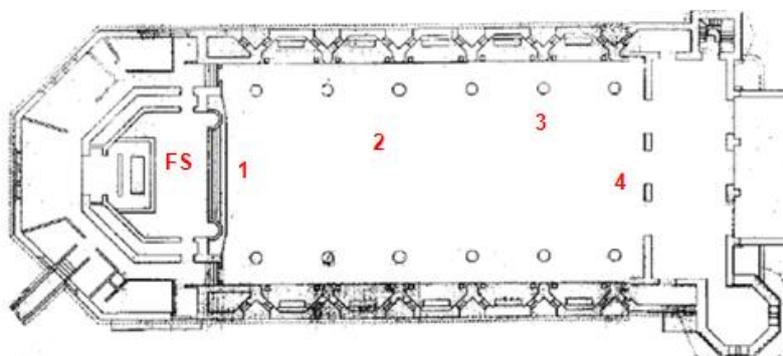


Figura 8 - Localização da fonte sonora (FS) e dos quatro pontos usados nas medições para avaliação do Tempo de Reverberação [2].

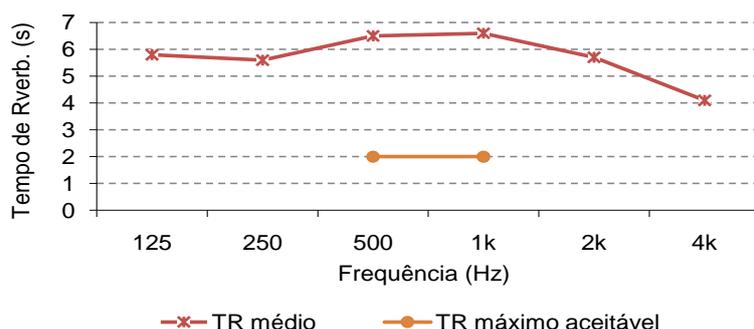


Figura 9 - Valores do Tempo de Reverberação medidos e máximo aceitável.

3. COMPARAÇÃO COM IGREJAS DE VOLUMETRIA SEMELHANTE

Para avaliar o comportamento acústico da Igreja N^a Sra. da Conceição em relação ao conjunto das igrejas portuguesas recorreu-se a um conjunto de valores medidos em outras igrejas com semelhante volumetria. No Quadro 3 estão presentes os valores dos parâmetros arquitectónicos principais da Igreja N^a Sra. da Conceição e das igrejas portuguesas com volumetria semelhante escolhidas para comparação (com $\pm 20\%$ do volume da Ig. N^a Sr^a da Conceição). Efectuou-se a comparação dos resultados obtidos na Igreja N^a Sra. da Conceição com outras igrejas portuguesas para o tempo de reverberação e RASTI (Figs. 10 e 11).

Quadro 3 - Valores dos parâmetros arquitectónicos principais da Igreja N^a Sra. da Conceição e das igrejas escolhidas para comparação.

Igrejas	Volume (m ³)	Altura máxima (m)	Área (m ²)
N ^a . Sra da Conceição (Porto)	12532	17,0	1011
Mosteiro de Grijó (Vila Nova de Gaia)	13818	21,5	722
Lapa (Porto)	11423	17,0	753
Mosteiro de Pombeiro (Felgueiras)	11380	18,0	882
S. Francisco (Porto)	12045	18,0	813
Sé (Braga)	13662	16,5	1300
Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia)	11566	35,1	591
Sé (Lamego)	13424	22,2	968
Sé (Silves)	10057	16,7	746
S. Roque (Lisboa)	14207	17,1	929
S. Lourenço - Convento dos Grilos (Porto)	14497	21,0	962

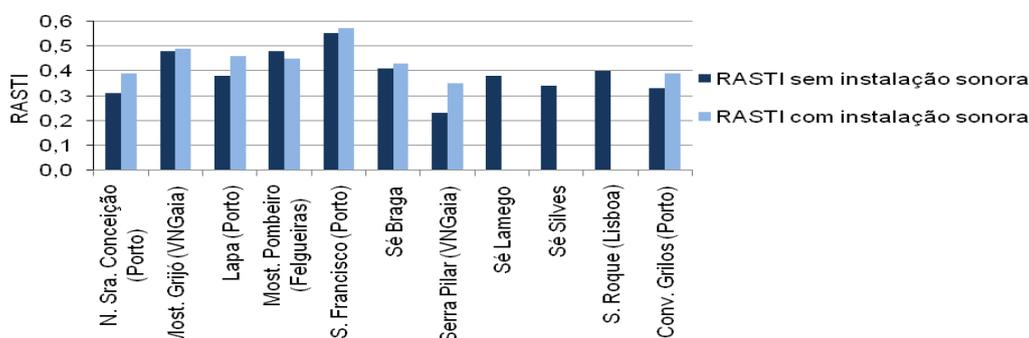


Figura 10 - Valores de RASTI médio com e sem instalação sonora da Igreja N^a Sra. da Conceição com outras igrejas de volumetria semelhante.

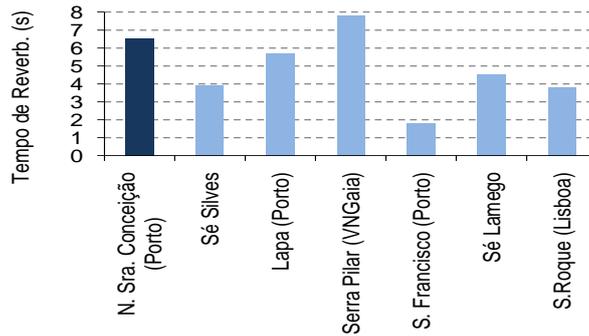


Figura 11 – Valores médios do Tempo de Reverberação (500, 1k Hz) da igreja N^a Sra. da Conceição com outras igrejas de volumetria semelhante.

Em relação ao RASTI existem duas situações (Fig. 10): com o sistema de som desligado e ligado. Para ambas as situações os valores na Igreja N^a Sra. da Conceição são dos mais baixos (e piores) do grupo. Com o uso do sistema de reforço electroacústico a quase totalidade das igrejas apresenta um valor de RASTI médio com instalação sonora melhor que sem o uso deste.

Relativamente aos valores médios do TR nas médias frequências a Igreja N^a Sra. da Conceição apresenta o segundo pior valor (Fig. 11).

Assim, a igreja N^a Sr^a da Conceição apresenta um comportamento acústico pior (RASTI e TR) que a quase totalidade das outras igrejas semelhantes confirmando que ela tem problemas acústicos graves.

4. INTERVENÇÕES ACÚSTICAS

4.1. Identificação de Problemas

O principal problema desta igreja são os elevados valores do TR causados pela geometria do espaço e pelos materiais utilizados (com coef. de absorção sonora baixos). Com isto, a inteligibilidade da palavra é afectada, como se pode confirmar através dos valores obtidos do RASTI (Fig. 10).

O ruído de fundo gerado pelo ambiente exterior é praticamente imperceptível, devido ao tipo de paredes, à quase inexistência de envidraçados e à localização topográfica da igreja. Como se verificou também nas curvas NC e NR, o ruído de fundo não é incómodo, respeitando sempre os valores limites máximos ideais. Assim, não há necessidade de tratamento desta situação.

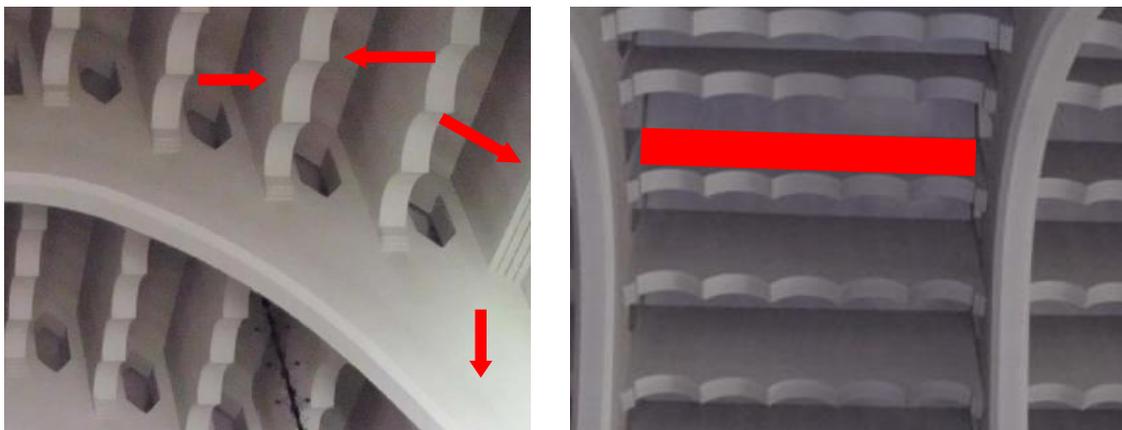
4.2 Sugestões de Intervenções

Como se pretende actuar unicamente no tecto e este é uma superfície com curvas e elementos salientes, as melhores soluções são materiais projectados que actuam de forma bastante eficaz nas frequências médias e altas. Testaram-se três soluções de celulose projectada: *SonaSpray (K13 standard; K13 special e SonaSpray fc)*, *SonaKrete* e *BASWAphon (Base, Fine e Classic* com granulometrias de 0,7 mm, 0,5 mm e 0,3 mm respectivamente) [6].

Com esses três tipos de soluções foi feita uma previsão aproximada dos valores do TR na igreja após a sua possível aplicação, admitindo que apenas o tecto da nave seria intervencionado e que a solução escolhida seria aplicada em 1574 m² (1100 m² das superfícies verticais - travessas, Fig. 12 - e 474 m² das zonas do fundo - tecto “profundo”, Fig. 13). Para a superfície inclinada (zonas do fundo) que é bastante protegida (“escondida”) entre travessas e os arcos, considerou-se, no cálculo acústico para o TR corrigido, somente 50% da área real aplicada devido ao efeito de barreira que as superfícies envolventes verticais (travessas) provocam, não permitindo uma grande exposição ao campo sonoro directo. Para as travessas verticais considerou-se 80% da área onde se aplicou o material absorvente pois embora

protegidas entre os arcos, apresentam-se mais expostas às ondas sonoras do que as zonas “fundas”.

No Quadro 4 e na Fig. 14 são apresentados os valores do TR para as quatro soluções mais satisfatórias. As soluções com espessuras superiores a 35 mm não foram consideradas pois “deformariam” a leitura visual das travessas verticais (Fig. 12) com cerca de 15 cm de espessura. Apresenta-se no Quadro 5 os custos por metro quadrado e o custo total, de aplicação de cada uma das soluções tipo (valores aproximados).



Figuras 12 e 13 - Tecto da igreja com localização das zonas verticais (esq.) e da zona funda (dir.) (tecto “profundo”) propostas para aplicação do material projectado de absorção sonora.

Quadro 4 – Tempo de Reverberação na Igreja N^a Sra. da Conceição sem correcção e valores previstos com aplicação (no tecto) das quatro mais adequadas soluções tipo.

Solução tipo	Espessura (mm)	TR previsto [500–1k Hz] (s)	Δ TR previsto [500–1k Hz] (s)
<i>Situação actual (sem correcção)</i>	-	6,6	-
<i>Tecto com SonaKrete</i>	19	1,7	4,9
<i>Tecto com K13 Special</i>	32	1,5	5,1
<i>Tecto com SonaSpray fc</i>	25	1,5	5,1
<i>Tecto com BASWAphon Classic</i>	30	1,7	4,9

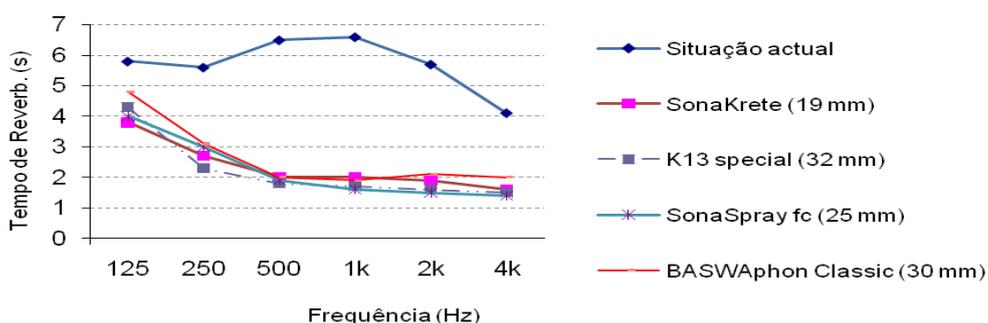


Figura 14 - Valores do Tempo de Reverberação medidos (situação actual) e previstos para a Igreja N^a Sra. da Conceição em função da solução tipo a aplicar.

Observa-se uma melhoria previsível, em todas as soluções, de cerca de 5 s para o valor médio de TR (500-1k Hz). No entanto, os valores nas baixas frequências são, em todas as soluções, elevados para a percepção da palavra. Os valores médios de TR obtidos são adequados para a música, não se afastando muito dos valores aceitáveis para a palavra. A solução mais económica (Quadro 5) é a solução tipo *K13 special* (32 mm), que tem um custo total de 55.000

€ e é a que apresenta os melhores valores de tempo de reverberação para todas as bandas. Comparando a solução *K13 special* de 32 mm com a solução *SonaSpray fc* de 25 mm, as diferenças em termos dos valores do Tempo de Reverberação não são muito significativas e o custo é muito elevado. Assim, das duas soluções *SonaSpray* a melhor opção é a solução tipo *K13 special* de 32 mm. Não é possível comparar directamente a solução *K13 special* com a do tipo *SonaKrete*, pois a sua espessura é bastante inferior e o valor médio do TR é superior em todas as bandas de frequência. A solução *BASWAphon* é a que apresenta maior custo financeiro e a sua grande vantagem é unicamente em termos estéticos, pois apresenta uma superfície muito lisa e uniforme. Deste modo, conclui-se que a solução tipo *K13 special* (32 mm) é a melhor opção pois pode ser explorada com bons resultados e resolveria a maior parte dos problemas existentes na Igreja N^a Sra. da Conceição.

Quadro 5 - Valores por metro quadrado e custo total das quatro soluções tipo.

Solução	Preço aprox. (€/m ²)	Custo Total aprox. (€)	Custo/ΔTR [500–1k Hz] (€/s)
<i>SonaKrete</i> (19 mm)	59	93.000	19.000
<i>K13 special</i> (32 mm)	35	55.000	10.800
<i>SonaSpray fc</i> (25 mm)	52	82.000	16.100
<i>BASWAphon Classic</i> (30 mm)	144	227.000	46.300

5. CONCLUSÕES

A Igreja N^a Sra. da Conceição apresenta um valor médio do TR (500, 1k Hz) bastante elevado (6,5 s) em relação ao valor máximo aconselhável (1,5 a 2 s) (Quadro 6).

Para o RASTI verificou-se que sem o sistema de reforço electroacústico ligado se obtinha uma inteligibilidade da palavra medíocre (0,31). Com o sistema de reforço electroacústico ligado o valor médio do RASTI na igreja aumentou ligeiramente, no entanto, a inteligibilidade da palavra continua a ser medíocre (0,39). Para o ruído de fundo obteve-se um nível sonoro baixo (27 dB(A)), um NC19 e NR21, inferior ao máximo aconselhável. O ruído de fundo é praticamente imperceptível no interior da igreja, tornando-o um local propício ao recolhimento e oração.

A Igreja N^a Sra. da Conceição apresenta um dos piores comportamentos acústicos (TR e RASTI) em relação às restantes igrejas portuguesas com volumetria semelhante.

O uso dum material absorvente sonoro projectado no tecto resolveria (por cerca de 55.000 €) a maior parte dos problemas acústicos existentes (atingindo previsivelmente um TR de cerca de 1,6 s).

Quadro 6 - Resumo de conclusões

Parâmetros	Valores medidos	Valores aconselháveis
Ruído de Fundo	LAeq (dB)	≤ 30
(devido ao ambiente exterior)	NC / NR	≤ 25 /30
RASTI médio	Sem instalação sonora	0,31
	Com instalação sonora	≥ 0,50
TR (igreja vazia) [500, 1k Hz] (s)	6,5	1,5 a 2 s

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://p-conceicao-porto.org> acedido em Maio de 2011.
- [2] Silva, T. E. Lopes. *Guião da Acústica de Igrejas em Portugal*. M.Sc., FEUP, 2008.
- [3] A. Carvalho e B. Nascimento. *A Acústica das capelas subterrâneas da nova igreja da Santíssima Trindade*, Fátima. Proceedings of the TECNIACÚSTICA 2010, Espanha.
- [4] www.fe.up.pt/~carvalho/igrejas.htm acedido em Maio de 2011.
- [5] William J. Cavanaugh. *Acoustics – General Principles* in Encyclopaedia of Architecture: design, Engineering & Construction, Joseph A. Wilkes, Ed., John Wiley & Sons, 1988.
- [6] Catálogo comercial - empresa S.T.I.E.R. <http://www.stier-acustica.com> acedido em Maio 2011.