



ANÁLISE DO ACOPLAMENTO ACÚSTICO NA CRIPTA DA CATEDRAL DE CÁDIS

Marta Fernández¹, Teófilo Zamarreño², Sara Girón², Antonio Pedrero¹

¹Grupo de Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, UPM, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, España

arquilav.arquitectura@upm.es

²Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC), Universidad de Sevilla. Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España.

teofilo@us.es, sgiiron@us.es

Resumo

A cripta da Catedral de Cádiz é um espaço arquitetónico que devido à sua forma peculiar, uma rotunda abobadada muito deprimida e um conjunto de galerias às quais se pode aceder a partir dela, apresenta um som complexo que é de interesse para análise. Uma das consequências desta complexidade volumétrica pode ser a aparência do fenómeno de acoplamento acústico. Realizou-se uma análise das curvas de decaimento de energia obtidas a partir das respostas ao impulso registadas *in situ*, para aquelas posições fonte-recetor que a priori são favoráveis para o desenvolvimento do fenómeno acústico referido.

Palavras-chave: acoplamento acústico, curvas decaimento energia.

The crypt of the Cathedral of Cádiz is an architectural space that, due to its peculiar shape, a rotunda with a deeply recessed vault and a set of galleries which can be accessed from said rotunda, presents complex acoustics whose analysis is of interest. One consequence of this volumetric complexity can be the appearance of the phenomenon of acoustic coupling. An analysis of the energy decay curves, obtained from the impulse responses recorded *in situ*, is conducted for those source-receiver positions favourable a priori to the occurrence of this acoustic phenomenon.

Keywords: acoustic coupling, energy decay curves.

PACS no. 43.55.Br

1 Introdução

O acoplamento acústico é um fenómeno que ocorre quando um único volume de ar é subdividido arquitetonicamente num ou mais subespaços, e consiste na transmissão de energia entre eles através das aberturas que os ligam. Quando uma fonte de som emite num dos volumes, a energia sonora que passa do local onde a fonte é colocada ao segundo recinto provoca uma alteração do campo sonoro de ambos recintos. Isto implica que as curvas de decaimento de energia de ambos espaços estejam caracterizadas pelas suas propriedades geométricas e acústicas e pela área da abertura de acoplamento. Existem inúmeros exemplos de espaços arquitetónicos formados por volumes acoplados, entre os quais as igrejas, onde as capelas laterais, naves, galerias e outros espaços como o presbitério ou o coro ficam ligados a volumes maiores. Nos projetos de salas de concerto, o acoplamento acústico é usado para fornecer um campo de som variável e controlar a reverberação e a claridade da sala [1].

O estudo experimental e teórico do acoplamento acústico entre recintos começou a ser investigado por Eyring [2,3]. Mais tarde, Cremer e Muller [4] estudaram mais detalhadamente a partir de uma análise estatística o fluxo de energia sonora entre dois recintos que estavam acoplados por uma superfície aberta ou quando a dita superfície tinha um coeficiente de transmissão menor do que 1, tal como portas, cortinas, etc. Posteriormente, Kuttruff [5] aprofundou a teoria do acoplamento acústico de três recintos acoplados em linha. A Catedral de St. Paul, em Londres e a Basílica de São Pedro em Roma são dois exemplos de locais de culto onde se manifesta o fenómeno de acoplamento acústico. Essa foi a conclusão que resultou das medições experimentais e do estudo teórico realizado nestes dois lugares por Anderson e Bratos-Anderson [6] e por Martellotta [7], respetivamente.

Neste trabalho analisam-se as curvas de decaimento de energia obtidas a partir das respostas ao impulso medidas *in situ* no interior da cripta da Catedral de Cádiz para diferentes posições de fonte e recetor, para comprovar o fenómeno de acoplamento acústico. Pretende-se verificar se a acústica complexa que apresenta um espaço arquitetónico com as características da cripta da Catedral de Cádiz, apresentando um conjunto de galerias ligadas a uma rotunda central, pode ser causada por acoplamento acústico entre uns espaços e outros.

1.1 Descrição da cripta

O recinto de estudo, a cripta da Catedral de Cádiz (Vicente Acero, 1722) situa-se debaixo do altar principal da catedral. É possível chegar até ela através de duas escadas gémeas edificadas de cada lado do altar principal da catedral, às quais se acede a partir da charola exterior. A cripta é formada por uma rotunda central à frente da qual existem cinco galerias, algumas interligadas, com uma capela no final de cada uma (ver Figuras 1 e 2).

A rotunda central tem uma abóbada com uma forma peculiar, pois é praticamente plana e tem entradas e respiradouros na periferia, de secção retangular, que dão origem a efeitos acústicos únicos (Figura 1). No que diz respeito às galerias, cabe ressaltar as suas coberturas planas e as capelas localizadas na extremidade de cada uma. A galeria central abriga uma capela de um volume ligeiramente maior do que o resto de galerias e uma das galerias laterais é um pouco diferente do resto, uma vez que está localizada a um nível mais baixo e está parcialmente revestida de chapa de aço preto [8]. O esquema da planta da Figura 2 mostra a complexidade geométrica do espaço que afeta o campo sonoro no seu interior.



Figura 1 – Vista interior de algumas galerias e da abóbada da rotunda central da cripta (esquerda);
Vista da galeria central (direita).

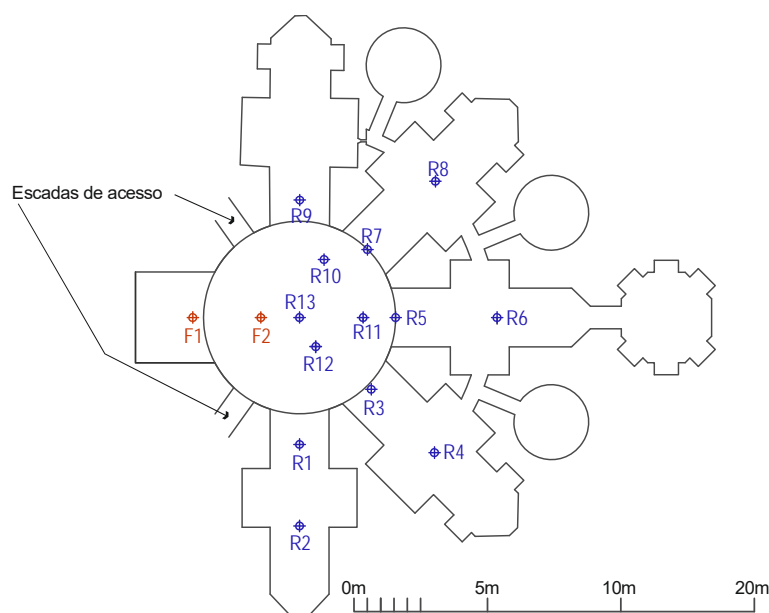


Figura 2 – Planta da cripta com as posições de fonte-recetor.

O material usado no recinto é principalmente a pedra ostra de Cádiz e a pedra cinzenta de Tarifa, colocada no chão. A existência destes materiais e a sua ornamentação, a geometria complexa das galerias, aberturas, escadas, abóbadas e cúpulas propiciam campos sonoros complexos que merecem ser estudados.

2 Método de medição e análise

Realizaram-se medições acústicas no interior da cripta, seguindo as diretrizes da UNE-EN ISO 3382-1: 2010 [9]. Para o efeito, foi escolhido o método da resposta impulsiva integrada. Como sinal de excitação do recinto foram utilizados varres exponenciais sinusoidais de 2,8 segundos de duração que foram emitidos por uma fonte omnidirecional (AVM DO-12, localizada a 1,5 m acima do chão). A duração da varredura escolhida garante que a relação sinal/ruído impulsiva seja superior a 45 dB para as bandas de frequência de interesse.

Foram utilizadas duas posições emissoras; F1, (posição do celebrante) no altar da rotunda, e F2 (posição de eventos culturais e musicais), localizada perto da entrada que dá acesso à rotunda central [8]. Por sua vez, foram distribuídas 13 posições de microfones (AT4050 Audio-Technica/CM5 localizado a 1,2 m acima do chão) entre a rotunda central e galerias (ver Figura 2). O *software* utilizado para a medição dos sinais acústicos foi EASERA. Para a obtenção dos tempos de reverberação, foi utilizado o *software* Dirac 6.0.

Posteriormente foram analisadas as curvas de decaimento de energia para cada uma das respostas impulsivas medidas dentro da cripta, a fim de estudar o seu grau de linearidade de acordo com os parâmetros definidos no Anexo B da norma UNE-EN ISO 3382-2: 2008 [10], C e ξ . O cálculo destes parâmetros foi realizado nas bandas de frequências média, entre 500 e 1000 Hz, uma vez que a obtenção de valores elevados em bandas de frequência baixa pode resultar de irregularidades próprias das curvas de decaimento de energia ou ressonâncias e mistura de modos próprios do recinto e não tanto do fenómeno de acoplamento acústico.



O parâmetro de curvatura, C , expressa o desvio percentual entre os tempos de reverberação T_{20} e T_{30} :

$$C = 100 \cdot \left(\frac{T_{30}}{T_{20}} - 1 \right) \quad [\%] \quad (1)$$

Valores de C entre 0% e 5% indicam linearidade na curva de decaimento, enquanto valores superiores a 10% indicam que a curva não se pode assemelhar a uma linha reta.

O parâmetro de não linearidade, ξ , expressa-se como:

$$\xi = 1000 \cdot (1 - r^2) \quad [\%] \quad (2)$$

sendo r o coeficiente de correlação linear entre a reta de melhor ajuste e a curva de decaimento de energia. Valores de ξ entre 0‰ e 5‰ denotam linearidade na curva de decaimento, enquanto valores acima de 10‰ indicam que a curva de decaimento está longe de se assemelhar a uma única linha reta.

A análise dos valores obtidos dos parâmetros C e ξ permite determinar se a curva de decaimento pode aproximar-se a uma única linha reta ou, se pelo contrário, há secções com diferentes taxas de decaimento. É por esta razão que foram calculados os parâmetros C e ξ das curvas de decaimento de energia para todas as configurações emissor-recetor da medição realizada dentro da cripta da Catedral de Cádiz.

Posteriormente, seleccionaram-se aquelas posições emissor-recetor que obtiveram valores altos de C e ξ . A Tabela 1 mostra os valores destes parâmetros das curvas de decaimento de energia seleccionadas para o estudo do acoplamento acústico, uma vez que os valores obtidos indicam que se pode tratar de curvas não lineares que poderiam aproximar-se a várias linhas retas. Note-se que a não linearidade é mais significativa para a posição F2 da fonte.

Tabela 1 – Valores de C e ξ_{T30} das posições fonte-recetor seleccionadas para o estudo do acoplamento acústico.

Posição fonte-recetor		F1R10	F1R11	F2R1	F2R2	F2R3	F2R4	F2R5	F2R6	F2R7	F2R8	F2R9
C [%]	500 Hz	63	74	66	51	74	55	45	34	39	43	48
	1 kHz	50	66	49	44	53	48	56	49	24	41	55
ξ [‰]	500 Hz	40	40	40	40	40	40	40	40	20	20	40
	1 kHz	20	40	20	20	20	20	40	20	20	20	40

O estudo das secções das várias curvas de decaimento permite estabelecer comparações entre os diferentes espaços para demonstrar a existência de acoplamento acústico. Para identificar as diferentes secções das curvas de decaimento de energia seleccionadas, levou-se a cabo um estudo sobre a evolução da inclinação de cada uma das linhas de regressão linear às quais se pode aproximar cada uma dessas secções.

Para estudar a inclinação, foi feita uma análise da evolução da mesma ao longo da curva de decaimento de energia em secções consecutivas de 50, 100 e 300 milissegundos. Na Figura 3 mostra-se a evolução do declive dum das curvas de decaimento de energia não-linear estudadas (F2R3) em diferentes intervalos de tempo empregados.

A partir da representação gráfica obtida referente à evolução da inclinação nas secções de diferentes intervalos de tempo, considerou-se que a análise em secções de 300 milissegundos é aquela que fornece mais informação sobre a visualização e evolução da inclinação. Intervalos mais curtos, de 50

ou 100 milissegundos revelam pequenas irregularidades das curvas que não fornecem informações para o caso de estudo.

Para o cálculo das inclinações, foi utilizada uma aplicação implantada anteriormente no *software* Matlab para estudar as curvas de decaimento não-lineares noutros espaços acoplados [11]. Foram acrescentadas alterações à aplicação de modo a fazer um estudo mais específico da inclinação das curvas de decaimento não-lineares.

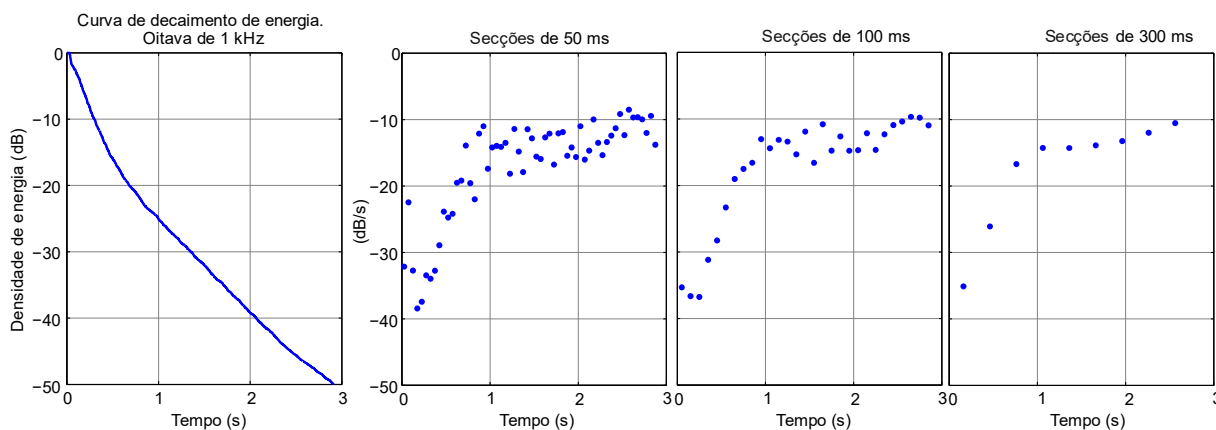


Figura 3 – Evolução do declive da curva de decaimento de energia da posição fonte-recetor F2R3 nas secções de 50, 100 e 300 milissegundos.

3 Resultados e discussão

Foram seleccionadas as curvas de decaimento não-lineares que apresentaram parâmetros de não linearidade C e ξ altos. A estas foi aplicada a análise da evolução da inclinação em secções consecutivas de 300 milissegundos revelando que existem mais de duas secções com inclinação diferente e, por conseguinte, que as curvas de energia se poderiam aproximar a mais de duas linhas retas. Isto reflete-se na Figura 4 que mostra as curvas de decaimento de energia e a evolução da inclinação para a banda de 1 kHz nas seguintes situações: quando o emissor está localizado no altar (F1) e os recetores na rotunda central (R10 e R11), e quando o emissor está localizado na rotunda central (F2) e os recetores nas galerias (R1, R7 e R9). Os resultados obtidos na banda de oitava de 500 Hz são qualitativamente semelhantes aos da banda de 1 kHz.

Nas cinco figuras apresentadas (Figura 4a-d) constata-se que os valores do declive revelam uma tendência ascendente durante o primeiro segundo de queda para todas as posições emissor-recetor, e a partir desse momento permanecem praticamente constantes, com uma ligeira variação na última parte da extinção.

Estimou-se a média dos valores do declive obtidos a partir de um segundo na banda de frequência de 1 kHz. Para os recetores localizados nas galerias obtiveram-se valores de inclinação na ordem de -13 dB/s, o que resultaria num tempo de reverberação de 4,7 s. Para os recetores localizados na rotunda central obtiveram-se valores médios de inclinação de -12 dB/s, o que implicaria um tempo de reverberação de cerca de 5 segundos. A partir dos resultados conclui-se que ambos os espaços, tanto a rotunda como as galerias tendem a comportar-se de forma semelhante na parte final do decaimento de energia sonora, ao passo que no início do decaimento tornam-se mais importantes as características acústicas próprias da rotunda central ou das galerias.

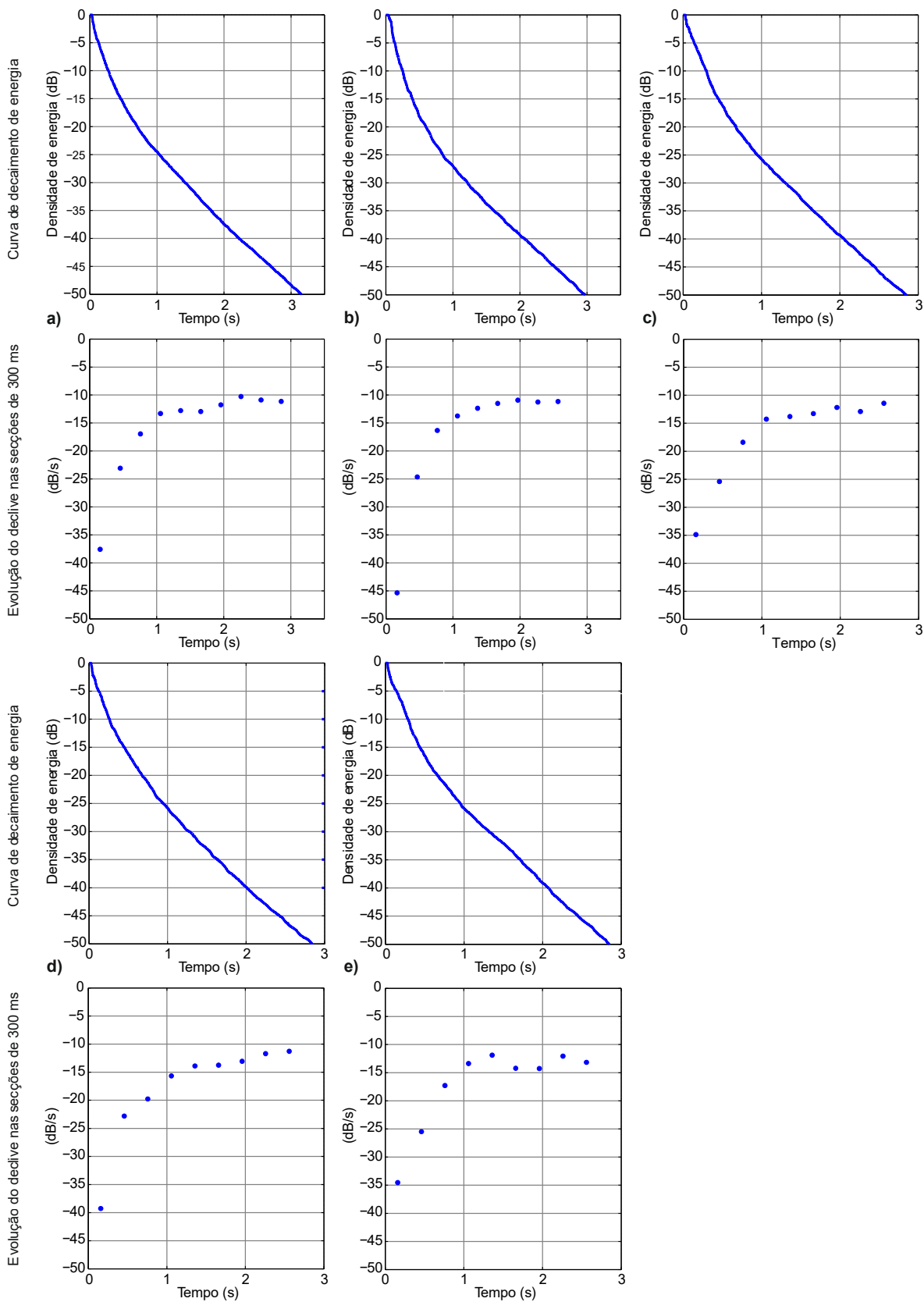


Figura 4 – Curvas de decaimento energético e evolução do declive da curva de decaimento a 1 kHz das posições: (a) F1R10; (b) F1R11; (c) F2R1; (d) F2R7; e (e) F2R9.

O facto de termos valores semelhantes de pendente no final da curva de decaimento de energia indica a existência do fenómeno do acoplamento acústico da energia sonora que vem da catedral mediante uma troca, através de aberturas e escadas de acesso ao espaço, entre a energia que vem da rotunda central e aquela que procede das suas galerias adjacentes. Para servir de comparação, uma curva de decaimento quando não aparece acoplamento acústico (apenas uma pendente de queda), na Figura 5 mostra-se a curva de decaimento de energia e a evolução do declive da curva num ponto quando o emissor e o recetor estão na Catedral.

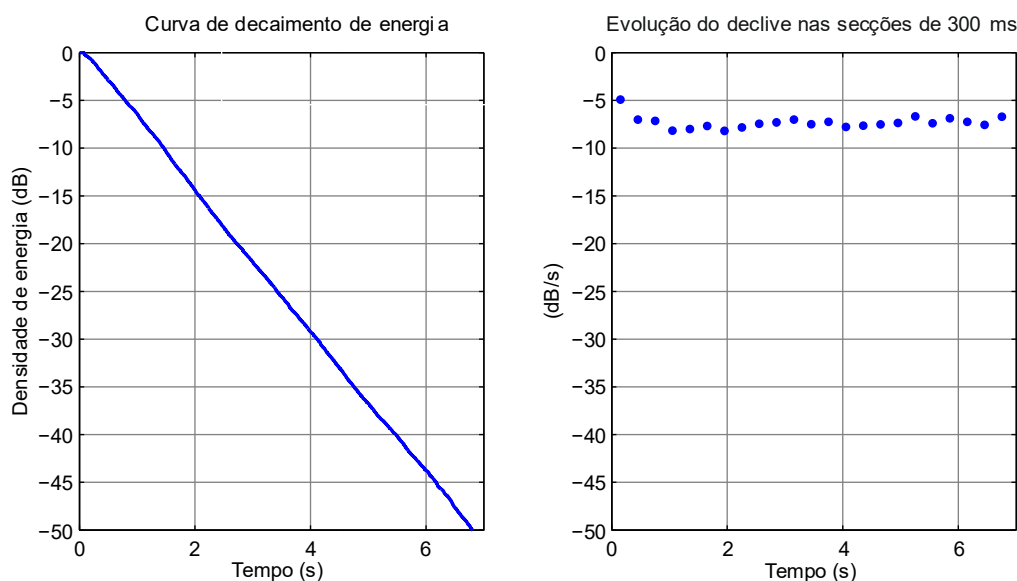


Figura 5 – Curva de decaimento de energia e evolução da inclinação da curva de decaimento de energia, para a oitava de 1 kHz, numa posição emissor-recetor na Catedral de Cádiz.

A fim de estudar o comportamento acústico dentro de cada uma das galerias, em primeiro lugar foi feita uma comparação entre as curvas de decaimento de energia dos recetores localizados numa mesma galeria, um deles mais distante da rotunda central da cripta e o outro localizado mais perto do perímetro da mesma. A posição de emissor utilizada para a comparação é a que está situada na rotunda central (F2).

Para todas as galerias, observa-se que os recetores localizados perto da rotunda central têm, no início da curva, uma pendente ligeiramente menor do que os recetores localizados ao fundo de cada galeria. Na parte final das curvas e para ambos os recetores, tendem a igualar-se as pendentes da curva de decaimento. Isto significa que os recetores localizados perto do perímetro da rotunda central estão mais condicionados, no início da curva de decaimento de energia, pelo comportamento acústico de tal rotunda e do resto de galerias, adaptando-se ao longo do decaimento às características acústicas da própria galeria onde estão localizados. A seguir, mostram-se os casos de duas galerias para observar o fenómeno comentado (Ver Figuras 6 e 7).

Para estudar se existem diferenças no comportamento acústico em diferentes galerias, em segundo lugar foram comparadas as curvas de decaimento de energia para os recetores de todas as galerias perto do perímetro da rotunda, e por outro lado as curvas de decaimento da energia para os recetores localizados dentro de cada galeria (ver Figuras 8 e 9).

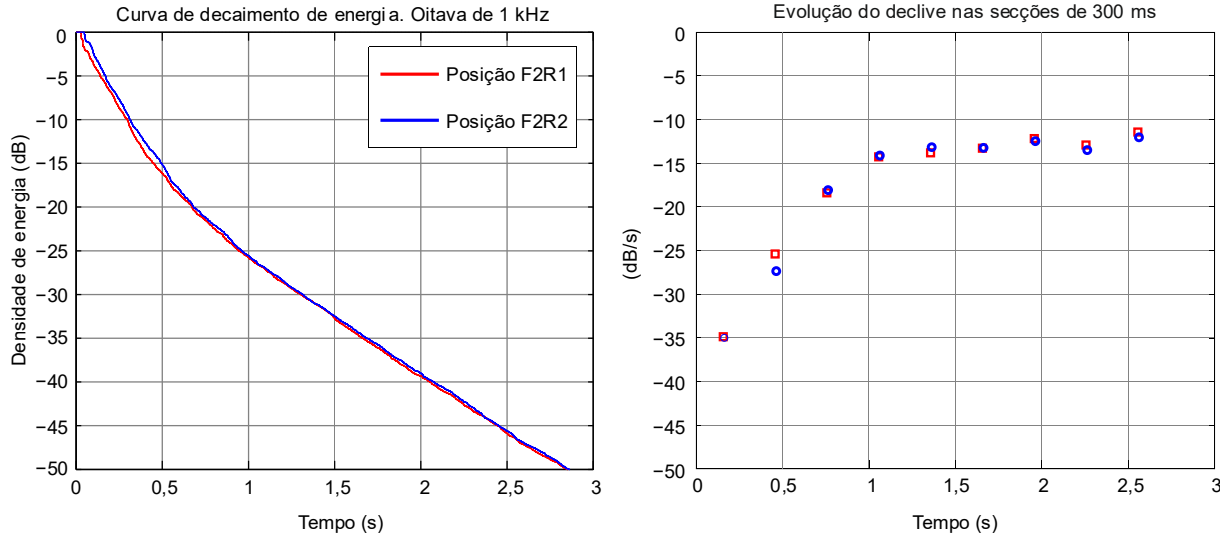


Figura 6 – Comparação das curvas de decaimento da energia e evolução da inclinação das posições F2R1 e F2R2.

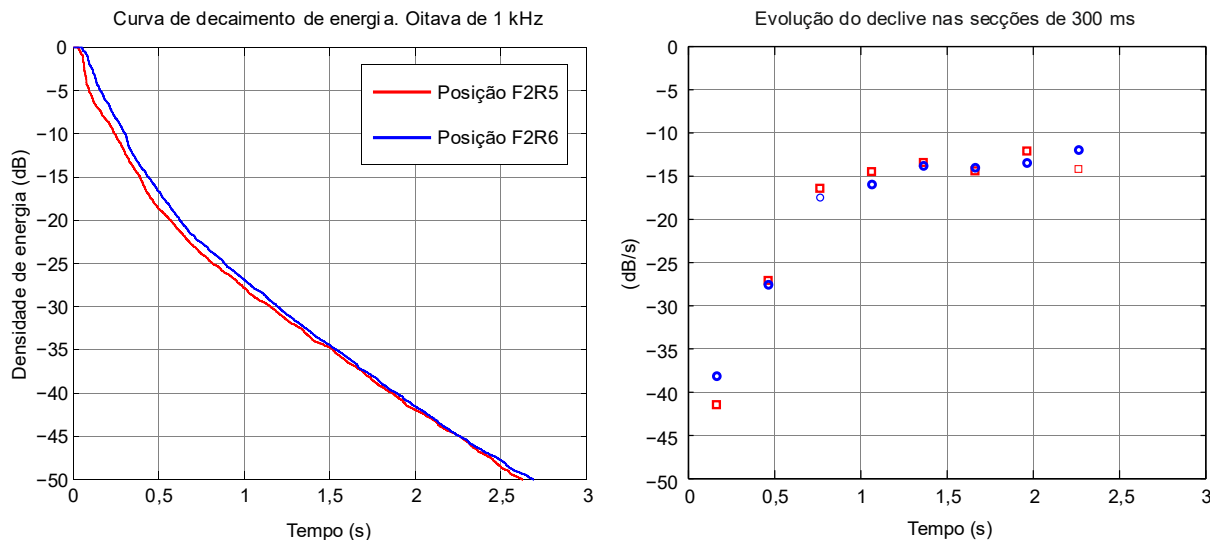


Figura 7 – Comparação das curvas de decaimento de energia e evolução do declive das posições F2R5 e F2R6.

Da comparação dos recetores localizados no início das galerias (Figura 8), conclui-se que há uma galeria que tem um comportamento acústico diferente no início da curva de decaimento de energia. Trata-se da galeria onde estão os recetores R5 e R6 (galeria central que está ligada em ambos os lados com as galerias adjacentes), onde se pode ver uma inclinação inicial mais acentuada do que nos outros recetores localizados noutras galerias. Pelo contrário, a inclinação da parte final de todas as curvas de decaimento de energia tendem a igualar-se. Embora se possa observar nalguma curva um nível de pressão sonora mais baixo do que o resto, na parte final da curva a tendência é paralela à evolução das restantes curvas, e isso indica que o declive é o mesmo.

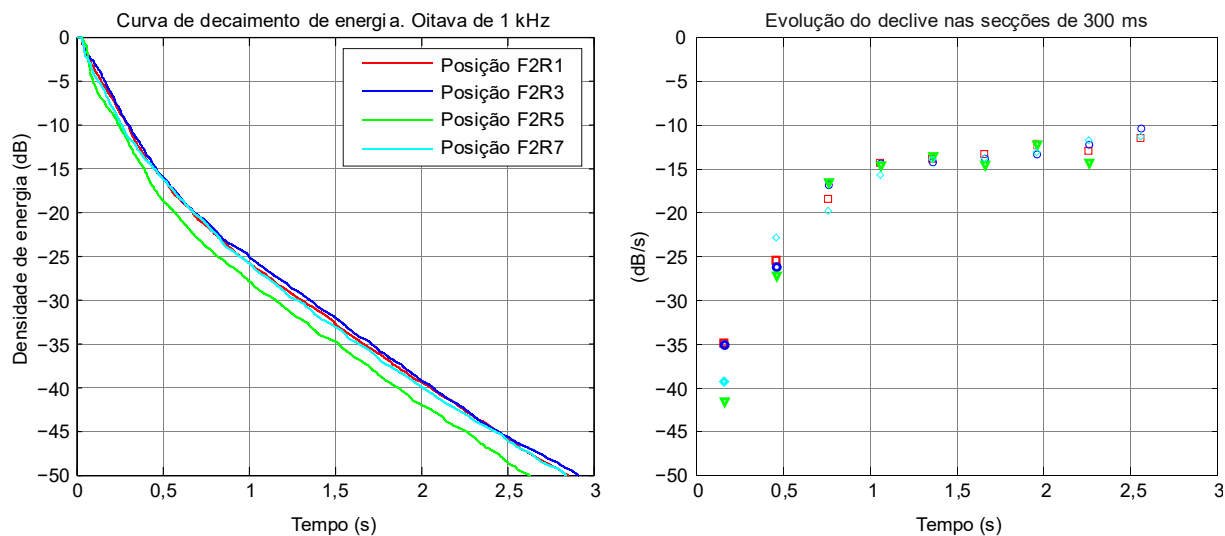


Figura 8 – Comparação das curvas de decaimento de energia e evolução do declive das posições F2R1, F2R3, F2R5 e F2R7 (recetores situados perto do perímetro da rotunda).

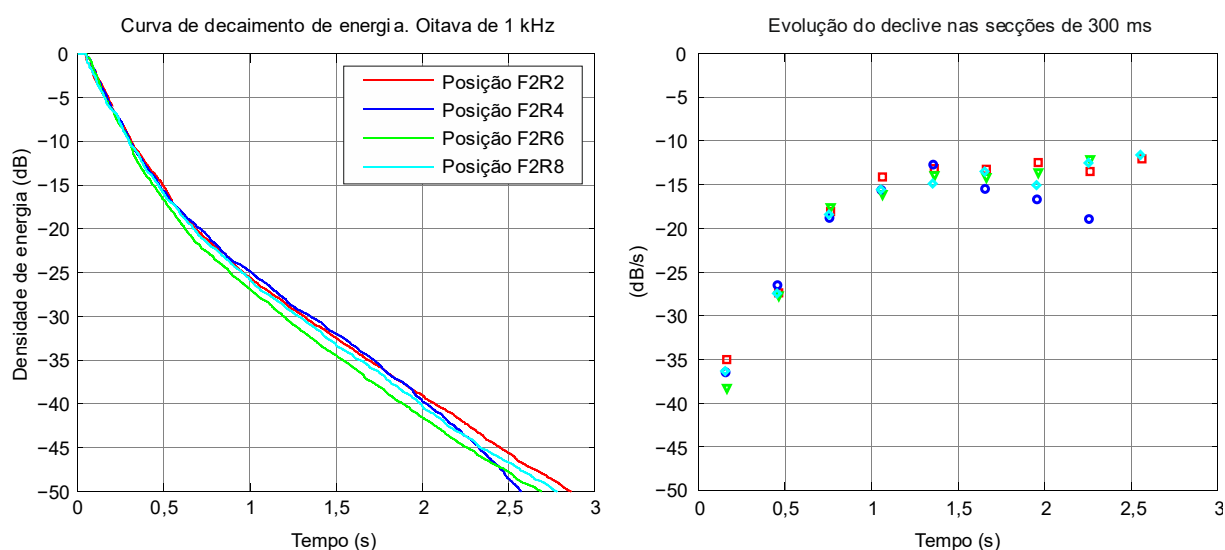


Figura 9 – Comparação das curvas de decaimento de energia e evolução do declive das posições F2R2, F2R4, F2R6 e F2R8 (recetores situados no interior das galerias).

No entanto, quando os recetores localizados ao fundo das galerias são comparados (Figura 9), nota-se que o comportamento acústico é semelhante no início das curvas de decaimento de energia, enquanto na parte final de atenuação de energia são observadas diferenças consoante a galeria em que o recetor estiver situado.

4 Conclusões

A análise das curvas de decaimento de energia obtidas a partir de medições feitas na cripta da Catedral de Cádiz provam a existência do fenómeno do acoplamento acústico. Como vimos a partir do estudo



da evolução da inclinação das curvas, trata-se de um acoplamento múltiplo entre dois ou mais espaços, o que se manifesta na não linearidade das curvas de decaimento da energia sonora, podendo aproximar-se a mais de duas linhas retas na maioria das curvas estudadas. Por outro lado, as áreas das galerias próximas ao perímetro da rotunda central apresentam um comportamento acústico semelhante na parte final das curvas de decaimento de energia e diferem no início das mesmas, ao passo que no interior de cada galeria o comportamento acústico apresenta diferenças no final do decaimento de energia.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projeto I&D concedido pelo Ministério Espanhol de Economia e Competitividade, com referência BIA2014-56755-P.

Referências

- [1] Ermann, M. Coupled volumes: Aperture size and the double-sloped decay of concert halls. *Journal of Building Acoustics*, Vol 12(1), 2005, pp 1-14.
- [2] Eyring, C. F. Condition under which residual sound in reverberant rooms may have more than one rate of decay. *Journal of Society of Motion Picture Engineers*, Vol 15, 1930, 528-549.
- [3] Eyring C. F. Reverberation time measurements in coupled rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 3, 1931, 181-206.
- [4] Cremer, L.; Muller, H. A. *Principles and Applications of Rooms Acoustics* Vol 1. Applied Science Publisher, New York (USA), 1st edition, 1982.
- [5] Kuttruff, H. *Rooms Acoustics*, Spon Press, Abingdon (United Kingdom), 5th edition, 2009.
- [6] Anderson, J. S.; Bratos-Anderson, M. Acoustic coupling effects in St. Paul's Cathedral, London. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 236, 2000, pp 209-225.
- [7] Martellota, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 126, 2009, pp 1175-1186.
- [8] Colomo-Gragera, A.; Espinosa-Corbellini, D.; Zamarreño-García, T.; Girón-Borrero, S. Acústica de la cripta de la Catedral de Cádiz. VIII Congreso Ibero-americano de Acústica, Évora, Portugal, October 1-3, 2012, In CD-ROM.
- [9] AENOR, UNE-EN ISO 3382-1:2010 *Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos*.
- [10] AENOR, UNE-EN ISO 3382-2:2008 *Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios*.
- [11] Fernández, M.; Peiró, A.; Ruiz, R.; Pedrero, A.; Díaz, C. Estudio del acoplamiento acústico en la catedral de Toledo a partir de medidas experimentales. *TecniAcustica 2013 44º Congreso Español de Acústica*, Valladolid, Spain, October 2-4, 2013, pp 885-892, In CD-ROM.