

La extensión y clasificación de un modelo energético para predecir parámetros acústicos en iglesias.



U. Berardi, E. Cirillo, and F. Martellotta
DAU – Politecnico di Bari, via Orabona 4, 70125 Bari, Italy
u.berardi@virgilio.it

Premio Andrés Lara para jóvenes investigadores, VI Edición Coimbra 2008

PACS: 43.55.Br

Resumen

Este artículo propone la aplicación de un modelo energético, comprobado en iglesias españolas, a un grupo diferente y más amplio. Su simplicidad permite una predicción rápida de cada uno de los parámetros energéticos, cuando el parámetro μ es conocido. En la generalización del modelo se han utilizado los resultados de las medidas acústicas realizadas en más de treinta iglesias italianas. La predicción semiempírica del parámetro claridad es el método utilizado para calcular los diferentes valores de μ . El estudio investiga en gran detalle como la energía acústica varía dentro de las iglesias. De hecho, capillas, columnas, techos y bóvedas dispersan las reflexiones, de modo que, a medida que la complejidad de la iglesia aumenta, las primeras reflexiones son más débiles. Se observa que esta reducción es más grande en iglesias italianas que en iglesias gótico-mudejar en Sevilla, mostrando la necesidad de clasificar diferentes valores del coeficiente μ . Los datos experimentales de varios parámetros energéticos (claridad, definición y energía) se muestran cercanos a los valores previamente calculados mediante el parámetro μ . La clasificación propuesta permite un amplio uso del modelo para iglesias de distintas tipologías.

Abstract

The paper describes the application of an energy model, already tested on Spanish churches, to a different and larger group. Its simplicity allows fast prediction of every energy

parameter, provided that its corrective parameter μ is known. The results of an acoustic survey carried out in more than thirty Italian churches are used in order to try to generalize the model. Different values of the μ -parameter are calculated by means of a semiempirical prediction of clarity. The study investigates in greater detail how the acoustic energy varies inside the churches. In fact, chapels, columns, trussed roofs or vaults scatter the reflections, resulting in weaker early reflections as the complexity of the church grows. The reduction observed is greater in large Italian churches than in small mudejar-gothic churches in Seville, showing the need to classify different values of the μ -parameter. Predicted values of some energy parameters calculated according to μ values show good agreement with experimental data. The proposed classification suggests a wider use of the model for churches of different typologies.

1. Introducción

El interés acerca del estudio de campos sonoros en lugares de culto, ha experimentado un gran aumento en diferentes países en el ámbito de la acústica arquitectónica. Este interés tiene una utilidad práctica, y está conectada con la creciente demanda de calidad acústica en espacios públicos. Las iglesias representan lugares particulares debido a la coexistencia de la palabra y música tanto para fines litúrgicos como de pública utilidad. Además los estudios sobre la acústica de estos lugares complejos y heterogéneos resultan útiles en la comprensión global de la acústica arquitectónica [1].

Uno de los temas más importantes en la investigación de acústica es el análisis y la interpretación de la propagación de energía en el espacio. Previos estudios en iglesias muestran la complejidad de estos espacios, donde elementos arquitectónicos, tales como capillas, columnas, techos y bóvedas suponen una dispersión de la energía sonora, y consecuentemente, un retardo en el inicio de la caída exponencial de la energía [2,3], posiblemente relacionado con condiciones asimétricas de absorción [4]. En los últimos diez años se han propuesto diferentes modelos para interpretar la caída energética en iglesias. Un modelo semiempírico ha sido propuesto por Sendra et al. [5,6] de acuerdo con una regresión de los datos obtenidos en iglesias gótico-mudejar. Cirillo et al. [7] ha propuesto un modelo diferente, originariamente concebido para iglesias románicas, y recientemente extendido satisfactoriamente hacia diferentes tipos de iglesias [8].

Este artículo nace de la publicación de un nuevo modelo por Zamarréño et al [9]. Esta última formulación es más simple que las anteriores, y ha sido probada únicamente en algunas iglesias de estilo gótico-mudejar en Sevilla [10]. Con el fin de generalizar su uso, se requiere su aplicación en una muestra más amplia. Este artículo en particular está enfocado a la investigación de valores del coeficiente μ , tratando de definir reglas para su determinación en diferentes condiciones.

2. Resumen del modelo μ

El primer modelo que ha previsto relaciones matemáticas para predecir variaciones de parámetros acústicos fue propuesto por Barron and Lee [11]. Éstos asumieron que las reflexiones no pueden llegar antes que el sonido directo. Sendra et al. encontraron algunos problemas utilizando este modelo en iglesias, y hace diez años produjeron un modelo alternativo conocido como modelo β [5,6]. Este último reducía la energía tanto de las primeras reflexiones como de las últimas proporcionalmente al coeficiente β . Este tratamiento uniforme de las distintas partes de la energía mejoró la precisión en la previsión de fuerza (G) pero no de claridad (C80). Zamarréño et al. [9] propusieron entonces un nuevo modelo en el que las correcciones se aplican mediante el uso del coeficiente μ sólo a las primeras reflexiones (desde 0 a 80m). Esta asunción llevada a cabo para acercar los valores medidos a los previstos, produce una discontinuidad (un escalón en la pérdida de energía). Los autores justifican esta discontinuidad de acuerdo con la naturaleza discreta de las primeras reflexiones de modo que no es necesario estimar una ley continua.

El modelo μ requiere una regresión en los valores medidos de claridad, para minimizar los errores entre la estimación y predicción, maximizando la correlación. La regresión se realiza sobre este parámetro, y no sobre otros parámetros energéticos, debido a que la claridad muestra las variaciones más amplias dentro de un recinto, causadas por el límite de integración establecido en 80m. Las expresiones resultantes

para calcular la fuerza del sonido, la claridad y el tiempo baricéntrico de acuerdo con este modelo son las siguientes:

$$G_{\mu}(r) = 10 \log(d + e_{\mu} + I_B) = 10 \log \left[\frac{100}{r^2} + 31200 \frac{T}{V} \left[e^{-\frac{r}{80}} + e^{-\frac{111}{V}} \left(e^{-\frac{300}{V}} - e^{-\frac{r}{80}} \right) \right] \right] \quad (1)$$

$$C_{80,\mu}(r) = 10 \log \left(\frac{d + e_{\mu}}{I_B} \right)_{r=0,80} = 10 \log \left[\frac{100 + 31200 \frac{T}{V} \cdot e^{-\frac{r}{80}} (1 - e^{-111/V})}{31200 \frac{T}{V} \cdot e^{-\frac{111+300r}{V}}} \right] \quad (2)$$

$$T_{\mu}(r) = \frac{\int_0^{80} t \cdot g_{\mu}(t, r) dt + \int_{80}^{\infty} t \cdot g_{\mu}(t, r) dt}{d + e_{\mu} + I_B} \quad (3)$$

donde d , e_{μ} , I_B son la energía del sonido directo, de las primeras y de las últimas reflexiones respectivamente, r es la distancia entre la fuente y el receptor, T el tiempo de reverberación, V el volumen y g_{μ} es la densidad de energía. Como se puede observar, el volumen, el tiempo de reverberación y el valor del coeficiente μ son necesarios para calcular cada uno de los parámetros energéticos en un recinto.

Los autores del modelo μ han expresado el deseo de generalizar esta metodología de manera que pueda ser aplicada a un amplio rango de tipologías arquitectónicas, proporcionando al mismo tiempo algunos valores de μ capaces de predecir parámetros acústico-energéticos a partir de geometría básica y datos acústicos. Este es el objetivo principal de este artículo. Como se puede observar en la figura 1, utilizando diferentes valores de μ se llega a variaciones más grandes en claridad que en fuerza. En particular se puede observar que por encima de 0.35 no existen variaciones significativas en ninguno de los dos parámetros.

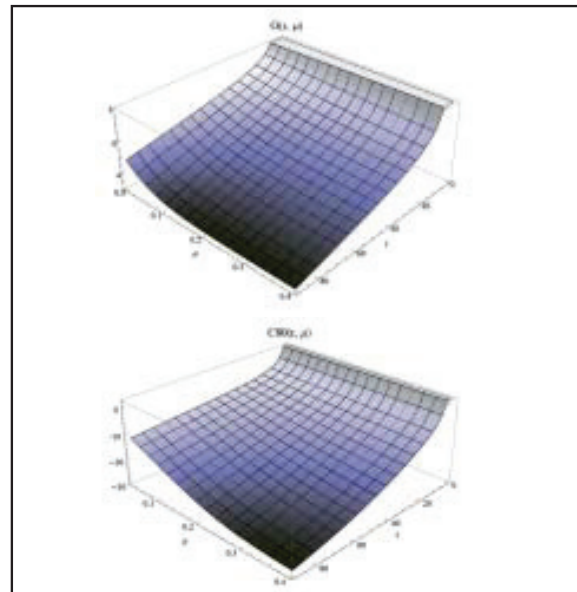


Figura 1- Superficies de fuerza (izquierda) y claridad (derecha) de acuerdo con el modelo μ como función de la distancia y del valor de μ . Recinto con volumen de 3000 m³ y tiempo de reverberación de 5s.

3. Aplicación del modelo

3.1 Técnica de medida

Las medidas fueron desarrolladas usando una fuente omnidireccional de forma dodecaédrica hecha de 12 altavoces de 120mm, con respuesta plana hasta 16kHz, junta a un subwoofer para cubrir las bajas frecuencias, desde 40 hasta 100Hz. Para medir los niveles de presión sonora se realizaron una serie de medidas obtenidas con un micrófono omnidireccional GRAS 40-AR junto al sistema 01dB Symphonie. Se utilizó una señal MLS en la calibración de la respuesta al impulso para calcular los valores de fuerza. Los otros parámetros acústicos se obtuvieron utilizando una respuesta al impulso de alta calidad por medio de un micrófono Soundfield Mk-V, una tarjeta de audio “Echo Audio Layla-24”, y utilizando un barrido en frecuencias de envolvente constante para excitar el recinto. En cada iglesia se eligieron al menos dos posiciones para la fuente, una en el eje de simetría y la otra fuera del eje, ambas situadas a una altura de 1.5m. Se utilizó una media de 11 posiciones para el receptor. En el caso de iglesias muy amplias y simétricas las medidas

fueron realizadas en una sola de las mitades. Cuando las iglesias no eran simétricas los puntos de medida fueron uniformemente distribuidos por toda la superficie del suelo. Los micrófonos fueron situados a una altura de 1.2m. Todas las medidas y cálculos de los índices fueron realizados de acuerdo con la normativa ISO-3382 [12]. Para la medida de la fuerza sonora, la potencia de la fuente fue calibrada en una cámara reverberante, utilizando el mismo procedimiento y la misma configuración que in situ.

3.2 Iglesias analizadas

Se realizaron exhaustivos ensayos acústicos en 32 iglesias italianas elegidas de manera que se utilizaran diferentes tipologías de edificios de acuerdo con la antigüedad, el estilo, las dimensiones, el volumen y la terminación interior. El alto número de iglesias objeto de estudio no permite una descripción precisa de todas y cada una de sus características arquitectónicas y acústicas en este artículo. Estos detalles se pueden encontrar en [13]. La tabla 1 contiene únicamente los principales datos geométricos de las iglesias. Los correspondientes planos se muestran en las figuras 2a-2b.

Tabla 1 – Principales datos geométricos de las treinta y una iglesias evaluadas.

Iglesias	Periodo	Estilo	Volumen (m ³)	Area total (m ²)	Area suelo (m ²)	Longitud (m)
S. Paolo Fuori Mura, Roma	383	Principio crist.	130000	33650	7500	130
Sta. Maria Maggiore, Roma	410	Principio crist.	39000	12000	2100	80
Sta. Sabina Basilica, Roma	432	Principio crist.	17500	6000	1290	52
Sta. Apollinare in Classe, Ravenna	549	Principio crist.	22500	7200	1450	57
Catedral Modena	1099	Romanico	20000	8000	1300	62
Catedral Trani	1099	Romanico	21500	8360	950	50
Catedral Bari	1099	Romanico	30100	9500	1260	50
SS. Sepolcro, Barletta	1178	Romanico	7700	4050	815	49
Basilica S. Nicola, Bari	1197	Romanico	32000	10500	1570	59
S. Ambrogio, Milano	1197	Romanico	23000	10200	1650	67
Abazia, Chiaravalle	1136	Gótico	12500	7500	1250	59
Abazia, Fossanova	1173	Gótico	17000	1000	1330	69
Catedral Barletta	1262	Gótico	16000	6000	912	46
Duomo de Orvieto	1290	Gótico	78000	15000	2770	90
Catedral Lucera	1301	Gótico	33100	10500	1700	64
Basilica S. Petronio, Bologna	1390	Gótico	160000	42000	7000	130
Basilica Laurenziana, Firenze	1419	Renacentista	39000	18000	2750	83
Santo Spirito, Firenze	1446	Renacentista	55000	19000	2900	94
Catedral Gravina	1452	Renacentista	10500	4900	850	47
S. Andrea, Mantova	1472	Renacentista	78000	19000	2500	100
Iglesia Sacro cuore Jesus, Roma	1568	Renacentista	39000	13000	1450	68
S. Luca y Martina, Roma	1664	Barroco	8700	5500	450	30
Sat. Agnese in Agone	1672	Barroco	14000	5300	500	28
San Lorenzo, Torino	1680	Barroco	12000	4500	550	34
Basilica Superga, Torino	1731	Barroco	22000	8000	650	46
Catedral Giovinazzo	1747	Barroco	7900	3800	700	41
Basilica S. Martin, Martina Franca	1763	Barroco	16400	6500	830	45
Iglesia de Carmine, Bari	1964	Modernismo	9700	3000	760	46
Concatedral, Taranto	1970	Modernismo	9000	6200	1300	58
S. Maria Assunta, Riola	1978	Modernismo	5500	3700	650	34
Dives in Misericordia, Roma	2003	Modernismo	10500	4800	580	27
Iglesia de Padre Pio, San Giovanni Rot	2004	Modernismo	50000	15600	4300	56

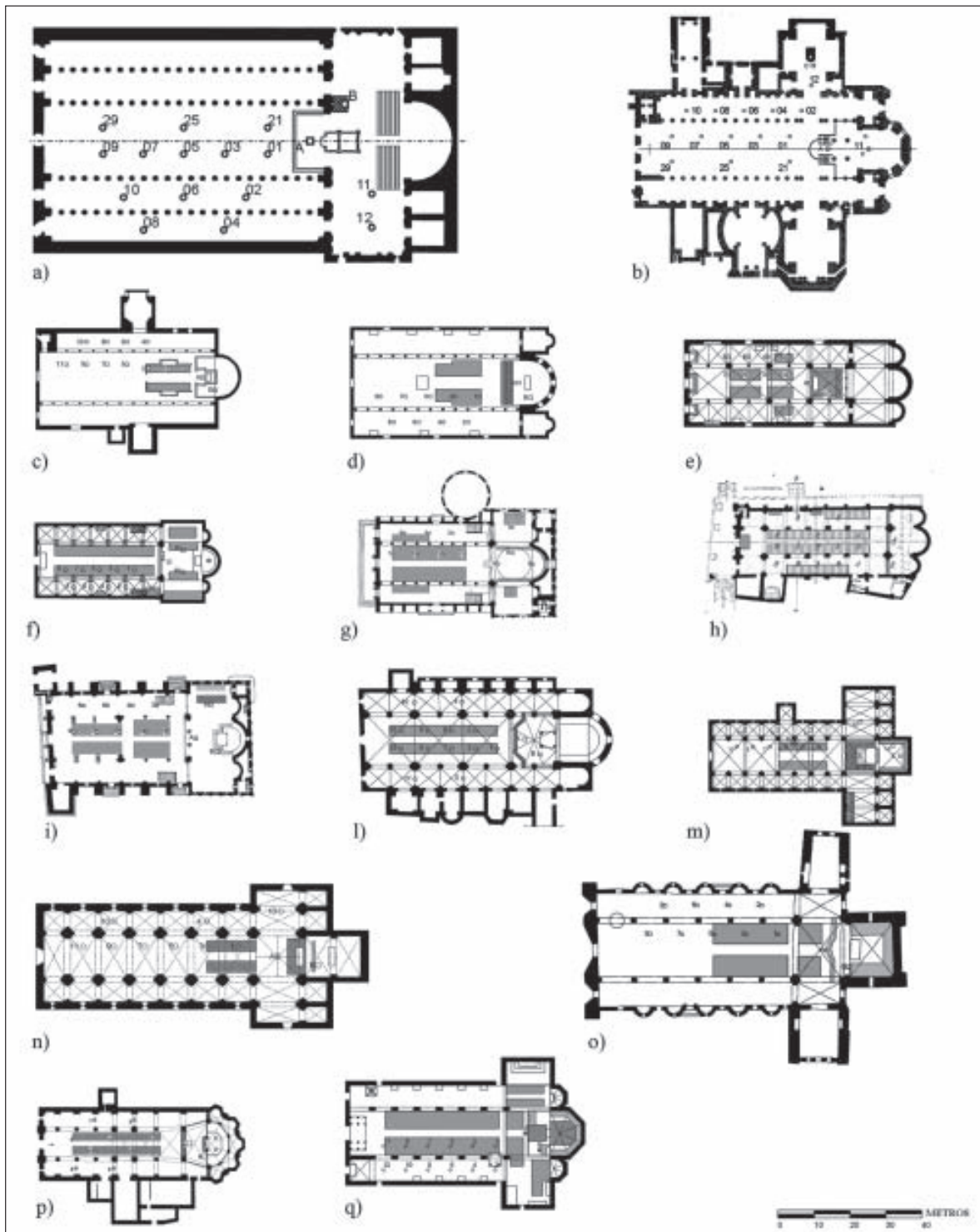


Figura 2a – Planta de las iglesias evaluadas: a) S. Paolo Fuori le Mura in Rome, b) Sta. Maria Maggiore in Rome, c) Sta. Sabina Basilica in Rome, d) Sta. Apollinare in Classe, Ravenna e) Catedral Modena, f) Catedral Trani, g) Catedral Bari, h) SS. Sepolcro in Barletta, i) Basilica S. Nicola, Bari, l) S. Ambrogio, Milano, m) Abazia, Chiaravalle, n) Abazia, Fossanova, o) Duomo de Orvieto, p) Catedral Barletta, q) Catedral Lucera. (Misma escala para todas las iglesias).

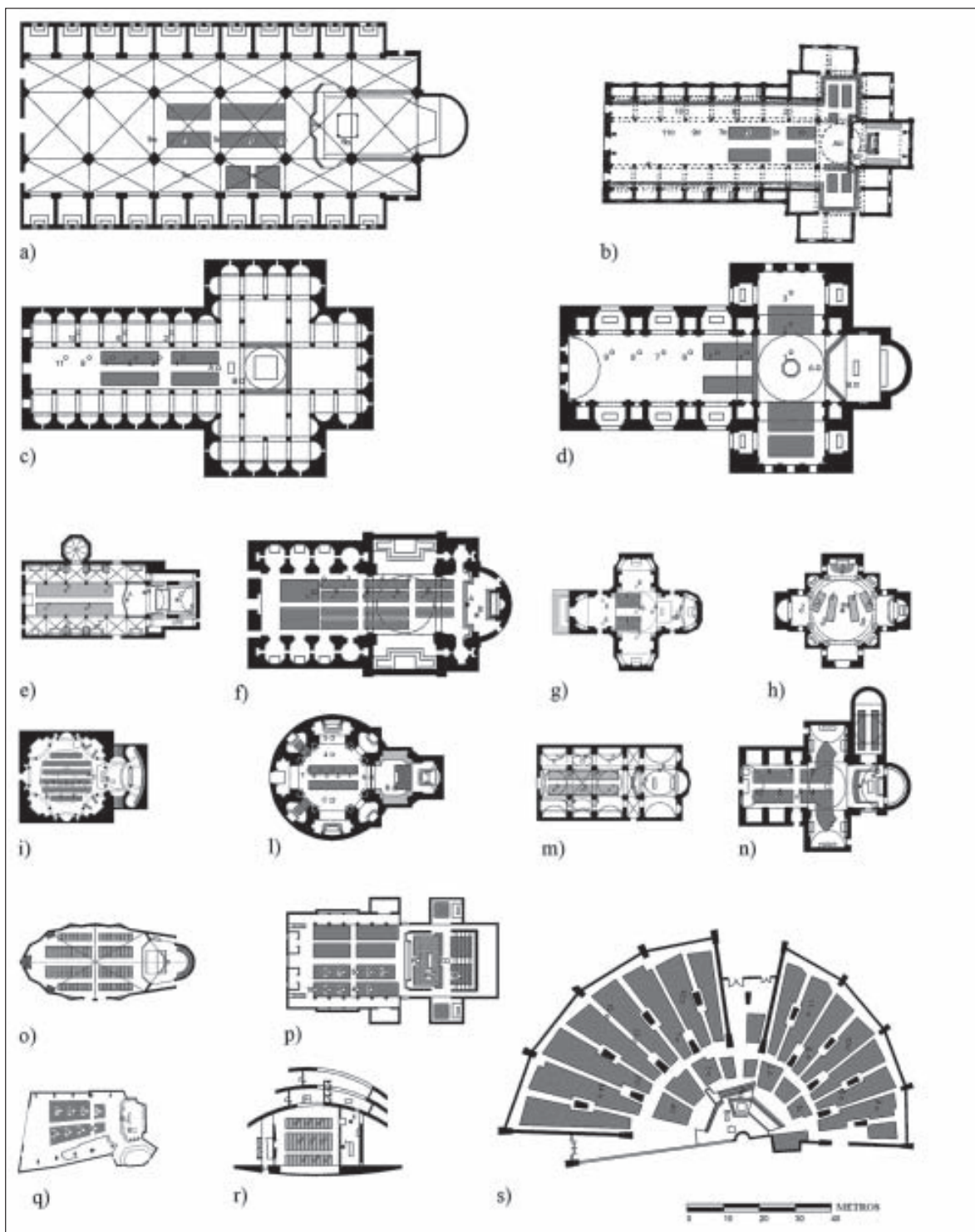


Figura 2b – Planta de las iglesias evaluadas: a) Basilica S. Petronio, Bologna, b) Basilica Laurenziana, Firenze, c) Santo Spirito, Firenze, d) S. Andrea, Mantova, e) Catedral Gravina, f) Iglesia Sacro Cuore Jesus, Roma, g) S. Luca y Martina, Roma, h) Sat. Agnese in Agone, i) San Lorenzo, Torino, l) Basilica Superga, Torino, m) Catedral Giovinazzo, n) Basilica S. Martin, Martina Franca, o) Iglesia de Carmine, Bari, p) Concatedral, Taranto, q) S. Maria Assunta, Riola, r) Dives in Misericordia, Roma, s) Iglesia de Padre Pio, San Giovanni Rotondo. (Misma escala para todas las iglesias).

3.3 Generalización del modelo

El modelo μ se aplicó originariamente a diez iglesias gótico-mudejar de Sevilla. El valor medio de μ correspondiente a estas iglesias fue de 0.13, con variaciones despreciables (desviación estándar σ de 0.02). El primer paso consistió en la aplicación del modelo μ en las iglesias objeto de estudio. El análisis consistió en calcular el valor de μ para cada iglesia minimizando el valor rms del error producido entre la medida y la predicción de la claridad a 1kHz, como función de la distancia fuente-receptor. Los resultados se muestran en la tabla 2, junto con los correspondientes parámetros requeridos para la aplicación del modelo. El tiempo de reverberación y la claridad están calculados para la misma banda de frecuencias.

Los valores de μ obtenidos en este estudio varían en el intervalo de 0.06 a 0.42 correspondientes a las iglesias de Padre Pio y la basílica de S. Petronio respectivamente. Este intervalo supone una variación mucho más amplia que en las iglesias gótico-mudejar, y justifica una vez más la necesidad de este estudio.

Valores altos de μ tales como 0.42 (especialmente comparados con valores originales de 0.04 especificados en [11]) corresponden a una reducción más rápida de la energía de las primeras reflexiones, de lo que en realidad se está llevando a cabo. Esto se traduce en que los valores obtenidos son los correspondientes a valores previstos con el modelo original para puntos más alejados.

Table 2 – Input parameters required to implement the Spanish model and corresponding errors

Iglesias	Volumen (m ³)	T 1kHz (s)	μ (s/m)	μ mid	σ mid	rms G (dB)	rms C80 (dB)	rms Ts (ms)		
S. Paolo Fuori Mura, Roma	130000	7.5	0.16	0.17	0.03	1.07	1.70	65		
Sta. Maria Maggiore, Roma	39000	4.1	0.20			0.84	2.10	31		
Sta. Sabina Basilica, Roma	17500	4.1	0.17			0.65	1.14	21		
Sta. Apollinare in Classe, Ravenna	22500	3.6	0.13			0.51	0.83	15		
Catedral Modena	20000	5.0	0.28	0.25	0.05	0.81	1.32	38		
Catedral Trani	21500	5.2	0.30			1.05	1.17	45		
Catedral Bari	30100	5.3	0.22			0.58	1.12	24		
SS. Sepolcro, Barletta	7700	3.9	0.17			1.20	1.40	57		
Basilica S. Nicola, Bari	32000	4.4	0.23			0.87	0.98	40		
S. Ambrogio, Milano	23000	6.0	0.29	0.35	0.06	0.81	1.45	39		
Abazia, Chiaravalle	12500	5.6	0.29			1.71	1.21	71		
Abazia, Fossanova	17000	6.3	0.33			1.71	2.03	94		
Catedral Barletta	16000	6.8	0.42			1.20	0.77	63		
Duomo de Orvieto	78000	7.2	0.36			1.71	1.21	72		
Catedral Lucera	33100	5.3	0.29			0.79	1.50	53		
Basilica S. Petronio, Bologna	160000	9.8	0.42	0.26	0.07	0.96	1.49	66		
Basilica Laurenziana, Firenze	39000	7.9	0.22			0.59	1.14	62		
Santo Spirito, Firenze	55000	10.7	0.31			1.26	1.73	54		
Catedral Gravina	10500	4.1	0.18			0.32	0.59	13		
S. Andrea, Mantova	78000	8.8	0.28	0.26	0.07	1.08	1.90	102		
Iglesia Sacro cuore Jesus, Roma	39000	5.1	0.34			1.32	1.52	50		
S. Luca y Martina, Roma	8700	3.1	0.23			0.71	1.12	20		
Sat. Agnese in Agone	14000	5.0	0.24			1.06	1.39	46		
San Lorenzo, Torino	12000	4.1	0.21			0.85	1.25	26		
Basilica Superga, Torino	22000	5.0	0.19			0.99	1.37	29		
Catedral Giovanazzo	7900	4.8	0.35			0.69	0.90	41		
Basilica S. Martin, Martina Franca	16400	6.9	0.33			2.22	1.39	114		
Iglesia de Carmine, Bari	9700	4.2	0.13			0.13*	0.05*	0.62	0.90	25
Concattedrale, Taranto	9000	4.2	0.17					1.94	0.95	48
S. Maria Assunta, Riola	5500	6.1	0.16	0.58	1.01			26		
Dives in Misericordia, Roma	10500	7.3	0.66	0.84	1.4			41.6		
Iglesia de Padre Pio, San Giovanni Rot	50000	5.5	0.06	1.09	1.33			44		
Mean	32721	5.7	0.25*	1.02	1.29			48		

*Valores calculados excluyendo la iglesia Dives in Misericordia

La aplicación del modelo propone una serie de consideraciones, principalmente relacionadas con la extrapolación de los valores de μ a partir exclusivamente de la claridad. De hecho, se observa un valor poco fiable de 0.66 en la iglesia Dives in Misericordia de Roma, donde se midieron valores muy bajos de claridad a una distancia de sólo 15m, como consecuencia de la carencia de reflexiones tempranas y de fuerte reflexiones pasados los 80m.

Este comportamiento provoca que las predicciones de la fuerza y del tiempo baricéntrico con el modelo μ resulten peores que aquellas obtenidas mediante la aplicación

del modelo de Barron. De todos modos, es interesante tener en cuenta que utilizando un valor de 0.13 para μ (como resultado del promedio del estilo modernismo excluyendo la misma iglesia Dives in Misericordia) se obtienen unos valores rms del error en G, C80, Ts de 0.6dB, 2.6dB y 35m respectivamente.

El mínimo valor de μ , observado en la iglesia de Padre Pio, se encuentra por encima del 50% sobre el valor originalmente propuesto por Barron para auditorios. Esta circunstancia verifica la hipótesis del modelo. De hecho, esta iglesia cuenta con aspectos arquitectónicos similares a un amplio auditorio carente de decoración o capillas.

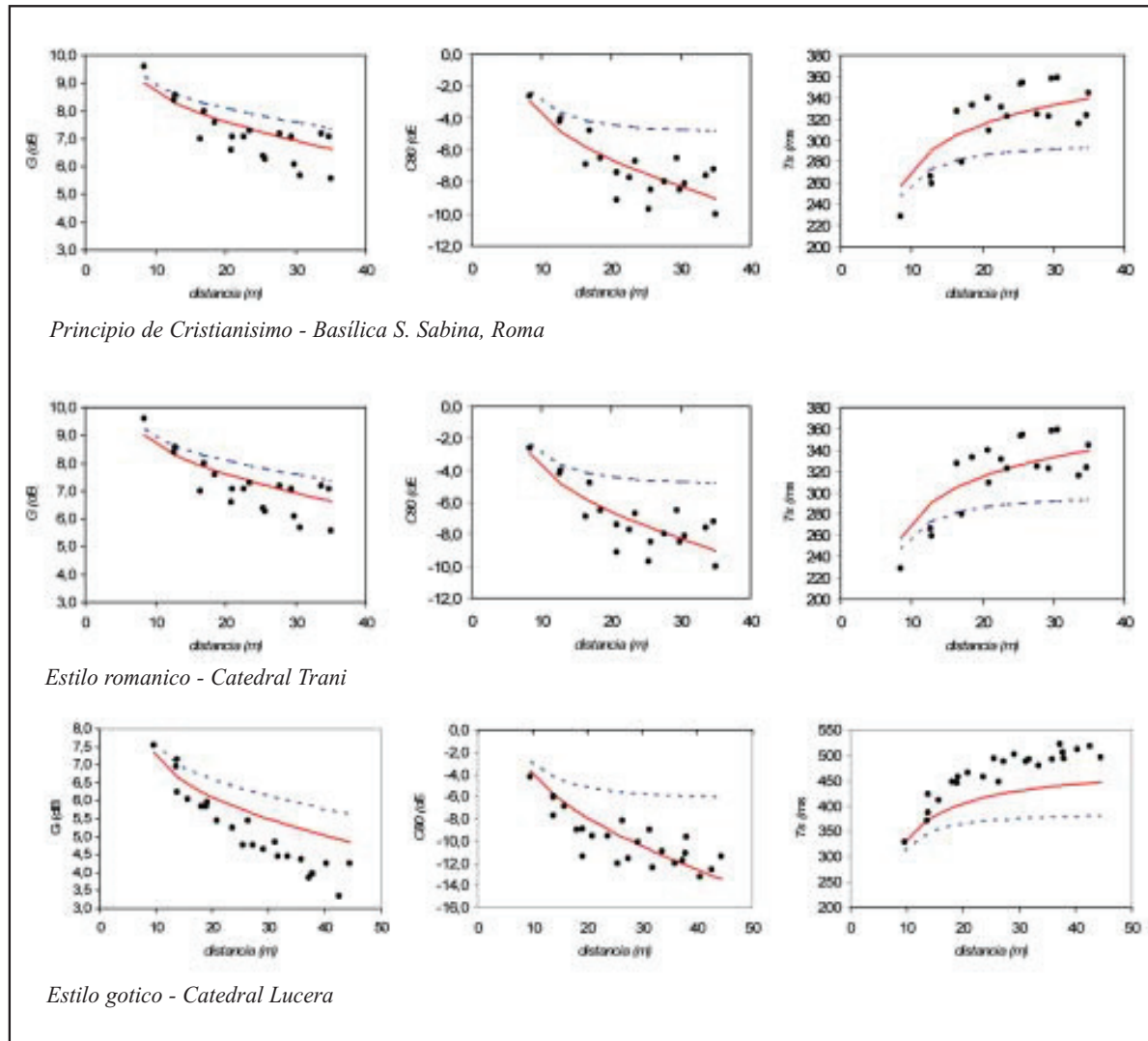


Figura 3a) Valores medidos (·) y previstos de la fuerza (izquierda), claridad (centro) y tiempo baricéntrico (derecha) de acuerdo con la teoría de Barron (- -) y el modelo μ (—) para tres iglesias representativas de diversos estilos.

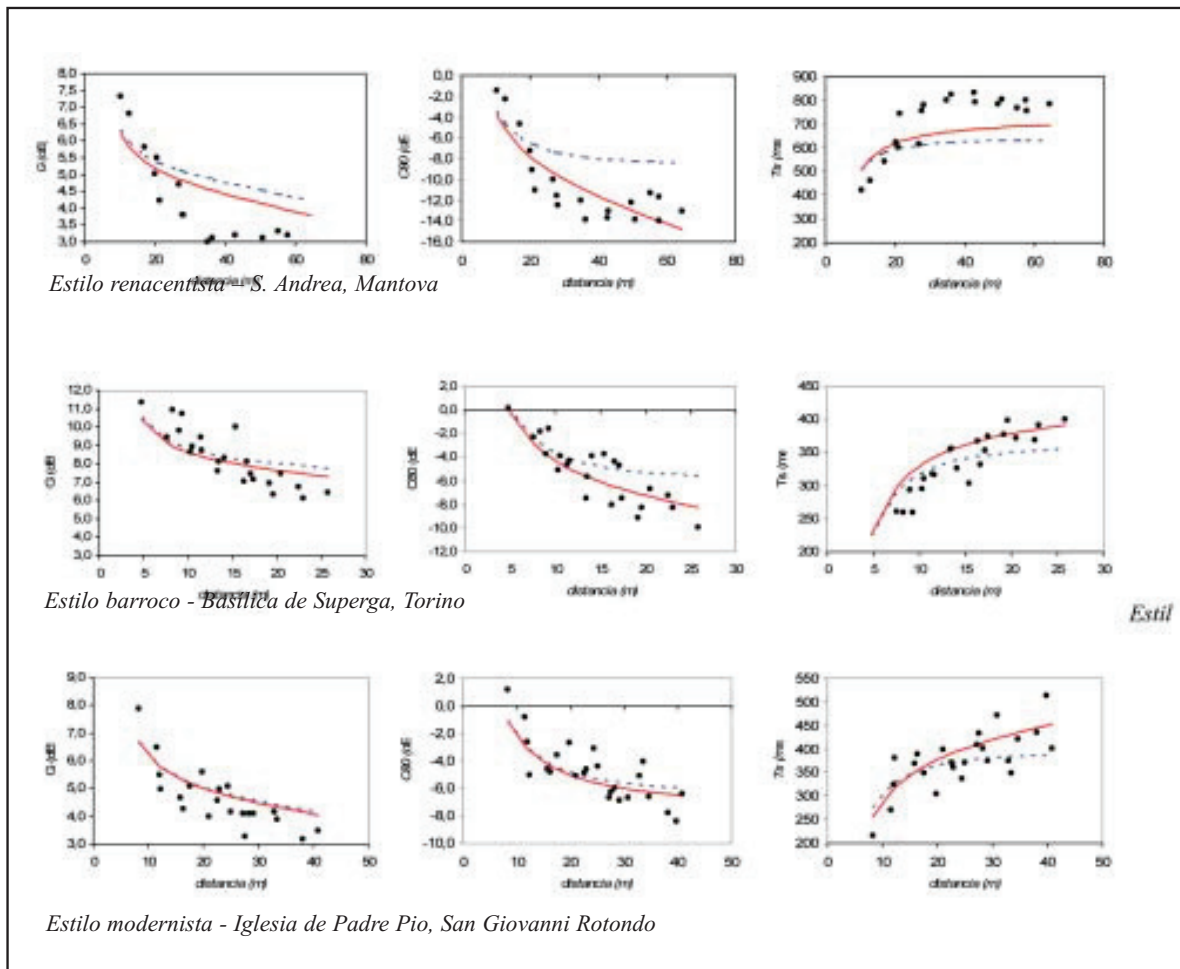


Figura 3b) Valores medidos (·) y previstos de la fuerza (izquierda), claridad (centro) y tiempo baricéntrico (derecha) de acuerdo con la teoría de Barron (- -) y el modelo μ (—) para tres iglesias representativas de diversos estilos.

3.4 Discusión de los resultados

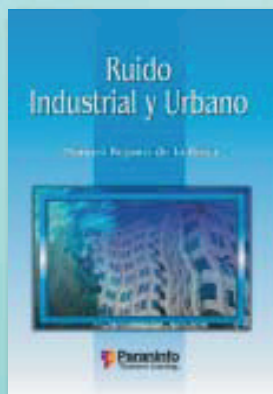
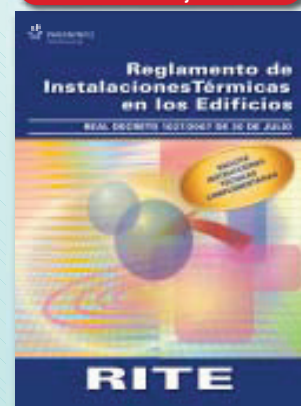
Las variaciones del valor μ observadas en diferentes iglesias supone que, conocidos el volumen y el tiempo de reverberación, μ contempla la influencia de las características geométricas y de forma del edificio, representando por tanto diferentes aspectos de la iglesia.

Los resultados (tabla 2) muestran que μ crece con las dimensiones y la complejidad del recinto. La regresión entre μ y el volumen muestra un débil coeficiente de correlación ($R^2=0.27$), de modo que μ debe estar influenciado por otros parámetros arquitectónicos. En particular se observan relaciones interesantes con otros dos parámetros arquitectónicos: el cociente entre volumen y superficie del suelo ($R^2=0.32$), y el cociente entre el volumen y la

longitud de la nave ($R^2=0.42$). Esto último expresa la dimensión media de la sección transversal, a modo de índice de la sección cruzada media, y supone una buena influencia incluso en un experimento sobre edificios heterogéneos como éste. Dado que el modelo únicamente describe el volumen y el tiempo de reverberación puede incluirse un parámetro adicional de “forma”. De esta manera, para recintos con igual tiempo de reverberación y volumen, cada uno de los parámetros energéticos están ahora influenciados por un nuevo coeficiente de “forma”. Por tanto, para igual tiempo de reverberación y volumen, corresponden distintas leyes energéticas a distintas formas del recinto.

Otro aspecto en la interpretación de los valores de μ es el estudio de su evolución histórica de acuerdo con los

Real Decreto 1027/2007
de 20 de julio



Más información en:
www.paraninfo.es

Recortar el boletín de pedido y enviar a **Paraninfo Cengage Learning** c/Magallanes 25 - 28015 Madrid
También puede hacer su pedido por Fax: **91 445 62 18** o a través de e-mail: clientes@paraninfo.es

No olvide indicar nº de campaña si
el pedido es a través de e-mail

Ruego me envíen los títulos que indico a continuación:

- ISBN: 9788428327992 **Acondicionamiento acústico**. 43,70 Euros
 ISBN: 9788428325714 **Acústica arquitectónica aplicada**. 68,50 Euros
 ISBN: 9788428326360 **BDAISACO**. 219,30 Euros
 ISBN: 9788428329408 **CTE. Código técnico de la edificación**. 48,70 Euros
 ISBN: 9788428315609 **Diccionario de arquitectura, construcción y obras públicas**. 40,10 Euros
 ISBN: 9788428326391 **Ingeniería acústica**. 73,40 Euros
 ISBN: 9788428330206 **RITE. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios**. 10,00 Euros
 ISBN: 9788428326827 **Ruido industrial y urbano**. 20,50 Euros

Campaña 132

Nombre y Apellidos _____ DNI/CIF _____
 Calle _____ Nº _____
 Ciudad _____
 Distrito Postal _____ Provincia _____
 Fecha _____ Teléfono _____

Para su pago:

- Remito giro postal de _____ Euros
 Adjunto cheque de _____ Euros
 Envío a reembolso con gastos a mi cargo
 Efectúen cargo en tarjeta de crédito:
 VISA
 AMERICAN EXPRESS
 Número _____
 Titular _____
 Fecha de caducidad _____
 Firma del titular
 de la tarjeta

Gastos de envío 3 euros (en el caso de reembolso existe una tasa añadida por correos, según sus tarifas vigentes)

Precios válidos salvo error de impresión

De conformidad con lo establecido en la Ley Orgánica 15/99, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal, le informamos de que los datos personales que nos ha facilitado pasarán a formar parte de la base de datos de Cengage Learning Paraninfo S.A., con la finalidad de poder informarle sobre las ofertas, productos y promociones que ofrece Cengage Learning Paraninfo S.A. Usted podrá dirigirse en cualquier momento al departamento de atención al cliente (C/ Magallanes, 25 28015 Madrid) para solicitar la cancelación, rectificación, acceso y oposición de los datos facilitados.

períodos y estilos arquitectónicos. Se calculó el valor medio de μ para cada uno de los estilos arquitectónicos. Considerando la fuerte connotación tipológica que caracteriza diferentes estilos arquitectónicos y el específico uso de materiales y ornamentación, es posible estudiar las relaciones entre todos estos aspectos, como se observa en estudios similares [14,15]. Cada uno de los estilos arquitectónicos está caracterizado por distintos aspectos, como se muestra brevemente a continuación:

- Las iglesias del principio del cristianismo tienen poca decoración, un gran número de muros lisos y planos y la forma de su planta es basilical, a la vez que relativamente abierta debido a la poca profundidad de las naves laterales y al estrecho diámetro de las columnas. El valor medio de μ para este estilo es 0.17, muy pequeño en comparación con otros.
- Las iglesias románicas cuentan con materiales cuyas características son similares a las iglesias de principios del cristianismo, por ejemplo, muros fabricados en piedra. Sin embargo, las plantas son generalmente más complejas, con tres naves cuya anchura está en relación 1:2 ó 1:4 entre las dos naves laterales y la principal. El valor medio de μ para este estilo es 0.25, alrededor de la media global para todos los estilos.
- Las iglesias góticas tienen volúmenes considerables, especialmente debido a su gran anchura, combinada con su gran complejidad espacial por la presencia de capillas laterales profundas y pilares gruesos. Estos elementos determinan un retraso en la generación del campo sonoro difuso. De hecho, el valor medio de μ es el más alto de todos los estilos (0.35).
- Las iglesias renacentistas tienen generalmente tres naves, en algunos casos cinco, con algo de decoración. Estas iglesias suponen una vuelta a la simplicidad a partir del estilo anterior, con un valor intermedio de μ de 0.26.
- Las iglesias barrocas vienen caracterizadas por una gran complejidad espacial, con muchas capillas, volúmenes adicionales y una planta cruzada. Estos elementos determinan una difusión del sonido considerable, sin embargo, el valor medio de μ se encuentra alrededor del correspondiente al medio global. Esto es debido a que la rica decoración y la complejidad del volumen reducen las primeras reflexiones, lo cual determina un mayor valor de μ ; pero al mismo tiempo, el pequeño volumen del recinto provoca una relativa reducción de este coeficiente, resultando finalmente un valor intermedio.

- Las iglesias modernistas disponen generalmente de superficies reflectantes, debido al uso de materiales rígidos tales como hormigón o cerámica. Las plantas son simples, con una apertura espacial y una tendencia hacia un volumen único. El valor medio de μ es el más pequeño (0.13), también debido a la presencia de la iglesia-auditorio de Padre Pio en el grupo de estudio.

Finalmente, el estudio de las variaciones de μ entre diferentes estilos muestra que las diferentes tipologías de planta, junto con los materiales empleados y las características arquitectónicas pueden explicar los diferentes valores del parámetro μ .

4. Clasificación

Esta sección quiere representar una primera investigación para clasificar los valores de μ en cualquier iglesia. Comparando los valores de μ con las plantas de las iglesias, hemos visto como un valor mayor de μ sigue a una mayor complejidad de la iglesia. Además esto está de acuerdo con la teoría, porque mayor complejidad significa mayor retraso para el campo difuso y menor energía sonora.

Una planta muy sencilla, como un auditorio o una basílica con nave poco ancha muestra valores de μ muy bajos, siempre menores de 0.20. Cuando la planta es más compleja, por ejemplo por la presencia de naves laterales o bóvedas, los valores de μ llegan hasta 0.35. Finalmente en iglesias de forma muy compleja, con presencia simultánea de naves laterales, transepto y bóvedas, μ asume valores mayores de 0.40. Estos grandes valores siempre se encuentran en iglesias de dimensiones muy grandes.

Esta clasificación quiere ser simplemente general. Los valores obtenidos por μ varían en amplios intervalos, de modo que una mayor definición de μ es previsible. Esto significa que se deben llevar a cabo otros estudios para mejorar la definición entre cada una de las características tipológicas y los valores de μ , para obtener intervalos más pequeños.

5. Conclusión

El modelo μ , originalmente comprobado en iglesias gótico-mudéjar ha sido aplicado en diferentes iglesias para valorar su generalización. Los resultados clarifican méritos y límites de este modelo. El análisis ha confirmado la simplicidad del modelo, que puede ser convenientemente aplicado a diferentes iglesias. De hecho, los valores previstos se ajustan apropiadamente a los valores medidos.

Este artículo ha mostrado esta relación.

Una de las posibilidades para una clasificación de μ puede ser tipológica de acuerdo con características arquitectónicas. La hipótesis básica debería ser una relación lineal entre las características arquitectónicas y el comportamiento acústico, como se muestra en este artículo. Esta presunción queda confirmada dada la pequeña variación observada en el parámetro μ para grupos de estudio homogéneos. La posibilidad de obtener reglas tipológicas para edificios de culto también representa un objetivo complejo, debido a las diferencias existentes entre los diversos recintos. Las peculiaridades de cada uno de los edificios resultan difícilmente generalizables, especialmente en la arquitectura modernista, cuyo estilo viene caracterizado por una notable libertad. En cualquier caso, este tipo de estudio está motivado por la posibilidad de obtener valores puntuales de los distintos parámetros energéticos sin la necesidad de realizar complejos y duraderos cálculos basados en simulaciones por ordenador.

Agradecimientos

Este artículo nace como consecuencia del premio “Andrés Lara” 2008, entregado al primer autor durante el congreso Acústica 2008. El primer autor quiere expresar su agradecimiento a la Sociedad Portuguesa de Acústica por la hospitalidad durante el congreso y a la Sociedad Española de Acústica por la oportunidad concedida a través del premio para continuar sus investigaciones.

Bibliografía

- [1] Kuttruff, H., “Room acoustics”, 3rd ed. London, *E & FN*, Spon, 1991.
- [2] Sendra, J.J.; Zamarreño, T.; Navarro, J., “Acoustics in churches”, *Computational Acoustics in Architecture*, Computational Mechanics Publications, Southampton (UK), pp. 133-177, 1999.
- [3] Hodgson, M., “When is diffuse-field theory applicable?”, *Appl. Acoust.*, 49 (3), pp. 197-207, 1996.
- [4] Arau, H., “General theory of the energy relations in halls with asymmetrical absorption”, *Building Acoust.* 5, pp. 163-183, 1998.
- [5] Sendra, J.J.; Zamarreño, T.; Navarro, J., “An analytical model for evaluating the sound field in Gothic-Mudejar churches”, *Computational Acoustics and its Environmental Applications*, Computational Mechanics Publications, Southampton (UK), pp. 139-148, 1997.
- [6] Galindo, M.; Zamarreño, T.; Giron, S., “Clarity and Definition in Mudejar-Gothic Churches”, *Building Acoust.*, 6, pp.1-16, 1999.
- [7] Cirillo, E.; Martellotta, F., “An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches”, *Appl. Acoust.*, 64, pp.1-23, 2003.
- [8] Cirillo, E.; Martellotta, F., “Sound propagation and energy relations in churches”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 118 (1), pp. 232-248, 2005.
- [9] Zamarreño, T.; Girón, S.; Galindo, M., “Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 121 (1), pp. 234-250, 2006.
- [10] Girón, S.; Galindo, M.; Zamarreño, T., “Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches”, *J. Sound and Vibration*, 2008. doi: 10.1016/j.jsv.2008.02.014.
- [11] Barron, M.; Lee, L.J., “Energy relations in concert auditoriums I”, *J. Acoust. Soc. Am.* 84 (2), 618-628, 1988.
- [12] ISO-3382. “Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters”, ISO, Geneva, 1997.
- [13] Cirillo, E.; Martellotta, F., “Worship, acoustics, and architecture”, *Fine-science publishing*, Brentwood, 2006.
- [14] Cirillo, E.; Martellotta, F., “Acoustics of Apulian-Romanesque churches: correlations between architectural and acoustic parameters”, *Building Acoust.*, 10, pp. 55-76, 2003.
- [15] Carvalho, P.; Desarnaulds, V., “Analysis of reverberation time values in churches according to country and architectural style”, *VIII Int. Cong. Sound and Vibration*, 2001.