



I Congreso Internacional sobre investigación en
Construcción y Tecnología Arquitectónicas
*1st International Congress on research in Construction and
Architectural Technologies*

Universidad Politécnica de Madrid. ETSAM. Madrid, 11-13
Junio de 2014

PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS MORTEROS DE REVESTIMIENTO EN LAS CONDICIONES ACÚSTICAS DE LOS ESPACIOS HISTÓRICOS

Autor: Rogelio Ruiz (1)

(1) Grupo de Investigación de Acústica Arquitectónica de la Universidad Politécnica de Madrid,
rogelio.ruiz@upm.es

RESUMEN

El artículo muestra las principales variables del comportamiento acústico de los morteros de revestimiento históricos, relacionando sus propiedades físicas, composición y evolución en el tiempo, con su capacidad de absorción del sonido. Para ello se ha cruzado información proveniente de diversas disciplinas: estudios físico-químicos, modelos analíticos para la obtención de coeficientes de absorción acústica, resultados de ensayos y valores presentes en la literatura acústica.

Mediante un modelo acústico virtual de la Catedral de Toledo ajustado con medidas in situ, se ha evaluado la repercusión en cuatro parámetros acústicos (T_{30} , EDT, RASTI y DL_f) de tres hipótesis de revestimiento con coeficientes de absorción acústica dentro del rango presente en las fuentes consultadas. Se comprueba que pequeñas variaciones en la absorción de estos materiales, dada la gran superficie que ocupan, pueden modificar ostensiblemente la calidad acústica y es por eso un factor importante para ser tenido en cuenta en las obras de restauración de espacios históricos.

Palabras clave: simulación acústica, rehabilitación, revestimientos, morteros, catedrales.

1 INTRODUCCIÓN

Los morteros de revestimiento y sus acabados finales son los materiales de mayor repercusión en las condiciones acústicas de gran parte de los espacios históricos. El sonido propio de cada edificio es parte integrante del patrimonio inmaterial, por lo que es necesario disponer de las herramientas y criterios para su conservación o recuperación sin entrar en contradicción con el resto de las exigencias de las obras de rehabilitación.

El principal parámetro de caracterización acústica es el tiempo de reverberación, que depende en una primera aproximación del volumen del recinto y de la absorción acústica de sus materiales superficiales. Generalmente los edificios históricos están contruidos con materiales de poca absorción, lo que da lugar a espacios altamente reverberantes, especialmente en los grandes recintos de culto como las catedrales. Sin embargo hay muchos casos de espacios que tienen tiempos de reverberación claramente inferiores que otros de mucho menor volumen [1], aun teniendo acabados aparentemente similares.

Los morteros históricos de revestimiento, al no ser considerados como materiales absorbentes y por la dificultad de medir índices de absorción muy bajos, han sido relativamente poco ensayados acústicamente. Sin embargo su caracterización como materiales de construcción en restauración es muy completa por la necesidad de reproducir morteros compatibles. Los modelos analíticos que reproducen el comportamiento acústico de materiales similares permiten establecer una primera relación de las características acústicas de los morteros con los parámetros físicos, químicos y constructivos. Esto posibilita, si no dar un valor preciso al coeficiente de absorción, si poder evaluar la importancia relativa de las variables que lo determinan y orientar la realización de los imprescindibles ensayos físicos.

2 MÉTODOS

2.1 Parámetros estándar

Se han recopilado varios modelos analíticos existentes que se aproximan a la realidad de los morteros de revestimiento. De estos se han obtenido los parámetros necesarios para la caracterización acústica y una primera aproximación de la relevancia de cada uno.

A partir de los estudios sobre los morteros más habituales en los edificios históricos (cal, yeso, mixtos cal-yeso y mixtos con puzolanas), se han extraído los datos útiles para la definición de las variables de cálculo acústico. Se han estudiado asimismo las características y dosificaciones de conglomerantes, agua, áridos, aditivos, procesos de curado y carbonatación, que pudieran tener influencia en la absorción acústica.

2.2 Simulación acústica

Se cuenta con un modelo tridimensional de la Catedral de Toledo en el software de simulación ODEON 11.00, validado a partir de medidas realizadas in situ. El procedimiento de medida, la definición geométrica, la asignación de los coeficientes de absorción y dispersión y los criterios de validación, se pueden encontrar en un trabajo previo [2]. A partir del coeficiente de absorción del mortero base del modelo validado ($\alpha_{avg}=0,068$) se han definido dos morteros y tres modelos de simulación: modelo '<absorción' ($\alpha_{avg}=0,035$); modelo '>absorción' ($\alpha_{avg}=0,135$); modelo 'optimizado' en el que se utilizan los dos coeficientes para alcanzar unas condiciones que intenten recoger las ventajas de ambos. La aplicación a la simulación se ha realizado de forma análoga a la validación del modelo del estado actual.

La Catedral de Toledo es un espacio acústicamente complejo, en el que se encuentran zonas con características acústicas muy diversas [5]. Se ha analizado el espacio con mayores exigencias acústicas, el conjunto capilla mayor-crucero-coro, con fuente sonora en el altar mayor y sin ruido de fondo. Se obtiene el valor promedio de T_{30} de toda la catedral con 81 receptores y los parámetros T_{30} , EDT, RASTI y DL_f de cuatro puntos representativos.

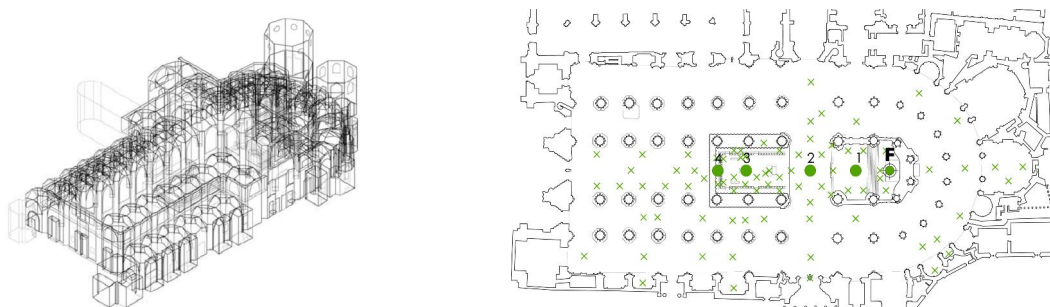


Figura 1. Modelo de Odeon y planta de la catedral con los puntos medidos en la simulación.

3 RESULTADOS

3.1 Modelos analíticos estudiados y parámetros que influyen en su absorción acústica

El modelo más ajustado es el de material poroso de estructura rígida granular. Existen varios modelos parciales aproximados: estructura rígida [6], granular [7], baja porosidad [8], doble escala de porosidad [9], multicapa [10], poros tubulares, con cavidades [11], etc.

Las expresiones de cálculo suelen determinarse con cinco variables principales [12]:

Resistividad al flujo, γ (Ns/m⁴): usualmente la absorción crece con la resistividad hasta un límite, para disminuir levemente y mantenerse constante. La transmisión aumenta rápido.

Porosidad abierta, σ (%): la absorción, sobre todo a medias y altas frecuencias, y la transmisión crecen de forma no lineal con la porosidad. La distribución es fundamental. El aumento del diámetro principal es proporcional al de la atenuación. Sólo influyen poros mayores que el camino libre medio del aire (0,07 μm) [13]. Los diámetros suelen estar entre 0,5 y 10 μm y hay que considerar también macroporosidad, fisuraciones, degradación, etc.

Tortuosidad, a_∞ (adim.): Afecta a absorción y transmisión e influye en la velocidad del sonido.

Longitud viscosa característica, Λ (m): Valor alto aumenta la absorción a medias y altas frecuencias y disminuye a bajas. Valor bajo aumenta la transmisión a medias y altas.

Longitud térmica característica, Λ' (m): Su influencia en la absorción es baja. Con valores muy bajos aumenta la transmisión a altas frecuencias.

Otros parámetros que intervienen son la densidad del fluido, el espesor del material respecto a la longitud de onda, su superficie específica, factor estructural, contenido de agua, etc.

3.2 Parámetros constructivos

La porosidad, junto a la resistividad al flujo, es la propiedad que más directamente interviene en la absorción acústica. Depende de las características y relaciones de los componentes y a la porosidad de la pasta hay que añadir la de los demás materiales del mortero [14]

Conglomerante: La cal y el yeso pueden presentar estructuras muy porosas. Su aumento se traduce en general en una mayor porosidad, si bien según el tipo de árido la porosidad puede aproximarse con el tiempo [15]. El rango de diámetros más amplio suele estar entre 0,3 y 100 μm , pudiendo representar los mayores entre el 30 y 50% del volumen de aire. El rango habitual está entre 1 y 10 μm y en ausencia de áridos el diámetro principal es de entre 0,5 y 1 μm . La cal apagada es la que aporta más porosidad [16], sobre todo de diámetros mayores de 1 μm . La dimensión fractal superficial con cal y yeso suele ser alta.

Agua/conglomerante: La porosidad está compuesta fundamentalmente por los espacios que deja el agua de amasado, por lo que el incremento de esta se traduce en aumento de la porosidad alcanzando hasta el 50 y 65%. Más agua no modifica la forma de la curva de porosidad, pero la desplaza a diámetros mayores, incrementando el volumen de hueco [17]

Áridos: Más áridos, salvo que sean muy porosos, implica en general menor porosidad y cambia la distribución de poros [18]. Su tipo puede alterar sustancialmente el comportamiento previsto. Los áridos calizos reducen los poros menores (0,01-0,1 μm) y aumentan los medios y grandes; los silíceos reducen los mayores (10-100 μm) y aumentan los menores; el diámetro principal con cuarcita es 6-7 μm y con alabastro 2-3 μm [15] [18].

Aditivos y tratamientos: En los morteros históricos es frecuente la existencia de cáscaras de cereales, pelo animal, fibras vegetales, fragmentos de teja y otros (azúcar, sangre, cerveza, orina, etc.). Suelen aumentar la superficie interior y aportan muy variadas propiedades [19].

Carbonatación: El proceso de secado y carbonatación es fundamental y distingue claramente a los morteros de cal y yeso de los cementicios. El tiempo produce cambios importantes en las propiedades del mortero [20]. Hay claras diferencias de porosidad y distribución de poros antes, durante y al final del proceso de carbonatación [21]. En morteros de cal se reduce gradualmente la porosidad hasta un 9-14 %, desapareciendo los poros más pequeños y en los más ricos en cal un desplazamiento hacia diámetros menores.

3.3 Resultados acústicos

El tiempo de reverberación T_{30} promedio con fuente en el altar mayor en los modelos de la Catedral de Toledo es: validado 5,7 s; '<absorción' 7,9 s; '>absorción' 4,6 s; 'optimizado' 5,0 s.

Puntos (d=dist.fuente) Modelos de absorción	1. Altar mayor-atril coro (d=37,8m)				2. Altar mayor- crucero (d=21,4m)				3. Altar mayor- presbiterio(d=6,8m)				4. Altar mayor-silla arzobispo (d=45,2m)			
	T ₃₀ (s)	EDT (s)	RASTI	DL _f (dB)	T ₃₀ (s)	EDT (s)	RASTI	DL _f (dB)	T ₃₀ (s)	EDT (s)	RASTI	DL _f (dB)	T ₃₀ (s)	EDT (s)	RASTI	DL _f (dB)
validado	5,6	4,2	0,41	12,7	5,6	4,1	0,45	9,5	5,4	2,5	0,66	6,4	5,5	3,9	0,45	14,6
< absorción	7,8	5,9	0,38	13,8	7,7	6,0	0,42	10,6	7,5	3,8	0,62	7,0	7,6	5,7	0,41	15,5
> absorción	4,4	3,3	0,44	12,1	4,4	3,2	0,48	8,8	4,2	2,0	0,70	5,8	4,4	3,0	0,48	14,1
optimizado	4,8	3,9	0,41	13,1	4,8	3,9	0,45	9,8	4,7	2,5	0,65	6,8	4,8	3,7	0,44	14,8

Tabla 1. Valores promediados espectralmente de los parámetros acústicos en puntos representativos para los cuatro tipos de revestimiento. (T₃₀=tiempo de reverberación con pendiente -5 a -30 dB en frecuencias medias; EDT=tiempo de reverberación con pendiente 0 a -10dB; RASTI=índice de inteligibilidad; DL_f=incremento de la presión sonora respecto a la que habría al aire libre)

4 DISCUSIÓN

Los modelos analíticos estudiados no son en general de aplicación sencilla y no siempre se dispone de todos los datos necesarios. Los de apoyo en la investigación de mejoras en los materiales absorbentes suelen responder bien a esa utilización, pero con otros materiales como los morteros, los resultados no son totalmente coherentes, bien por estar fuera de rango de aplicación o bien por carecer de alguna variable.

A partir de los modelos analíticos más ajustados a los morteros y de los datos de composición del mortero de revestimiento de la Catedral de Toledo, se necesitaría aproximadamente un diámetro de poro doble para tener la absorción de la simulación '>absorbente' o bien multiplicar su porosidad entre 1,5 y 3 veces, situaciones dentro de los rangos factibles.

En las simulaciones acústicas todos los índices cambian de forma desigual según el punto de medida, reflejando la importancia de las condiciones espaciales de contorno. El modelo '<absorción' solo mejora en el incremento de la presión sonora. El modelo '>absorción' mejora en T₃₀, EDT y RASTI, pero baja en DL_f. El modelo 'optimizado' no alcanza el nivel de mejora del '<absorbente' en T₃₀, EDT y RASTI, pero mejora en todo respecto al validado inicial y tiene un DL_f mayor, lo que es importante en distancias grandes.

5 RECONOCIMIENTOS

El autor agradece a D. Jaime Castañón Fariña, arquitecto conservador de la Catedral de Toledo, su generoso préstamo del *Estudio de las bóvedas de la Catedral de Toledo*.

6 CONCLUSIONES

Aunque es complicado obtener un valor para los coeficientes de absorción, los modelos analíticos combinados con los datos disponibles de los materiales si permiten comprobar la repercusión acústica en los cambios de múltiples variables y a partir de esto entender las diferencias acústicas entre edificios comentadas en la introducción.

Con el modelo de simulación se ha comprobado que es posible controlar y proyectar mejoras en el comportamiento acústico de los espacios históricos dentro de un rango pequeño de coeficientes de absorción de los morteros.

Con el desarrollo futuro de este trabajo se espera contribuir a mejorar los criterios en la aplicación de coeficientes de absorción en los programas de simulación acústica y dar datos para la planificación de ensayos acústicos de laboratorio orientados a restauración.

7 REFERENCIAS

- [1] L. Álvarez-Morales, M. Galindo, S. Girón, T. Zamarreño. *La acústica de las catedrales andaluzas*. 44º Congreso Español de Acústica Tecnológica Valladolid 2013.
- [2] R. Ruiz, A. Díaz-Chyla, A. Pedrero, C. Díaz. *Revestimientos fijos y configurables en la acústica de las catedrales*. VIII Congreso Iberoamericano de Acústica, Évora, 2012.
- [3] Base de datos de coeficientes de absorción acústica de materiales del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) <http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt1/fb-16/ag-1630/raumakustik/absorptionsgradtabelle.html>
- [4] A. Aydin, A. Tavukcuoglu, M. Caliskan. *Assessment of Acoustical Characteristics for Historical Baths (Hammams)* Acoustics 08 Paris, Junio 29-Julio 4, 2008. 4173-4178
- [5] A. Pedrero, R. Ruiz, A. Díaz-Chyla, C. Díaz. *Acoustical study of Toledo Cathedral according to its liturgical uses*. Applied Acoustics 85 (2014) 23–33
- [6] M. J. Brennan, W.M. To. *Acoustics properties of rigid-frame porous materials – an engineering perspective*. Applied Acoustics 62 (2001) 793-811
- [7] K. Attenborough. *Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 73, No. 3, March 1983. 785-799
- [8] N. Vorovina. *An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity*. Applied Acoustics 58 (1999) 295-304
- [9] X. Olny, C. Boutin. *Acoustic wave propagation in double porosity media*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 114, No 1, July 2003. 73-89
- [10] I. P. Dunn, W. A. Davern. *Calculation of Acoustic Impedance of Multi-layer Absorbers*. Applied Acoustics 19 (1986) 321-334
- [11] N. Neithalath, A. Marolf, J. Weiss, J. Olek. *Modeling the Influence of Pore Structure on the Acoustic Absorption of Enhanced Porosity Concrete*. Jour. Adv. Concrete Tech. 3 (1), 29-40
- [12] P. Shravage, S. Jain, N. Karanth. *Effect of intrinsic parameters on sound absorption and transmission loss - A parametric study*. NOISE-CON 2010 Baltimore, Abril 19-21, 2010
- [13] M. Kuczumski, J. Johnston. *Acoustic Absorption in Porous Materials*. NASA/TM-2011-216995
- [14] E. Salavessa, S. Jalali, L. M.O. Sousa, L. Fernandes, A. M. Duarte. *Historical plasterwork techniques inspire new formulations*. Construction and Building Materials 48 (2013) 858–867
- [15] J. Igea, S. Martínez-Ramírez, P. Lapuente, M. T. Blanco-Varela. *Assessment of the physico-mechanical behaviour of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time*. Environmental Earth Sciences, Vol. 70, No 4, October 2013. 1605–1618
- [16] P. Faria, F. Henriques, V. Rato. *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*. Journal of Cultural Heritage 9 (2008) 338-346
- [17] M. Arandigoyen, J.L. Pérez Bernal, M.A. Bello López, J.I. Alvarez. *Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity*. Applied Surface Science 252 (2005) 1449–1459
- [18] J. Lanás, J.I. Alvarez. *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behaviour*. Cement and Concrete Research 33 (2003) 1867–1876
- [19] A. Izaguirre, J. Lanás, J.I. Álvarez. *Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment*. Cement and Concrete Research 40 (2010) 1081–1095
- [20] K. Elert, C. Rodríguez-Navarro, E. Sebastian Pardo, E. Hansen, O. Cazalla. *Lime mortars for the conservation of historic buildings*. Studies in Conservation 47 (2002) 62–75
- [21] M. Arandigoyen, B. Bicer-Simsir, J.I. Alvarez, D.A. Lange. *Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes*. Applied Surface Science 252 (2006) 7562–7571