

## LA INTELIGIBILIDAD EN LAS IGLESIAS GÓTICO-MUDÉJARES

T. Zamarreño\*, M. Galindo\*, J.J. Sendra<sup>§</sup>, S. Girón\*.

\* Departamento de Física Aplicada. <sup>§</sup>Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Inst. Univ. de Ciencias de la Construcción. E.T.S.A. Universidad de Sevilla. Avda. Reina Mercedes, 2, 41012, Sevilla, España.  
Tel. 954556612. Fax. 954556534.  
E-mail: teofilo@cica.es

### SUMMARY

This work deals with those acoustics parameters that evaluate the speech intelligibility in eight gothic-mudejar churches in the city of Seville. STI measurements 500Hz and 2KHZ central band frequencies are compared with spectral  $D_{50}$  definition indexes at several locations points. Similarly RASTI data are compared to averaged  $D_{50}$  indexes for correlation.

### INTRODUCCION

Cuando en el siglo XIII los cristianos recuperan el sur de España de manos de los árabes, deciden construir sus templos sobre las mezquitas, lo que constituía una operación cargada de simbolismo: representa el nuevo poder. Sin embargo este poder ha de permitir y favorecer incluso la convivencia de tres lenguas, tres religiones y tres culturas: los cristianos (el grupo más numeroso) los judíos y los moros (la colonia más reducida). En este sentido surge de inmediato la confrontación artística entre la cultura castellana, gótica, y la andaluza, musulmana, que terminó produciendo el movimiento artístico más característico en la España medieval: el mudéjar.

Morfológicamente, las iglesias mudéjares sevillanas, definidas por Angulo<sup>1</sup> como el tipo parroquial sevillano, están caracterizadas por esta dualidad estilística: cabecera gótica abovedada y cuerpo de tres naves con cubierta de madera<sup>1</sup>. Sus muros de fábrica de ladrillo se complementan con portadas y ábside de piedra. Su menor tamaño, unas proporciones más ajustadas y sobre todo la eliminación de las bóvedas para cubrir las naves y su sustitución por las cubiertas de madera, son la causa de las aceptables condiciones acústicas en estas iglesias, sensiblemente mejores que sus contemporáneas góticas. A este respecto puede observarse en la figura 1 los valores medidos del tiempo de reverberación frente a la frecuencia en un conjunto de este tipo de iglesias ubicado en la ciudad de Sevilla y que han merecido nuestra atención en otros trabajos<sup>2,3,4</sup>. Los volúmenes de las mismas oscilan entre 8700 m<sup>3</sup> de Santa Marina y 3950 m<sup>3</sup> de San Isidoro y las longitudes de las naves entre 36 y 24 m.

En este trabajo tratamos de realizar una aproximación a un importante aspecto desde el punto de vista funcional en estos recintos: la inteligibilidad.

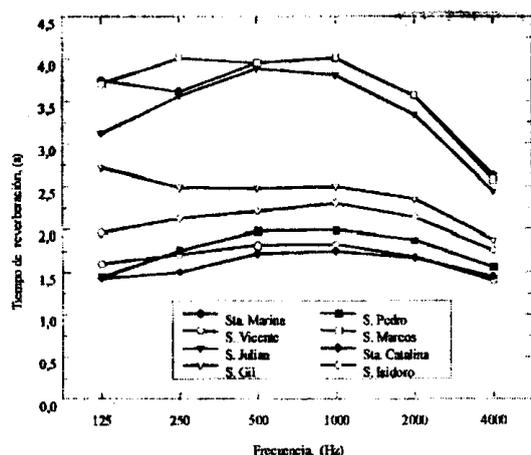


Fig. 1.- TR frente a la frecuencia en las ocho iglesias

La inteligibilidad subjetiva de la palabra hablada se ve afectada por factores tales como el tipo de material utilizado para construir el mensaje, la forma en que este es presentado, la habilidad y claridad del orador, el sistema de transmisión utilizado, las habilidades del oyente, etc... Con el fin de valorar de forma objetiva la inteligibilidad, se han desarrollado diferentes índices. Para cada uno de ellos se han realizado ensayos subjetivos simultáneos que han ayudado a establecer la correlación entre el índice objetivo y la inteligibilidad subjetiva.

Uno de los factores determinantes de la inteligibilidad es la relación señal/ruido. La acepción general de tal concepto llevó a Thiele<sup>5</sup> a proponer la definición ( $D_{50}$ ) como parámetro adecuado para cuantificar la inteligibilidad. Él consideraba como señal útil la energía reverberada inicial (la que llega al oyente con un retardo inferior a  $\tau$  respecto del sonido directo) y como ruido la que llega posteriormente. Para establecer el valor de  $\tau=50$ ms realizó una serie de ensayos subjetivos. Dicho índice tiene la ventaja de que puede obtenerse a partir de la respuesta al impulso,  $g(t)$ , del recinto mediante la expresión:

$$D_{50} = 100\% \left( \frac{\int_0^{50} g(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} g(t)^2 dt} \right)$$

Uno de los índices más ampliamente utilizados es el índice STI (Speech Transmission Index) basado en la determinación de la función de transferencia de modulación entre el emisor y la posición del receptor<sup>6</sup>. La determinación del STI implica la determinación de la reducción del índice de modulación para cada una de las catorce frecuencias (entre 0.63 y 12.5Hz) con que se modula la portadora (cuyo espectro corresponde a la voz humana) en las siete bandas de octava comprendidas entre 125 y 8KHz. En total se requiere la determinación de  $14 \times 7 = 98$  valores del índice de modulación.

Cuando el índice se utiliza para valorar la inteligibilidad de un recinto tal información es sobreabundante en la mayor parte de las situaciones. Por ello Steeneken et al<sup>7</sup> proponen para tal fin el índice RASTI, que considera solo la banda de 500Hz (con cuatro frecuencias de modulación) y la de 200Hz (con cinco). Hay que tener en cuenta que el espectro de la voz tiene un máximo en la banda de 500Hz y que las consonantes (esenciales en la inteligibilidad) desarrollan su mayor parte de la energía en la banda de 2000Hz. La degradación en el índice de modulación se verá afectada, tanto por el ruido de fondo (que afecta en la misma medida a todas las frecuencias de modulación) como por la reverberación, que afectará más a las frecuencias de modulación más altas.

Nuestro objetivo en este trabajo es analizar el grado de correlación existente entre las medidas RASTI y  $D_{50}$  en las iglesias gótico-mudéjares que ya hemos citado.

## TÉCNICA EXPERIMENTAL

Las medidas del índice RASTI se han llevado a cabo utilizando el equipo Brüel&Kjær. El proceso de adquisición de datos se controlaba desde un ordenador portátil vía RS-232 que se encargaba de configurar los parámetros del receptor, recibir los datos y almacenarlos en disco para su posterior procesado y análisis. El micrófono se situó a la altura del oído de una persona sentada (~1,20m). En cada una de las iglesias se han realizado medidas en diversos puntos (~10) repartidos por la zona de audiencia, en ausencia de público. El emisor se colocó en todos los casos, en el altar, lugar de ubicación habitual de la fuente natural. El nivel de emisión se situó en el

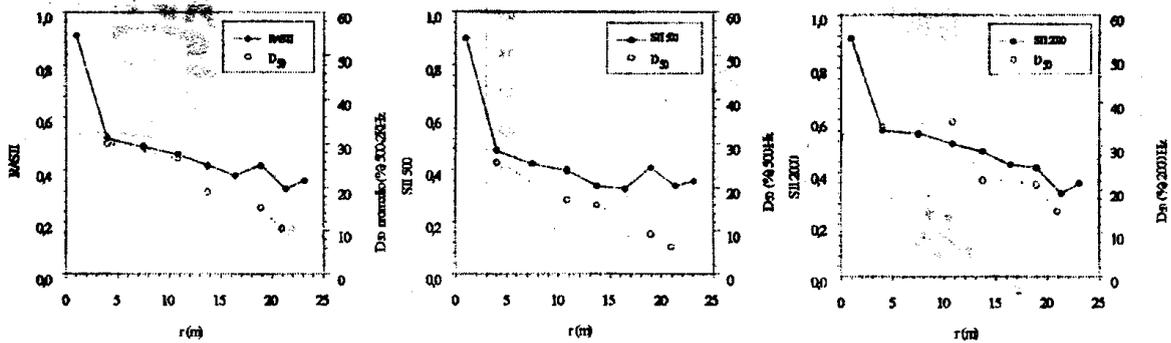


Fig. 2.- Variación frente a la distancia en la iglesia de S. Gil del RASTI, STI-500, STI-2000 y definición  $D_{50}$ .

nivel de referencia +10dB del equipo cuando el ensayo se realizó sin utilizar el sistema de apoyo electroacústico. Aunque también se realizaron medidas utilizando tal sistema, no se han considerado en este trabajo.

Los valores de  $D_{50}$  se han obtenido a partir de la respuesta al impulso. Éste se generó mediante disparos de fogeo efectuados también junto al altar. Un micrófono B&K 4165, con su correspondiente preamplificador y fuente de polarización de micrófonos del mismo fabricante, recogía la señal en cada uno de los puntos de medida y se registraba en un DAT Sony PC204. Posteriormente estas señales, en el laboratorio, se transfieren desde el DAT, a través de la salida analógica a un PC, equipado con tarjeta de sonido Sound Blaster AWE34, para ser almacenados en disco como fichero "wav". Estos ficheros son procesados en entorno MATLAB para obtener los índices correspondientes, en este caso  $D_{50}$ , para las bandas de octava de interés.

#### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Bradley<sup>8</sup>, encuentra una fuerte correlación entre los valores de  $D_{50}$  y  $C_{80}$ , y realiza un extenso análisis de las correlaciones entre  $C_{80}$  y otros parámetros acústicos para aulas. En nuestro caso hemos elegido directamente el  $D_{50}$  para estudiar este tipo de correlaciones en los espacios que nos ocupan.

En la figura 2 se muestra la variación frente a la distancia, para la Iglesia de San Gil, de los índice RASTI, STI-500 y STI-2000. En cada uno de los gráficos se ha superpuesto el valor de  $D_{50}$  correspondiente a la banda de octava y sobre el índice RASTI, se ha representado el valor medio de  $D_{50}$  de las dos bandas. Hemos optado por utilizar el valor promedio para mantener la analogía con el método de cálculo del índice RASTI, dado que existe una fuerte correlación entre este valor promedio y el correspondiente  $D_{50}$  en banda ancha, según se muestra en la figura 3.

Hay que señalar que el resto de los recintos analizados tienen comportamientos análogos al de la iglesia de San Gil, si bien el índice RASTI presenta, en general, un comportamiento más regular que el  $D_{50}$ , que puede sufrir algunas fluctuaciones entre puntos relativamente próximos.

En las figuras 4, 5, y 6 se ha representado los valores RASTI, STI-500 y STI-2000 frente a los obtenidos para la correspondiente definición  $D_{50}$  en todos los recintos objeto del trabajo. En ellas se ha utilizado el mismo símbolo para los resultados correspondientes a una misma iglesia.

Hemos observado que, en general, la variación frente a la distancia de los índices analizados presentan tendencias similares lo que es un primer indicio de que estos parámetros pueden ser utilizados indistintamente para caracterizar la inteligibilidad en estos espacios.

La correlación entre RASTI y  $D_{50}$  es similar a la que Bradley<sup>8</sup> proponía entre  $C_{80}$  y STI para aulas, si bien hemos de señalar que los valores RASTI en este caso son menores que allí y la dispersión algo mayor, tal como muestran las figuras 4, 5 y 6. De hecho, la curva de regresión que aparece, es también de orden 3 con un coeficiente de correlación múltiple de 0.78. Hay que tener en cuenta que si bien la tipología de los recintos estudiados es análoga presentan fuertes diferencias entre sí tanto desde el punto de vista geométrico (volúmenes desde 3950 hasta 8700m<sup>3</sup>), como de los acabados interiores.

Comportamientos similares se observan, entre los índices respectivos, en la banda de 500 y 2000 Hz, con correlaciones similares, algo menor (0.66) en la banda de 500 Hz.

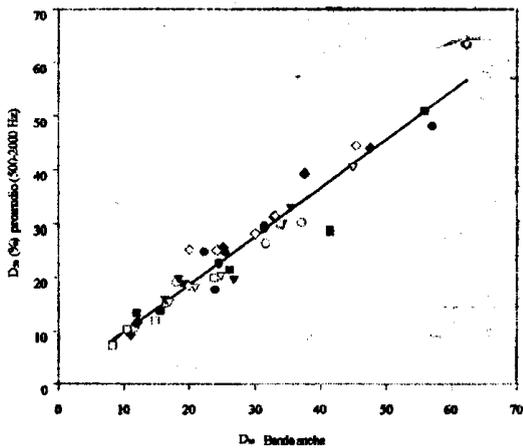


Fig. 3.- Correlación de  $D_{50}$  en banda ancha y  $D_{50}$  promedio.

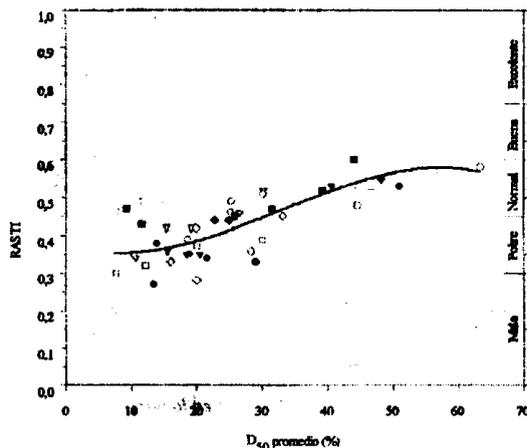


Fig. 4.- Correlación del RASTI y la definición.

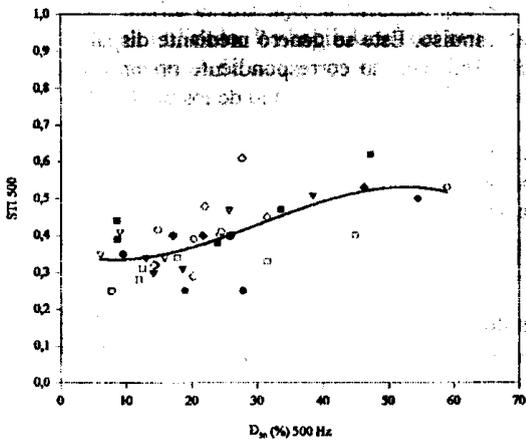


Fig. 5.- Correlación del STI-500 y  $D_{50}$  en la banda de 500 Hz.

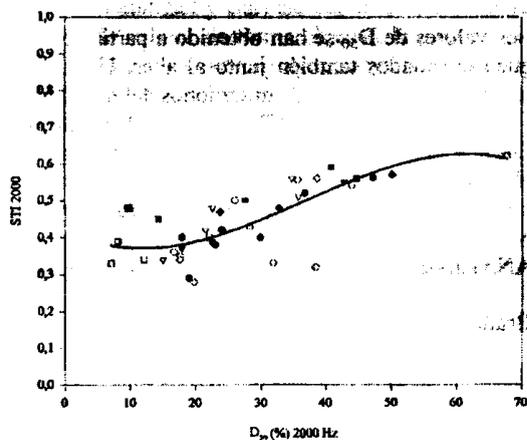


Fig. 6.- Correlación del STI-2000 y  $D_{50}$  en la banda de 2000 Hz.

Los resultados aquí presentados corresponden a una serie de medidas realizadas con otros propósitos y en la que se hecha en falta un mayor número de datos, sobre todo de  $D_{50}$ . En la actualidad nos estamos planteando realizar una nueva campaña de toma de datos *in situ* en estos recintos mucho más exhaustiva.

## REFERENCIAS

1. D. Angulo, "Arquitectura Mudéjar Sevillana de los Siglos XIII, XIV, XV" Ayuntamiento de Sevilla (1983).
2. J. J. Sendra, T. Zamarreño, "El Campo Sonoro en las Iglesias Gótico-Mudéjares con Cubierta de Madera: Aplicación del Modelo de Barron" *TecniAcústica* 87-90 La Coruña (1995)
3. T. Zamarreño, M. Galindo, S. Girón, "Predicción de Índices Acústicos en las Iglesias Gótico-Mudéjares" XXVI Reunión Bional de la Real Sociedad Española de Física y Química, Las Palmas de Gran Canaria. 25-26 (1997).
4. J.J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro, "An Analytical Model for Evaluating the Sound Field in Gothic-Mudéjar Churches", *Computational Acoustic and Its Environmental Applications*, 139-148 (1997)
5. R. Thiele, "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruckschläge in Räumen", *Acustica* 3, 291-302, (1953)
6. T. Houtgast, H.J.M. Steeneken, "The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility", *Acustica* 28, 66-73, (1973)
7. H.J. M. Steeneken, T. Houtgast, "RASTI: A Tool for Evaluating Auditoria", *B & K Technical Review* 13-30 (1985).
8. J. S. Bradley, "Speech Intelligibility Studies in Classrooms", *J. Acoust. Soc. Am.* 80 (3) 846-854, (1983)