

CANALONES HIDRÁULICOS EN LOS TEJADOS DE LA MEZQUITA DE CÓRDOBA.

José Roldán Cañas, Luis Pérez Urrestarazu y Fátima Moreno Pérez
Universidad de Córdoba

La superficie total de los tejados de la Mezquita, Catedral por añadidura, de Córdoba se extiende sobre unos 16.0000 m². Desde su primera construcción allá por el siglo VIII, constituyó motivo de especial interés la impermeabilización de sus componentes y, aún de mayor relevancia, el diseño adecuado de las canaletas para evacuar rápidamente y sin que se formen bolsas de retención, el caudal de escorrentía generado sobre tan importante cuenca hidrológica.

El objeto de este trabajo es determinar si la sección y pendiente de estas canales son suficientes para el cometido hidráulico para el que han sido diseñadas. Otros aspectos de carácter constructivo y ornamental quedan fuera de la intención de los autores.

Antecedentes.

No hemos encontrado en la literatura ningún estudio que analice hidráulicamente los tejados de la Mezquita. La más amplia referencia a las cubiertas se encuentra en Nieto Cumplido (1979, 1998), donde se señala que, al realizar unas obras en 1975 donde se demolieron unas bóvedas, se comprobó que los muros sobre las arquerías habían sido recrecidos con ladrillo sobre su nivel original. Dentro de la fábrica se descubrió el primitivo canal de desagüe situado 1,20 m por debajo del actual (ver figura 1). Según el autor, su escasa capacidad pudo haber sido la causa de desbordamiento del agua en época de lluvias abundantes. Al penetrar hacia el interior provocó el pudrimiento de las cabeceras de las vigas originales.

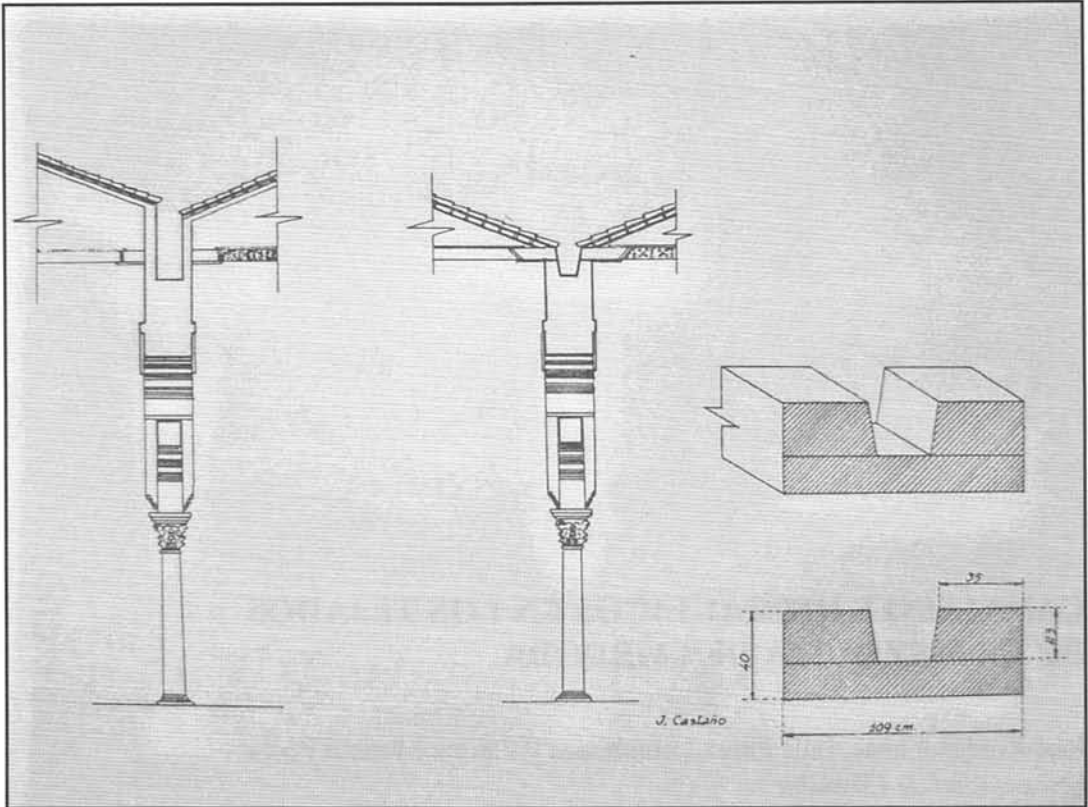


Figura 1. Canaleta primitiva de desagüe (Fuente: Nieto Cumplido, 1979)

Según este autor, el recrecimiento del muro sobre las arquerías tuvo motivos tanto constructivos (el radio de las bóvedas) como hidráulicos (buscar una mejor solución a los desagües). El recrecimiento de las naves se aprecia en la fachada del Patio de los Naranjos donde, por encima de la cornisa primitiva, se observa un antepecho muy alto para ocultar las cubiertas.

El arquitecto D. Félix Hernández publicó en 1928 un trabajo sobre la techumbre original de la Mezquita, existente antes del embovedamiento realizado en el siglo XVIII (entre 1713 y 1723) en el que estudia la disposición de los techos y la ornamentación de vigas y tableros conservados hasta entonces. Sus conclusiones permiten asegurar que corresponden al periodo califal (segunda mitad del siglo X) y las mismas, que no sufrieron importantes modificaciones hasta el mencionado siglo XVIII, fueron descritas por al Idrisi en el siglo XII, Ambrosio de Morales en el XVI y por Gómez Bravo en el XVIII. Las falsas bóvedas fueron derribadas en los últimos años del siglo XIX por Ricardo Velázquez Bosco y sustituidas en parte, en una polémica restauración, por techumbres planas a imitación de las del siglo X.

Sin embargo, Torres Balbás (1936) cree que debió ser objeto de numerosas reparaciones pues, según éste autor, estaba labrada en un material, madera, de poca duración si hay goteras. Para corroborar lo anterior, cita una carta de Alfonso X fechada el 20

de julio de 1261, guardada en el archivo de la Catedral de Córdoba, en la que el monarca dispone que todas las iglesias del obispado vengán a reparar “*lo mucho dannado en la madera et que era de adobar en muchas guisas en la Iglesia de Santa María de Córdoba ca si non serie mengua en se podrer tan noble Iglesia*”. Hay que hacer notar que al ser conquistada Córdoba, la Mezquita fue consagrada como Catedral y se le dio el nombre de Santa María la Mayor. Ciertamente en la carta sólo se constata un hecho, que la madera estaba dañada, y se pide la colaboración de todos: *freyres predicadores, frayres menores, Alcaldes y omes bonos de la villa*.

Por el contrario, Hernández señala que ni Fernando III ni Alfonso X debieron acometer esta empresa por cuanto lo que a ellos pudo importarles, y aún parece que les vino largo, fue habilitar una nave para Catedral. También expone que la madera de los tableros era de pino de muy buena calidad y, por ello, lo podrido por la humedad solo afectaba a los extremos.

De la descripción de Ambrosio de Morales no se deduce que las canales originales fueran de limitada capacidad hidráulica ya que cita que los tejados tienen unos caballetes en lo alto que vierten a uno y otro lado. Entre cada dos tejados corre una gran canal de plomo donde vierten los dos tejados, de una parte y otra. Según Morales, en las canales de plomo “*cabían muy bien dos hombres echados juntos en ellas y casi también pueden andar juntos por ellas*”.

Así pues, si los tejados y elementos de desagüe se mantuvieron tal cual durante casi ocho siglos con el único resultado desfavorable de que los extremos de los tableros de madera de pino se pudrieron, no parece que el sistema previsto para evacuar el agua fuera claramente insuficiente.

Descripción de las canaletas de desagüe.

La figura 2 muestra la actual planta general de cubiertas de la Mezquita de Córdoba. Las canaletas evacúan en cualquier dirección teniendo en cuenta el entramado de capillas y cruceros que sobresalen sobre el caballete de tejados. Las conducciones salvan por debajo los obstáculos que encuentran en su camino (ver figura 3).

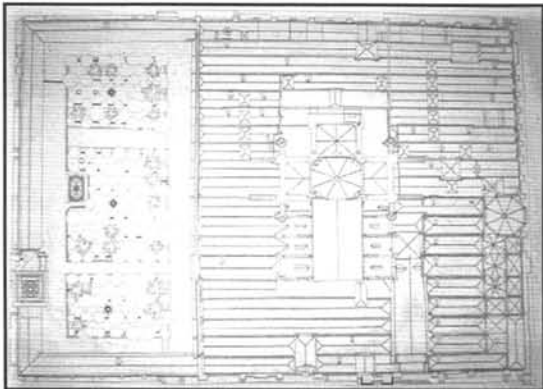


Figura 2. Planta General de Cubiertas
(Fuente: Rebollo Puig y
Ruiz Cabrero, 2005).

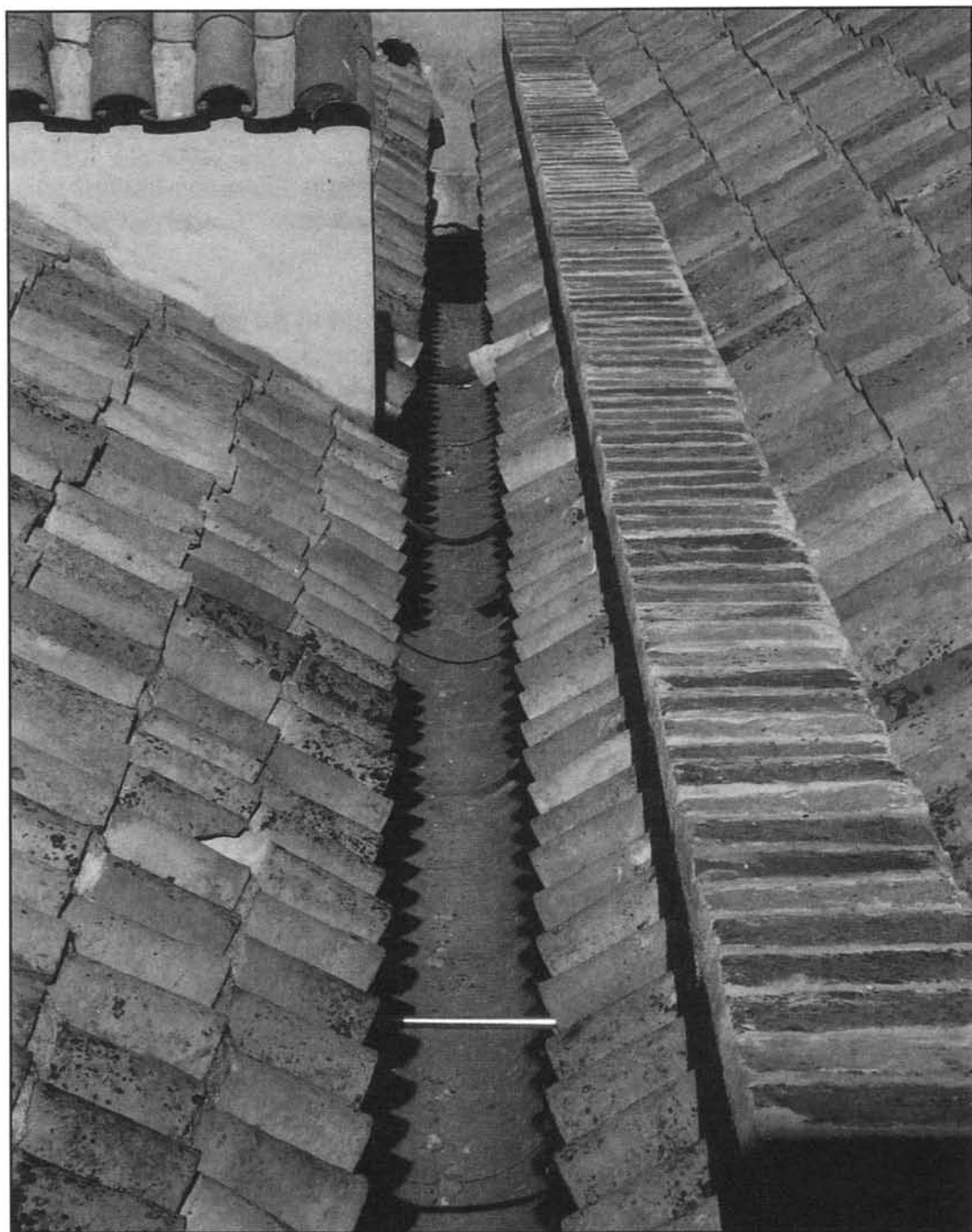


Figura 3. Detalle de paso inferior de canaletas (Foto: J. Roldán, 2005).

Las actuales canaletas conservan el fondo de plomo y tienen una forma semicircular que se prolonga verticalmente hacia arriba adquiriendo la forma rectangular (ver figura 4). Como se puede apreciar en la figura 5, la manera de evacuar el agua desde los tejados hasta las canaletas así como el material que las conforma, es como lo describe Ambrosio de Morales en el siglo XVI por lo que este estudio podría ser también de aplicación a los desagües originales.

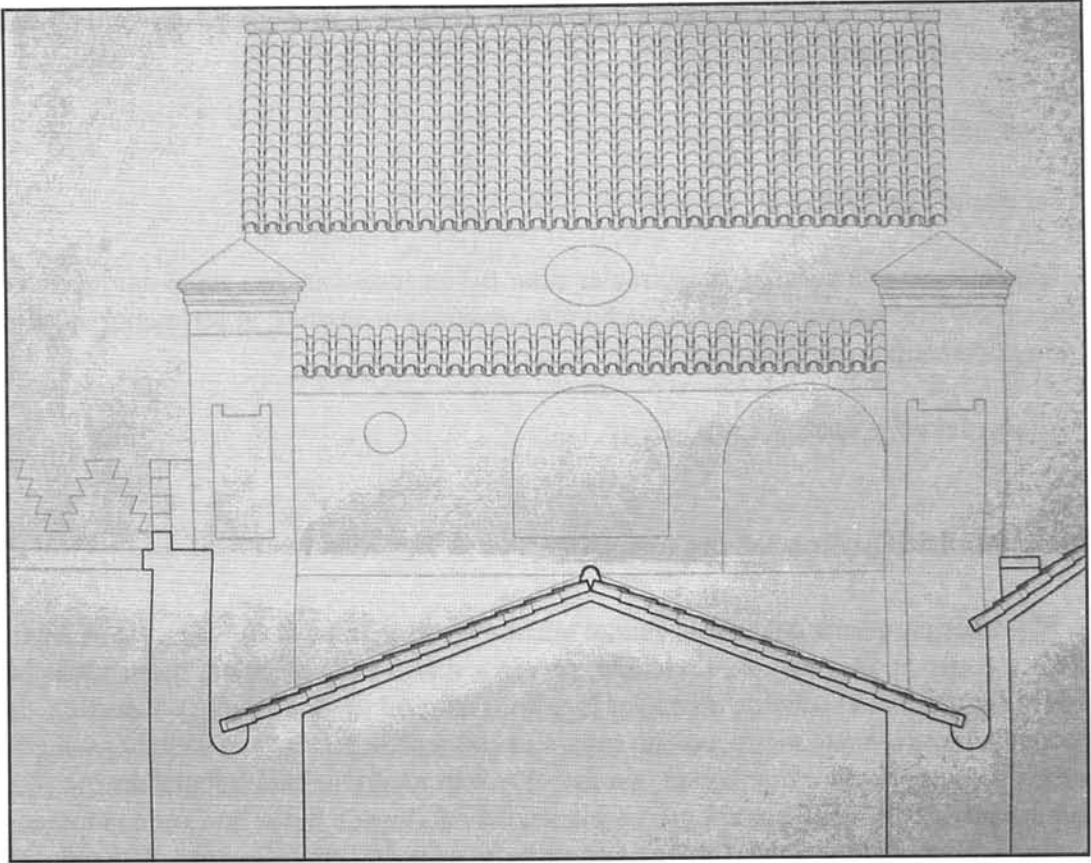


Figura 4. Alzados de los tejados (Fuente: Rebollo Puig y Ruiz Cabrero, 2005)

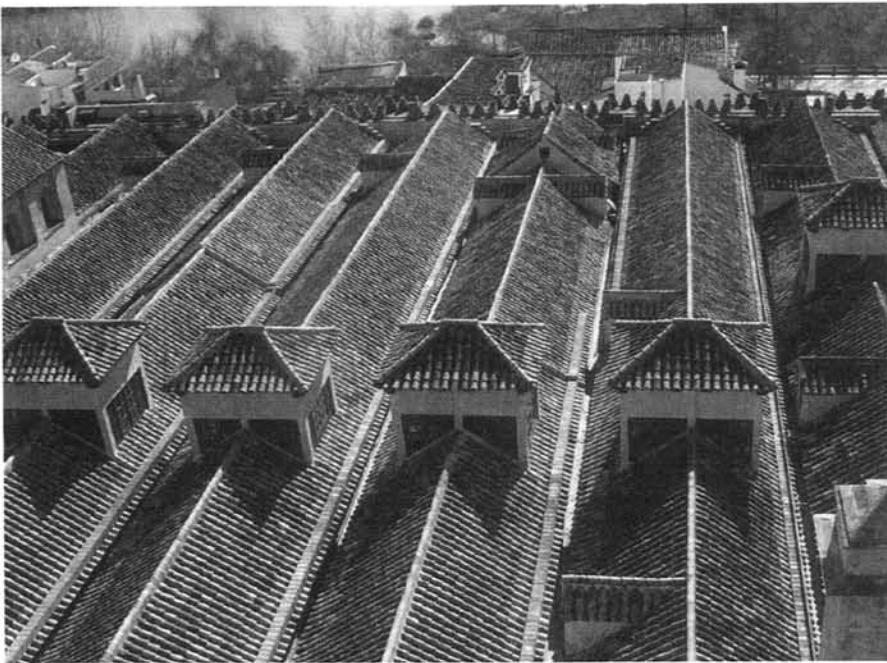


Figura 5. Disposición de los tejados (Foto: J. Roldán, 2005)

Para el presente estudio se va a utilizar como ejemplo la canaleta de mayor longitud cuyas características son:

- Longitud: 60 m
- Pendiente: 2.5 % ($[2.18 - 0.7]/60$)
- Diámetro de una sección semicircular tipo: 0.3 m (esta canaleta tiene una anchura mayor, 0,47 m, pero se escoge el ancho más común que además, al ser menor, resulta hidráulicamente más desfavorable)
- Alturas inicial y final: 0.7 m; 2.18 m

Análisis hidráulico de las canaletas.

El primer paso sería calcular el caudal máximo que tendría que ser capaz de evacuar. Para escoger el caso más desfavorable, se van a realizar los cálculos, como ya se ha comentado, sobre el canalón de mayor longitud (unos 60 m) por lo que la superficie de recogida de aguas que vierte a dicho canalón vendrá dada por las dos superficies inclinadas de la techumbre que lindan con éste. De este modo, se está trabajando con una superficie de 540 m² (60 m x 9 m). La intensidad máxima de lluvia en Córdoba tomando un período de retorno de 10 años está en torno a los 40 L/m² a la hora. Tomando en consideración estos dos datos, se obtiene un volumen a evacuar de 540 x 40 = 21600 L en una hora lo que equivale a un caudal máximo a evacuar de $Q_m = 0.006$ m³/s.

En la figura 6 se puede apreciar un esquema de un canalón. Se trata de una sección semicircular ($D = 0.3$ m) de plomo, siendo la parte superior de cemento visto y de una altura variable que va desde unos 0.5 m a algo más de 2 m. Los coeficientes de Manning de ambos materiales son muy parecidos por lo que consideraremos el mismo valor: $n_1 = n_2 = 0.012$.

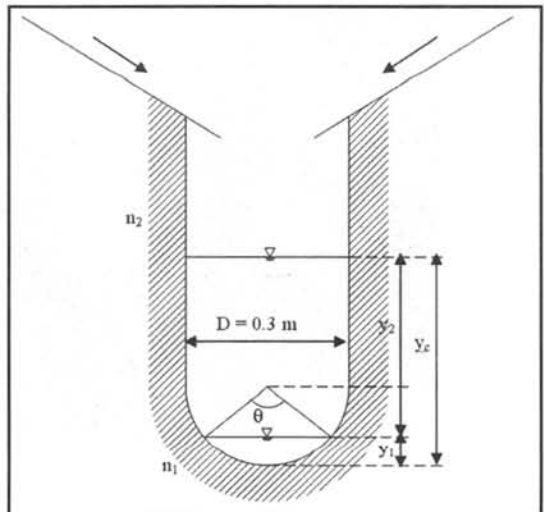


Figura 6. Esquema de un canalón

De este modo, para el cálculo del caudal que discurrirá por el canalón se darán dos casos distintos, uno en el caso de que el calado sea igual o inferior a 0.15 m (sección semicircular) y otro cuando sea superior (sección compuesta semicircular-rectangular).

Aplicando la ecuación de Manning (Losada, 2000):

$$Q = \frac{1}{n} w R^{2/3} I^{1/2} \quad (1) \quad \begin{cases} y < 0.15 \text{ m} \\ y < 0.15 \text{ m} \end{cases}$$

1) Para el primer caso:

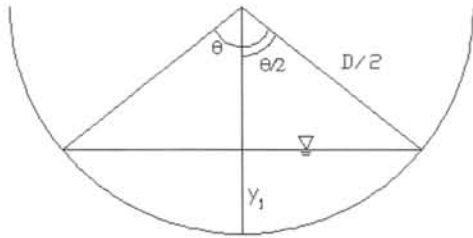
sección mojada: $w_1 = \frac{D^2}{8} (\theta - \text{sen } \theta)$ (2) perímetro mojado: $p_1 = \frac{\theta D}{2}$

radio hidráulico: $R_1 = \frac{W_1}{P_1} = \frac{D^2/8(\theta - \text{sen } \theta)}{\theta D/2} = \frac{D}{4} \left[1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta} \right]$ (3)

siendo θ el ángulo en radianes que forma la unión del centro del semicírculo con los puntos donde la superficie libre del agua toca las paredes.

Sustituyendo en (1) las ecuaciones (2) y (3), siendo $n = 0.012$ y tomando como pendiente aproximada 2.5 % ($I = 0.025$), se tiene:

$$Q_1 = \frac{1}{0.012} \cdot \frac{0.3^2}{8} (\theta - \text{sen } \theta) \cdot \left(\frac{0.3}{4} \left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta} \right) \right)^{2/3} \cdot 0.025^{1/2} = 0.026 \frac{(\theta - \text{sen } \theta)^{5/3}}{\theta^{2/3}} \quad (4)$$



$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{D/2 - y_1}{D/2}$$

$$\theta = 2 \arccos \left(1 - 2 \frac{y_1}{D} \right) = 2 \arccos(1 - 6.66 y_1) \quad (5)$$

Sustituyendo (5) en (4):

$$Q_1 = 0.026 \frac{(2 \arccos(1 - 6.66 y_1) - \text{sen}(2 \arccos(1 - 6.66 y_1)))^{5/3}}{[2 \arccos(1 - 6.66 y_1)]^{2/3}} \quad (6)$$

2) Cuando $y > 0.15$ m:

sección mojada: $w_2 = \frac{\pi D^2}{8} + D y_2 = 0.3 y_c - 0.0546$ (7)

perímetro mojado: $P_2 = \frac{\pi D}{2} + 2 y_2 = 2 y_c - 0.1287$

$$\text{radio hidráulico: } R_2 = \frac{w_2}{P_2} = \frac{0.3 y_c - 0.0546}{2 y_c - 0.1287} \quad (8)$$

Sustituyendo en (1) las ecuaciones (7) y (8), siendo $n = 0.012$ y tomando como pendiente aproximada 2.5 % ($I = 0.025$), se tiene:

$$Q_2 = \frac{1}{0.012} \cdot (0.3 y_c - 0.0546) \cdot \left(\frac{0.3 y_c - 0.0546}{2 y_c - 0.1287} \right)^{2/3} \cdot 0.025^{1/2} = 13.17 \cdot \frac{(0.3 y_c - 0.0546)^{5/3}}{(2 y_c - 0.1287)^{2/3}} \quad (9)$$

En el caso más desfavorable, cuando el canalón esté desaguando al máximo de su capacidad, el calado total y_c estará en torno a 2 m. De este modo, introduciendo este dato en la ecuación (9) se obtendrá el caudal máximo que se podrá evacuar:

$$Q_{\text{máx}} = 1.945 \text{ m}^3/\text{s}$$

Comparando el valor obtenido con el caudal máximo a evacuar calculado anteriormente ($Q_m = 0.006 \text{ m}^3/\text{s}$), se puede deducir que el canalón tiene una capacidad sobrada para desaguar en cualquier caso.

En un supuesto más desfavorable, si consideráramos que sólo evacua agua el canalón propiamente dicho (la sección semicircular de plomo), se tendría un calado máximo de 0.15 m y sustituyendo en (6) obtenemos el caudal:

$$Q_{\text{máx}} = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este valor sigue siendo suficiente para evacuar el caudal máximo obtenido.

Agradecimientos.

Los autores quieren agradecer a los arquitectos D. Gabriel Ruiz Cabrero y D. Gabriel Rebollo Puig la colaboración prestada facilitando los planos de cubiertas de la Mezquita que aparecen en el texto. Asimismo, al arquitecto técnico D. Rafael García Santaella por proporcionarnos los datos de las canaletas así como acompañarnos en la visita a los tejados que nos autorizó el Cabildo de la Catedral a quien también se lo agradecemos. Por último, al Profesor D. José Luis del Pino García por ponernos al alcance la bibliografía medievalista.

Bibliografía.

Textos Consultados

- **GÓMEZ BRAVO, J. 1778.** *Catálogo de los Obispos de Córdoba y breve noticia histórica de su Iglesia Catedral, y Obispado / Reimp. de la 1ª parte e impresión de la 2ª, con un Apéndice de los Obispos que lo han sido de esta ciudad después de la muerte del autor.* Córdoba, en la Oficina de Juan Rodríguez.
- **HERNÁNDEZ, F. 1928.** “La techumbre de la Gran Mezquita de Córdoba. Archivo Español de Arte y Arqueología”, tomo IV:191-225. Centro de Estudios Históricos. Madrid.
- **LOSADA VILLASANTE, A. 2000.** *El riego. Fundamentos hidráulicos.* Ed. MundiPrensa. Madrid.
- **MORALES, A. 1575.** *Crónica General de España.* Tomo X. *Antigüedades de las ciudades de España.* P.61; reimpresa por A. Ponz, *Viage de España*, Madrid, 1792, t. XVI.
- **NIETO CUMPLIDO, M. 1979.** “Aportación arqueológica de las techumbres de la Mezquita de Abderraman I”. Cuaderno de Estudios Medievales, Universidad de Granada, 271-273.
- **NIETO CUMPLIDO, M. 1998.** *La Catedral de Córdoba.* Obra Social y Cultural de Cajasur, Córdoba.
- **TORRES BALBÁS, L. 1936-1939.** “La techumbre de la Mezquita de Córdoba”. *Al-Andalus. Revista de las Escuelas de Estudios Árabes de Madrid y Granada.* Vol. IV:171-173.