

El acueducto de la acequia real en la Alhambra de Granada: análisis constructivo y estructural

Javier Suárez
Laura Cirera

El acueducto de la acequia real de la Alhambra de Granada posibilita el paso del agua a través del barranco del Rey Chico, desde los jardines del Generalife a la ciudadela nazarí, mediante un canal sobre fábrica de piedra en arco de medio punto. Se trata de un elemento constructivo de gran importancia en el célebre sistema hidráulico alhambrense.

El presente trabajo expone una metodología para el análisis de construcciones históricas, y la aplicación de la misma al citado acueducto.

La metodología expuesta se desarrolla mediante las siguientes fases:

- Estudio documental del contexto histórico y de las circunstancias en las que la obra fue concebida y construida.
- Aproximación al proceso de proyecto constructivo.
- Análisis estructural de la construcción histórica, mediante identificación de patologías, estudio de estabilidad y determinación de la seguridad.
- Sugerencia de medidas para la conservación y mantenimiento de la obra.

La belleza y vistosidad de la obra en su entorno, la simplicidad y perfección de su geometría, y la fácil accesibilidad a la misma, dada su ubicación en pleno centro urbano de la ciudad de Granada, la convierten en el objeto de un magnífico ejercicio docente para la introducción del alumno en el análisis de construcciones históricas.

EL ACUEDUCTO DE LA ACEQUIA REAL EN EL SISTEMA HIDRÁULICO ALHAMBREÑO

La Alhambra de Granada se encuadra en un sistema urbano y espacial articulado en torno a los ríos Darro y Genil y a cuatro acequias principales, entre ellas la acequia real, que irriga el territorio alhambrense.

Muhammad I Ibn al-Ahmar, primer rey de la dinastía nazarí, en el año 1238 decidió construir la ciudad palatina de la Alhambra en la colina de la Sabika, donde ya se ubicaba desde época zirí la fortaleza de la Alcazaba, cuyo abastecimiento, aunque no está probado arqueológicamente, se realizaba a través de la Coracha, mediante acarreo del agua retenida en una pequeña represa ubicada en el cauce del río Darro, junto a la puerta de los Tableros (Pérez Asensio 2008). Dicho abastecimiento era insuficiente para la nueva ciudad palatina que se proyectaba, por lo que Muhammad I decidió construir la acequia real, cuyo trazado se esquematiza en la figura 1.

La acequia real nace en la presa del Rey, hoy conocida como presa de Jesús del Valle, situada en el cauce alto del río Darro, a 6.100 m de recorrido y 40 m de desnivel de su entrada en el Generalife. Su trazado se inicia en la margen derecha aguas abajo del río, cambiándose a la margen izquierda después de recorrer 625 metros, mediante canal elevado en el cortijo del Molino del Rey, discurriendo a partir de este por la ladera norte del Cerro del Sol, en dirección a los jardines del Generalife; tras pasar por debajo de la Silla del Moro, aparece en el Generalife en



Figura 1
Recorrido de la acequia real desde la Presa del Rey (Jesús del Valle) hasta la Alhambra. (Elaboración propia)

el interior de una vistosa mina ubicada en el patio de la sultana, pasando posteriormente al patio de la acequia. (Figura 2). «Si su recorrido anterior era el de una mera acequia de riego agrícola, desde este punto se convertía en elemento decorativo central del jardín real» (Vilar 2011).

Tras su paso por el Generalife regando huertas, jardines, baños, estanques, fuentes y dispositivos higiénicos, la acequia se dirige hacia la que fue su finalidad principal, el abastecimiento del recinto fortificado de la Alhambra, para lo que es necesario salvar a suficiente cota el barranco del Rey Chico, lo que exigía la construcción de un acueducto, junto a su elemento protector, la Torre del Agua. (Figura 3).

La necesidad de regar huertas a mayor cota, como la de la mercería, originó sucesivas ampliaciones del

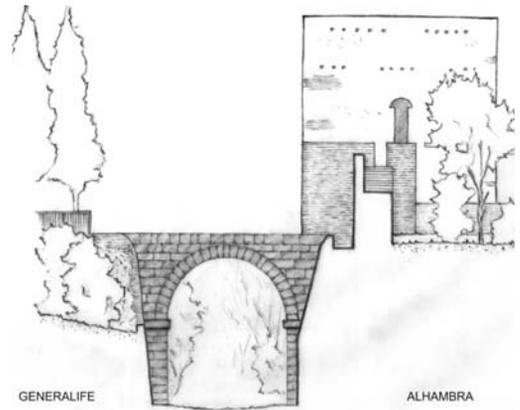


Figura 3
Para pasar de los jardines del Generalife al recinto de la Alhambra, la acequia real cruza el Barranco del Rey Chico a través del acueducto ubicado junto a su elemento protector, la Torre del Agua. (Elaboración propia)

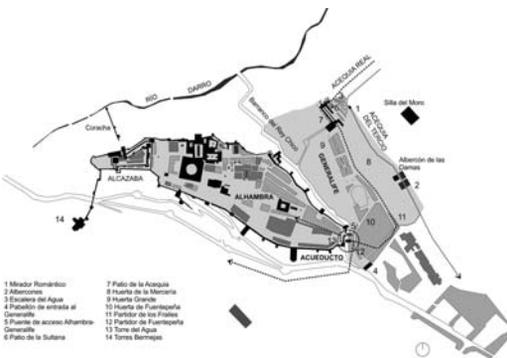


Figura 2
Recorrido de la acequia real a través de los jardines del Generalife y acceso al recinto de la Alhambra mediante el acueducto del Barranco del Rey Chico. (Elaboración propia)

sistema hidráulico alhambrense; construyéndose en el siglo XIV, el albercón de las Damas, alimentado por un complejo sistema de canales, pozos y una noria de sangre; y en el siglo XX, los albercones de Torres Balbás (1926) y de Prieto Moreno (años sesenta). (Malpica Cuello A. 1991 y 2002).

A unos 2.840 metros de su nacimiento, en el paraje conocido como Carmen del Partidor, se derivó del curso principal un tercio de su caudal, mediante el ramal llamado acequia del tercio, que al discurrir a menor pendiente que la acequia madre, alcanza cotas más altas, permitiendo el riego de fincas a mayor altura, como la ya citada huerta de la mercería.

La acequia del tercio se introduce en el recinto del Generalife junto al mirador romántico, a cota 12 m superior a la de la acequia real, abasteciendo la escalera del agua y el albercón de las damas, y reincorporándose parte de ella al cauce principal antes de su entrada en la fortificación.

Mediante su distribución en los partidores de los frailes y de fuentepeña, antes de llegar a la fortaleza de la Alhambra, parte del agua de la acequia real se deriva para abastecer el Carmen de los Martires y los barrios del Mauror y la Antequeruela. (Vilar, 2011).

Con el paso del tiempo algunos tramos de la acequia real se fueron perdiendo, lo que hizo necesaria la construcción del actual sistema de abastecimiento, que a través de un partidor situado junto al mirador romántico, surte la mina de entrada de aguas ubicada en el patio de la sultana, respetando el trazado histórico de la acequia a través de los jardines del Generalife. (Salmerón 2008).

Excavaciones arqueológicas realizadas en 2008, en el tramo anterior al arca de fuentepeña bajo el pavimento del paseo de los cipreses, muestran los restos de tres acequias, correspondientes a diferentes periodos históricos, y a sucesivas elevaciones de nivel del terreno adyacente: la primigenia de tapial, identificada con la abierta por Muhammad I en época nazarí; la de época moderna, sobre pavimento de grandes piedras; y la contemporánea, bajo bóveda, construida por Torres Balbás y actualmente en uso. (Pérez Asensio 2008).

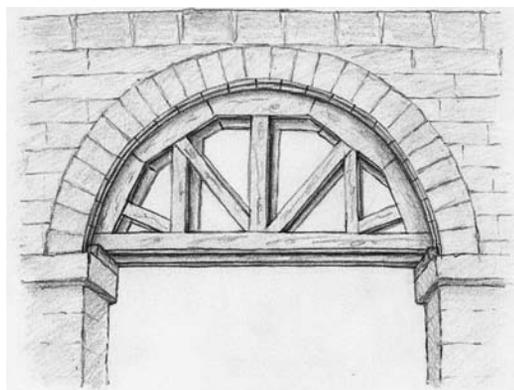


Figura 4
Hipotética disposición constructiva de cimbra de madera sobre impostas para la colocación de dovelas y formación del arco en fábrica de sillares de piedra. (Elaboración propia)

Para salvar el barranco del Rey Chico, antiguo foso defensivo de la fortaleza, en junio de 1701, dirigida por el maestro mayor de las obras reales Antonio Velázquez Vázquez, se inició la construcción del actual acueducto en arco de piedra, objeto de este trabajo, encajado entre muros de mampostería ataludada reparados en época de los Reyes Católicos, en el mismo emplazamiento, aunque a mayor cota, que el antiguo arco de argamasa nazarí (Villar 2011).

No es probable que la obra resultara afectada por la voladura de los franceses en 1812, al no tenerse noticias de la construcción de nuevos acueductos en época contemporánea (Pérez Asensio 2008).

MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE GRANADA

A diferencia de otras regiones españolas, en las que la mayor parte del patrimonio monumental está constituido por rocas plutónicas (principalmente graníticas), el contexto geológico de Andalucía Oriental ha propiciado el uso frecuente de rocas carbonáticas. En las proximidades de la ciudad de Granada se sitúan dos canteras que han suministrado material pétreo a lo largo de su extensa historia arquitectónica: la cantera de calcarenita de la Escribana, en el cortijo de Santa Pudía, y la cantera de travertino de Alfacar. (Urosevic 2011).

La cantera de la Escribana, hasta su cierre en 1994, proporcionó la calcarenita denominada piedra franca, material utilizado en construcciones patrimoniales singulares como la Catedral de Granada, Palacio de Carlos V, Monasterio de San Jerónimo, Hospital Real y Real Chancillería. Tras su cierre, las actividades extractivas se trasladaron a la cantera de Escúzar, también conocida como Las Parideras, situada igualmente en el cortijo de Santa Pudía, en la que se han seguido explotando calcarenitas utilizadas recientemente en la restauración de la Mezquita de Córdoba, o en el Palacio de las cinco llagas de Sevilla.

El travertino extraído de la cantera de Alfacar, procedente de depósitos cuaternarios sobre materiales de la cuenca intramontañosa en el borde noroeste de la depresión de Granada, ha sido utilizado en la construcción del Monasterio de San Jerónimo, Hospital Real, Iglesia de San Justo y Pastor e Iglesia del Salvador, y según la documentación de archivo (Villar 2011), fue el material empleado en 1701, en la construcción del acueducto de la Alhambra, lo que confirma el aspecto visual de la obra.

Se incluye a continuación un resumen de la caracterización petrográfica y físico-mecánica de la piedra de Alfacar. (Urosevic 2011).

Composición mineralógica y química. A partir de resultados publicados del análisis químico de litotipos extraídos de la cantera de travertinos de Alfacar, en la siguiente tabla se incluye su composición en elementos mayoritarios y determinados elementos minoritarios como Cu, Zn, Sr y Zr. La calcita es la principal fase mineral (84-100%), detectándose también cuarzo (14%), dolomita (<5%) y feldespatos (<1%).

%	Travertino de Alfacar	Ppm	Travertino de Alfacar
SiO ₂	14	Cu	6,4
Al ₂ O ₃	2,05	Zn	30,2
Fe ₂ O ₃	0,86	Sr	317
MgO	2,15	Zr	27
CaO	43,9		
K ₂ O	0,38		
P ₂ O ₅	0,08		

Tabla 1
Análisis químico del travertino de Alfacar

Características petrográficas. El estudio petrográfico de la piedra de Alfacar revela una textura de precipitación química sobre restos vegetales, donde se reconocen restos fósiles de gasterópodos, en una matriz de calcita esencialmente micrítica. Se trata de un material de elevada y heterogénea porosidad, alcanzando los poros hasta tamaños centimétricos (coqueras).

Propiedades mecánicas. En la siguiente tabla se incluyen resultados publicados de la medida en el travertino de Alfacar, de la velocidad de propagación de las ondas P y S, según tres direcciones ortogonales, y

de la estimación a partir de estas de las características mecánicas de la roca.

MODELIZACIÓN GEOMÉTRICA. ESBELTEZ DEL ARCO

La modelización geométrica de la obra, representada en la figura 7, se ha realizado mediante reconocimiento y toma de medidas in situ, y posterior ajuste de las mismas en reportaje fotográfico (figura 5), completándose con el análisis de fotografías y grabados antiguos (figura 6).

El acueducto está formado por un arco de dovelas, de medio punto, apoyado mediante impostas en estribos, soportando sendos tímpanos de fábrica, conteniendo material de relleno y un canal de piedra en su parte superior.

A pocos metros de distancia y paralelo al acueducto, se encuentra un puente peatonal que permite el acceso desde el interior del recinto de la Alhambra a los jardines del Generalife, construido en 1971 por el arquitecto Francisco Prieto Moreno, quien especifica en la memoria del proyecto su propósito de utilizar para la nueva obra, idénticas proporciones geométricas que el acueducto objeto del presente trabajo.

Con objeto de evaluar la esbeltez del arco estudiado, se han comparado las medidas obtenidas con las correspondientes a los arcos de medio punto de acueductos pertenecientes a distintos periodos históricos, como los acueductos romanos de Almuñécar y Tarracona, y el dieciochesco de San Telmo.

Aun habiendo heredado las técnicas de conducción de aguas de los pueblos de Oriente y Grecia, y de sus antecesores los etruscos, se puede decir que el acueducto, como obra de fábrica que en las conducciones de agua soporta el canal sobre el terreno mediante arcadas, es de invención romana.

Travertino de Alfacar

Densidad aparente (g/cm ³)	Velocidad de onda compresiva V _p (m/s)	Velocidad de onda de cizalla V _s (m/s)	V _p /V _s	Módulo de Young E _d (GPa)	Coefficiente de Poisson _d	Coefficiente de anisotropía			
						Total? M _p (%)	Relativa? m _p (%)	Total? M _s (%)	Total? m _s (%)
X	4571	2149	2,13	22,7	0,36				
Y	4679	2253	2,08	24,8	0,35	1,5	1,6	3,2	2,9
Z	4603	2188	2,10	23,5	0,35				

Tabla 2
Caracterización mecánica del travertino de Alfacar



Figura 5
Ajuste fotográfico de las medidas tomadas *in situ*, en los alzados norte y sur de la obra. (Elaboración propia)

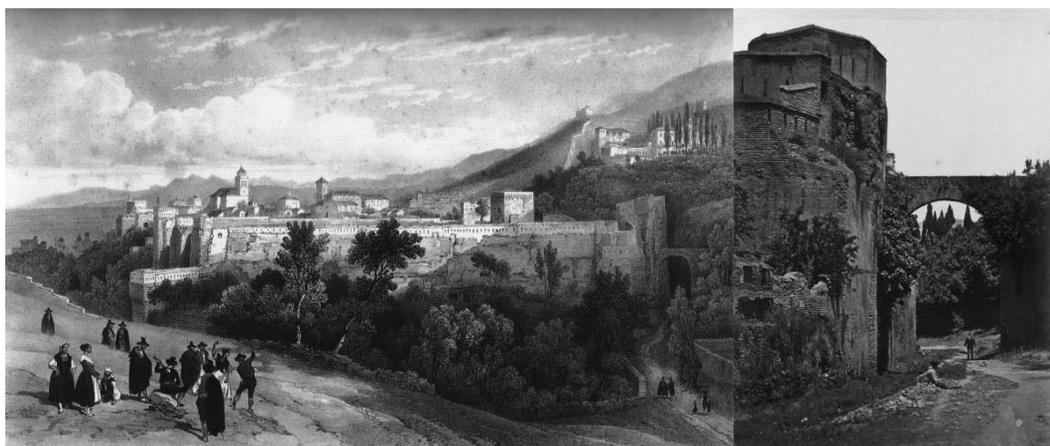


Figura 6
El acueducto de la Alhambra en fotografías y grabados antiguos. Izquierda: Vista general de la fortaleza hecha por Chapuy en 1844. (Villar 2011). Derecha: Fotografía de Clifford de 1854. (APAG/Colección fotográfica/F-05767)

El acueducto romano de Almuñécar, de su trazado original de longitud aproximada diez kilómetros, conserva actualmente en buen estado cuatro tramos, de diecinueve, seis, diez y once arcadas cada uno, algunas en dos y tres pisos. En los cuatro tramos se aprecia una normalización de sus dimensiones características, siendo la luz de los arcos principales de 4,90 m, y de 2,80 m la de los arcos secundarios. En

sección transversal se sigue una regulación de espesores, desde un ancho en las bóvedas igual a 1,45 m, hasta 1,80 m al pasar a la pila. Para el aparejo del arco se emplean lajas de piedra con longitudes de hasta 75 cm.

El acueducto de Tarragona, conocido como Puente de las Ferreras, está formado por dos niveles de arcadas, once en el inferior y veinticinco en el superior, y

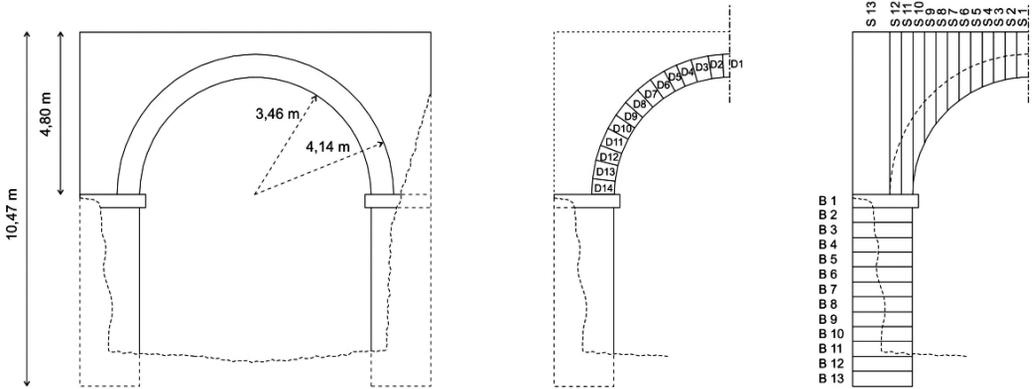


Figura 7 Modelización geométrica de la obra. (Elaboración propia)

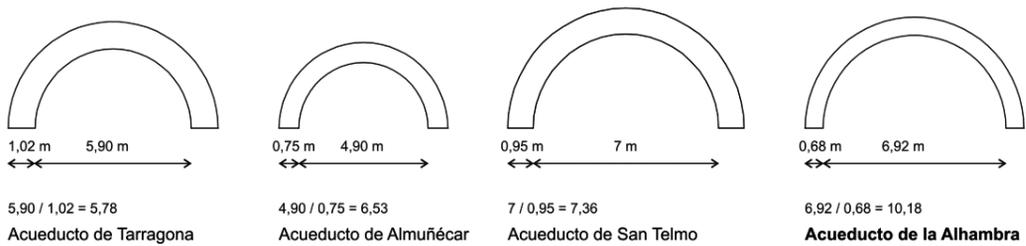


Figura 8 Factor de esbeltez en los arcos de los acueductos de Almuñécar, San Telmo, Tarragona y de la Alhambra. (Elaboración propia)

se corona a una altura máxima de 26 m, con una longitud total de unos 200 m. Los arcos están formados por bloques de piedra y tienen 5,90 m de luz, que deben corresponder a 20 pies romanos, alcanzando la distancia entre ejes de pilares 7,95 m, unos 26 pies. (Fernández Casado 2008).

El acueducto de San Telmo, en la provincia de Málaga, está considerado como la obra de ingeniería hidráulica más importante del siglo XVIII en España. Los puentes más significativos del mismo se sitúan sobre los arroyos de Humania y de Quintana, ambos construidos en fábrica de ladrillo, y de 7 metros de luz en sus arcos principales.

Considerando como factor de esbeltez la relación entre la luz y la altura del aparejo del arco, se obtienen los valores del mismo indicados en el esquema de la figura 8, en el que podemos comprobar la mayor esbeltez del arco alhambrenño.

ESTEREOTOMÍA

El acueducto de la Alhambra se sustenta sobre arco de medio punto formado por dovelas de un bloque pétreo, en disposición radial, de 0,92 m de canto, recibidos los bloques con fina capa de mortero y apareja-

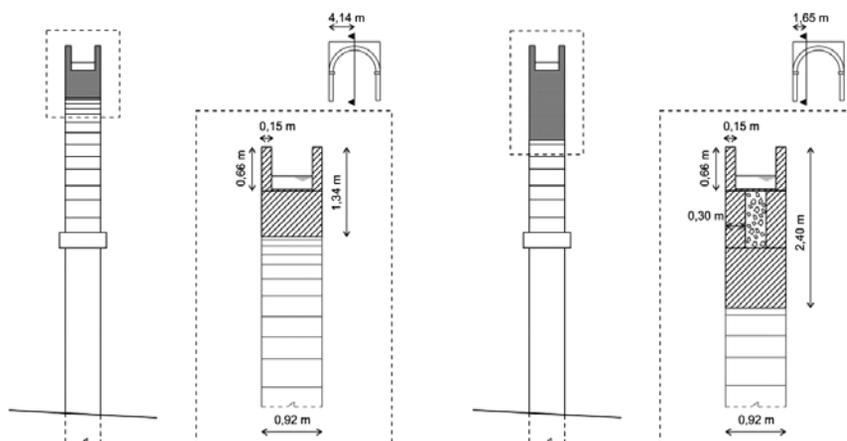


Figura 9 Secciones transversales en la clave y a/ de la luz. Detalle del canal, tímpanos y relleno. (Elaboración propia)

dos a llave. En algunas zonas se dificulta la definición de su geometría debido al deterioro que presentan las juntas. La luz del arco es de 6,92 m y su profundidad de 92 cm, espesor que se mantiene en toda la altura del acueducto. Según consta en las memorias atribuidas al maestro mayor de las obras reales, Antonio Velázquez Vázquez (Vilar 2011), la piedra procede de la cantera histórica de travertino de Alfacar.

Mediante impostas, el arco se apoya en estribos formados por obra de sillaría recta de la misma piedra tosca, en disposición horizontal, recibida con mortero y aparejada a soga y tizón. Sobre el arco se sitúan sendos tímpanos, de sillaría recta aparejada a soga, igualmente de travertino procedente de Alfacar. El cauce para la conducción del agua está formado por paramentos verticales de 15 cm de espesor y losa de 3 cm, todo ello del mismo material travertino.

PATOLOGÍA

La inspección visual detallada de la obra permite apreciar:

- Leve desplome de ambos estribos hacia el interior del arco, producido por el empuje del terreno en los paramentos laterales.

- Presencia de pequeñas fisuras longitudinales al arco, en el intradós de las dovelas próximas a la clave.
- Ausencia total de fisuras transversales al arco.
- Numerosas oquedades superficiales en la piedra.
- Deterioro de algunas juntas.

Dada la ausencia total de fisuras transversales, la presencia de pequeñas fisuras orientadas longitudinalmente en el intradós del arco se atribuye a un leve revirado del mismo, consecuencia de los empujes laterales del terreno.

DETERMINACIÓN DEL PESO PROPIO DE LOS ELEMENTOS DE LA OBRA

A partir del valor de la densidad aparente de la piedra de Alfacar (Urosevic 2011), teniendo en cuenta su elevada porosidad y la presencia de abundantes coqueas, y los valores genéricos para rocas de naturaleza caliza (Huerta 2004), en la evaluación de acciones de peso propio realizada en el presente trabajo, se ha tomado como peso específico de la piedra, 21 kN/m³. En la tabla 3 se indica el peso de los distintos elementos constructivos deducido a partir de su geometría. Se ha supuesto el espesor de los tímpanos igual a 30 cm, y el relleno entre ambos de mala calidad.

PESO ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS							
Peso específico piedra (kN/m ³): 21				Coordenadas cdg sector (m)			
Dovelas	Peso (kN)	Sectores	Peso (kN)	X	Y	Bloques estribo	Peso (kN)
D1	2,68	S1	6,57	3,9669	3,9811	B1	19,84
D2	5,26	S2	6,79	3,6212	3,9610	B2	15,30
D3	6,29	S3	7,21	3,2756	3,9215	B3	15,30
D4	5,67	S4	7,85	2,9299	3,8626	B4	15,30
D5	4,81	S5	8,73	2,5841	3,7818	B5	15,30
D6	5,86	S6	9,92	2,2387	3,6743	B6	15,30
D7	5,89	S7	11,47	1,8931	3,5364	B7	15,30
D8	6,23	S8	13,51	1,5475	3,3566	B8	15,30
D9	5,62	S9	16,32	1,2015	3,1113	B9	15,30
D10	5,52	S10	21,19	0,8526	2,6887	B10	15,30
D11	6,66	S11	27,57	0,5180	2,1691	B11	15,30
D12	5,46	S12	26,76	0,1739	2,1896	B12	15,30
D13	6,73					B13	15,30
D14	5,56	S13	83,60	0,5600	2,2512		

Peso semiarco (Tn):	7,98
Peso arco (Tn):	15,97
Peso arco más relleno (Tn):	33,45
Peso estribo (Tn):	20,76

Tabla 3

Peso de los distintos elementos constructivos deducido a partir de su geometría

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Se analiza el comportamiento estructural de la obra mediante aplicación de la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica desarrollada por Heyman (1982, 1995 y 1999), cuyos principios se resumen a continuación.

Se admiten para el material pétreo las siguientes hipótesis:

- La fábrica no presenta resistencia a tracción.
- Las tensiones son tan bajas que, a efectos prácticos la fábrica presenta resistencia a compresión ilimitada.
- El fallo por deslizamiento es imposible.

Se considera por tanto la estructura de fábrica formada por un material rígido, que resiste compresiones pero no resiste tracciones. Se supone la fábrica

formada por un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. Se suponen las tensiones bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre las piedras es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento.

Condición de estabilidad: una estructura de fábrica que cumple las hipótesis anteriores es estable, si la trayectoria de las fuerzas (línea de empujes) está contenida en la sección de la estructura; es decir, si la resultante de fuerzas en cada sección, está contenida dentro de la sección.

Coefficiente geométrico de seguridad: la seguridad será determinada en cada sección por la distancia relativa de la resultante (empuje) a sus bordes.

Teorema de la seguridad (teorema del límite inferior): si es posible dibujar una línea de empujes contenida dentro de la estructura, la estructura es segura.

Acción del relleno

La acción del relleno sobre el arco se puede considerar según alguno de los siguientes planteamientos:

- Acción vertical: se supone que la acción del relleno se ejerce verticalmente sobre el trasdós del arco.
- Acción hidrostática: se asimila el relleno a un líquido que ejerce sobre el trasdós una presión normal a la superficie del mismo, y de magnitud igual al peso de la columna de material en cada punto.
- Acción geoestática de Rankine: se tiene en cuenta el empuje del terreno y la variación de este con la profundidad y la inclinación de la curva de trasdós.

La hipótesis más habitual porque suele ser la más desfavorable, es suponer la acción vertical, tomando en consecuencia planos de corte verticales para calcular la línea de empujes.

Análisis de estabilidad de la obra

Se analiza la estabilidad de la obra determinando mediante métodos gráficos la posición de la línea de empujes en el interior de la sección de la fábrica.

Teniendo en cuenta la simetría del arco, se considera solamente la mitad del mismo, sometido en la sección de la clave al empuje horizontal E ejercido por la otra mitad. Se ha analizado el arco de dovelas descargado (ref. AD), y el arco de dovelas cargado con tímpanos, relleno y canal (ref. AC).

AD. Arco de dovelas descargado

A partir del peso de las dovelas, y del peso total del semiarco, para distintas situaciones del empuje E y de la reacción del estribo en el salmer, se ha calculado gráficamente la posición de la línea de empujes, tratando de encontrar una situación de equilibrio, en la que la misma esté contenida en su totalidad en la sección de la fábrica, con la mayor seguridad geométrica posible.

En las figuras 10 y 11 se exponen las siguientes situaciones estudiadas (ref. AD1, AD2, AD3, AD4 y AD5), incluyendo la construcción gráfica realizada para la determinación de la posición de la línea de empujes a partir del polígono de fuerzas:

- AD1. Empuje y reacción situados en el centro de la sección: la línea de empujes se sitúa fuera de la sección de la fábrica en el intradós, entre las dovelas 7 y 11.
- AD2. Empuje y reacción situados en los límites inferior y superior del tercio central de la sección: la línea de empujes se sale de la fábrica en el intradós, entre las dovelas 7 y 10.
- AD3. Empuje y reacción situados en los límites inferior y superior de la mitad central de la sección: la línea de empujes se sale de la fábrica en el intradós, entre las dovelas 7 y 9.
- AD4. Empuje situado en el límite superior del tercio central de la sección, e interacción entre las dovelas 7 y 8, situada en el límite inferior del tercio central de la sección: la línea de empujes obtenida sale de la fábrica en el trasdós del salmer.
- AD5. Empuje situado en el límite superior de la mitad central de la sección, e interacción entre las dovelas 8 y 9, situada en el límite inferior de la mitad central de la sección: la línea de empujes se mantiene en el interior de la sección de la fábrica, a una distancia mínima del borde igual a 7 cm, por lo que se obtiene un coeficiente de seguridad geométrico igual a 1,26.

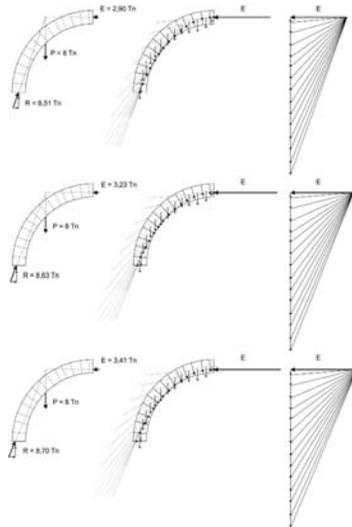


Figura 10 Referencias AD1, AD2 y AD3: Para distintas situaciones del empuje E y de la reacción del estribo en el salmer, a partir del polígono de fuerzas se calcula gráficamente la posición de la línea de empujes. (Elaboración propia)

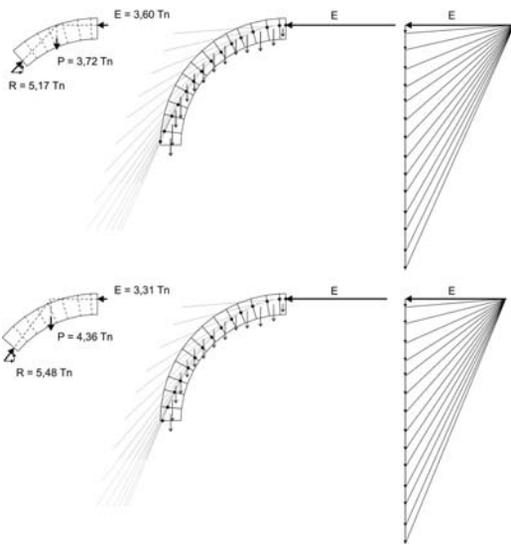


Figura 11
Referencias AD4 y AD5. A partir del polígono de fuerzas se calcula gráficamente la posición de la línea de empujes, para distintas situaciones del empuje E y de la reacción en secciones intermedias. (Elaboración propia)

AC: Arco de dovelas cargado con tímpanos, relleno y canal

Se ha considerado que la acción del relleno se ejerce verticalmente sobre el trasdós del arco, tomando planos de corte verticales para calcular la línea de empujes.

La mayor proximidad de la línea de empujes al borde de la sección de la fábrica, en el intradós de los riñones y en el trasdós del salmer, aún sin llegar a la formación de grietas, pone de manifiesto la adaptación del arco al leve acercamiento de sus apoyos como consecuencia del empuje de terreno (apreciado mediante observación in situ, y comprobado mediante nivelación de los paramentos), mediante el vuelco de los riñones, por lo que la consideración de la acción vertical del relleno está a favor de la seguridad.

Se ha considerado el semiarco descompuesto en doce sectores de espesor homogéneo; a partir del peso de los sectores, la construcción gráfica del polí-

gono funicular permite determinar la línea de acción de la resultante (figura 14).

Para distintas situaciones del empuje E y de la acción del estribo en el salmer, se ha calculado gráficamente la posición de la línea de empujes, tratando de encontrar una situación de equilibrio, en la que la misma esté contenida en su totalidad en la sección del arco, con la mayor seguridad geométrica posible.

En las figuras 12, 13 y 14 se exponen las situaciones estudiadas (referencias AC1, AC2 y AC3), incluyendo la construcción gráfica realizada para la determinación de la posición de la línea de empujes a partir del polígono de fuerzas.

- AC1 (Figura 12). Empuje y reacción situados en los límites inferior y superior del tercio central de la sección: la línea de empujes se mantiene en la sección de la fábrica, a una distancia mínima del borde igual a 4,27 cm, obteniéndose por tanto un coeficiente de seguridad de 1,14.
- AC2 (Figura 13). Empuje y reacción situados en los límites inferior y superior de la mitad central de la sección: la línea de empujes se mantiene en el interior de la sección de la fábrica, a una distancia mínima del borde igual a 6,28 cm, por lo que el coeficiente de seguridad obtenido es igual a 1,22.
- AC3 (Figura 14). Empuje y reacción situados a 11,64 cm de los límites inferior y superior de la sección: la línea de empujes se mantiene en el interior de la fábrica, a una distancia mínima del borde igual a 6,8 cm, por lo que el coeficiente de seguridad obtenido es igual a 1,25.

Se completa el análisis de estabilidad mediante la determinación de la posición de la línea de empujes en el estribo (figura 14) y la reacción transmitida al terreno en la cimentación. En la figura 15 se representa la posición de la línea de empujes en el interior de la sección de la fábrica.

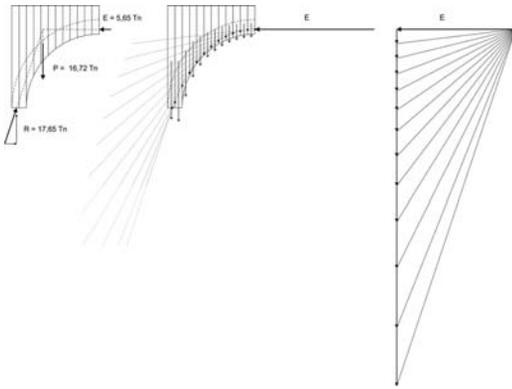


Figura 12 (Ref. AC1). Empuje y reacción en el *salmer* situados en los límites inferior y superior del tercio central de la sección

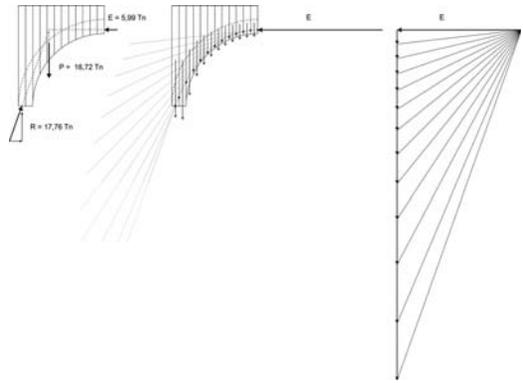


Figura 13 (Ref. AC2). Empuje y reacción en el *salmer* situados en los límites inferior y superior de la mitad central de la sección

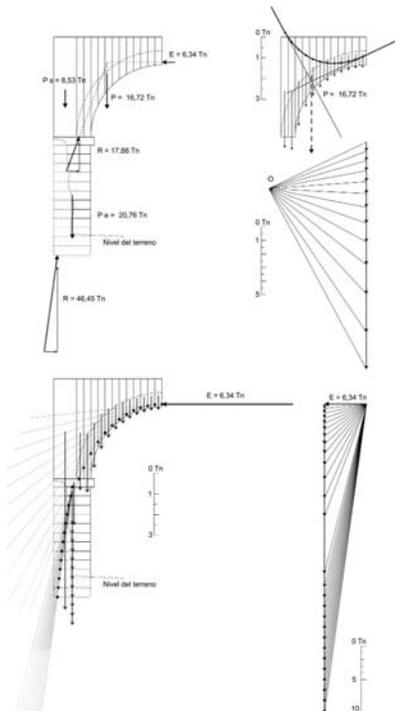


Figura 14 (Ref. AC3). Empuje y reacción en el *salmer* situados a 11,64 cm de los límites inferior y superior de la sección. Construcción del polígono funicular. Determinación de la posición de la línea de empujes en el estribo y la reacción transmitida al terreno en la cimentación

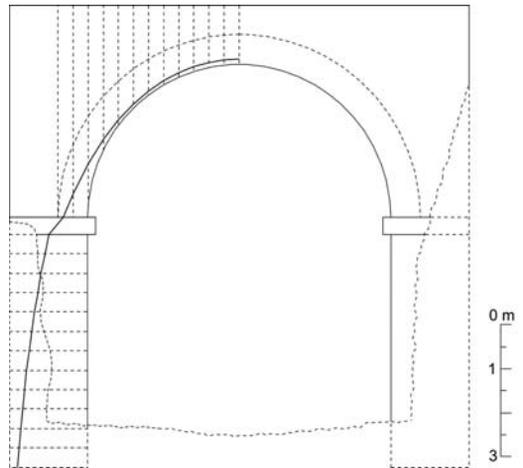


Figura 15 Posición de la línea de empujes en el interior de la sección de la fábrica

CONCLUSIONES

Se presenta el análisis de una obra hidráulica de 1701, el acueducto de la Alhambra de Granada, concebido y ejecutado para sustituir la deteriorada obra original de época nazari, la cual, debido al progresivo aumento de la cota de la acequia real, eje del célebre sistema hidráulico alhambrense, había quedado excesivamente baja.

A pesar de que en el siglo dieciocho, en el sureste de España, arcos de acueductos de similares dimensiones se construían usualmente de ladrillo, en el acueducto de la Alhambra se consigue una mayor esbeltez, mediante el empleo de una piedra tosca de gran tradición en la construcción patrimonial granadina, conocida como travertino de Alfacar.

Se presenta con carácter inédito el análisis de la estabilidad de la obra mediante aplicación de la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica desarrollada por Heyman, considerando distintas hipótesis de carga del arco, y de peso del material, obteniéndose una trayectoria de la línea de empujes contenida en su totalidad en la sección de la fábrica, con un coeficiente geométrico de seguridad superior a 1,25, lo que garantiza la estabilidad de la obra frente a pequeñas perturbaciones de las condiciones geométricas y de carga, como pueden ser las originadas por operaciones de reparación y mantenimiento.

La ausencia total de fisuras transversales y la presencia de pequeñas fisuras orientadas longitudinalmente en el intradós del arco, se atribuye a un leve revirado del mismo, consecuencia del empuje lateral del terreno. La mayor proximidad de la línea de empujes al borde de la sección de la fábrica, en el intradós de los riñones y en el trasdós del salmer, aún sin llegar a la formación de grietas, pone de manifiesto la adaptación del arco al leve acercamiento de sus apoyos como consecuencia del empuje de terreno, apreciado mediante observación in situ, y comprobado mediante nivelación de los paramentos.

LISTA DE REFERENCIAS

- APAG. Archivo del Patronato de la Alhambra y del Generalife. Granada.
- Fernández Casado, Carlos. 2008. *Acueductos romanos en España*. Colección: Ciencias, humanidades e ingeniería, 86. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Editorial Doce Calles. Madrid.
- Heyman, Jacques. 1982. *The masonry arch*. Chichester: Ellis Horwood.
- Heyman, Jacques. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera. CEHOPU.
- Heyman, Jacques. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Kooharian, Anthony. 1953. *Limit Analysis of Voussoir (Segmental) and Concrete Arches*. Proceedings of the American Concrete Institute 49 (317-328).
- Malpica Cuello, A. 1991. *El complejo hidráulico de los Albarcones (Alhambra)*. Cuadernos de la Alhambra, 27, pp. 65-101.
- Malpica Cuello, A. 2002. *La Alhambra de Granada, un estudio arqueológico*. Granada (ISBN 84-338-2834-7).
- Patronato de la Alhambra y Generalife. Archivo y biblioteca. Sistema Andaluz de Archivos. <http://www.alhambra-patronato.es/>
- Pérez Asensio, Manuel. 2008. *Intervención arqueológica en un tramo de la Acequia Real de la Alhambra*. Revista: Cuadernos de la Alhambra, vol. 43, 102-117. Patronato de la Alhambra y Generalife.
- Salmerón Escobar, P. 2008. *El Plan Director del Itinerario del agua de la Alhambra*. Revista: Cuadernos de la Alhambra, vol. 43, 8-39. Patronato de la Alhambra y Generalife.
- Urosevic, M.; E. Sebastián Pardo; E. Ruiz Agudo y C. Cardell. 2011. *Evaluación de las propiedades físicas de dos rocas carbonáticas usadas como material de construcción actual e histórico en Andalucía Oriental, España*. Materiales de Construcción, vol. 61, 301, 93-114.
- Vilar Sánchez, J. A.. 2011. *La Acequia Real de la Alhambra en época cristiana (1492-1850)*. Editorial Comares.