



ANÁLISIS TÉCNICO Y CONSTRUCTIVO DEL ACUEDUCTO ROMANO DE ALBARRACÍN A CELLA

ISAAC MORENO GALLO

1. OBJETO

El objeto de este trabajo fue examinar las principales características técnicas y constructivas del acueducto romano de Albarracín a Cella, por encargo de la Dirección General de Patrimonio, de la Consejería de Cultura de la Diputación General de Aragón. Estas labores se realizaron en el año 2007, bajo la dirección del que suscribe y con la colaboración de José Ramón Navarro Nuviala, en las labores de topografía y de Rosana Navarro Nuviala y Antonio Sarasa Broset, en el análisis hidrogeológico del agua de la captación y de los materiales sobre los que se construyó la conducción.

Se conocían algunos trabajos de tipo descriptivo sobre este acueducto¹. En el más conocido de ellos también se realizaba un análisis de la capacidad del canal² pero, esta parte del estudio, resultaba finalmente bastante imprecisa, ya que dejaba abierto el cálculo a un amplio espectro de posibilidades.

Sobre la cronología romana de este acueducto ya no se duda hoy. Aunque en algún momento se suscitó su adscripción al mundo islámico³, hoy sabemos que después de la civilización romana y hasta nuestros días nadie tuvo los conocimientos científicos su-

ficientes, ni la capacidad de planificación necesaria, para realizar una obra semejante.

De cualquier forma, aparte de la descripción de lo que se ve sobre el terreno, desde puntos de vista históricos o arqueológicos, el acueducto de Albarracín a Cella se revela como una obra de conducción de aguas técnicamente muy compleja, con indudables alardes técnicos y topográficos en su realización y de una dificultad constructiva extrema. Por ello creemos que, estos aspectos técnicos hasta ahora poco o nada tratados, suscitarán un importante interés a quien se acerque a esta obra.

2. CONCEPCIÓN GENERAL DE LA OBRA

Un acueducto de gran capacidad, de 25 kilómetros de longitud, con la mayoría de su trazado horadado en la roca, con un túnel de cinco kilómetros, uno de los más largos del mundo romano, no es una obra cualquiera, ni es concebible su destino a un uso pueril.

Aunque en lo escrito hasta hoy parecía haberse aceptado el uso industrial en molinos harineros, como destino de las aguas que se canalizaron con esta obra, la logística romana que conocemos en otras obras semejantes en el Imperio y la inteligente concepción de todas y cada una de las obras hidráulicas romanas que hemos analizado en otras partes, nos aconsejan desechar esta idea de plano.

Es cierto que en época romana se buscaban aguas con destinos variados, también para el movimiento de máquinas de fabricación de harina, el lavado de

1 CASTELLANO ZAPATER, E. 1981, p.155-170: Un acueducto romano en la provincia de Teruel (Albarracín-Gea-Cella). Teruel 66.

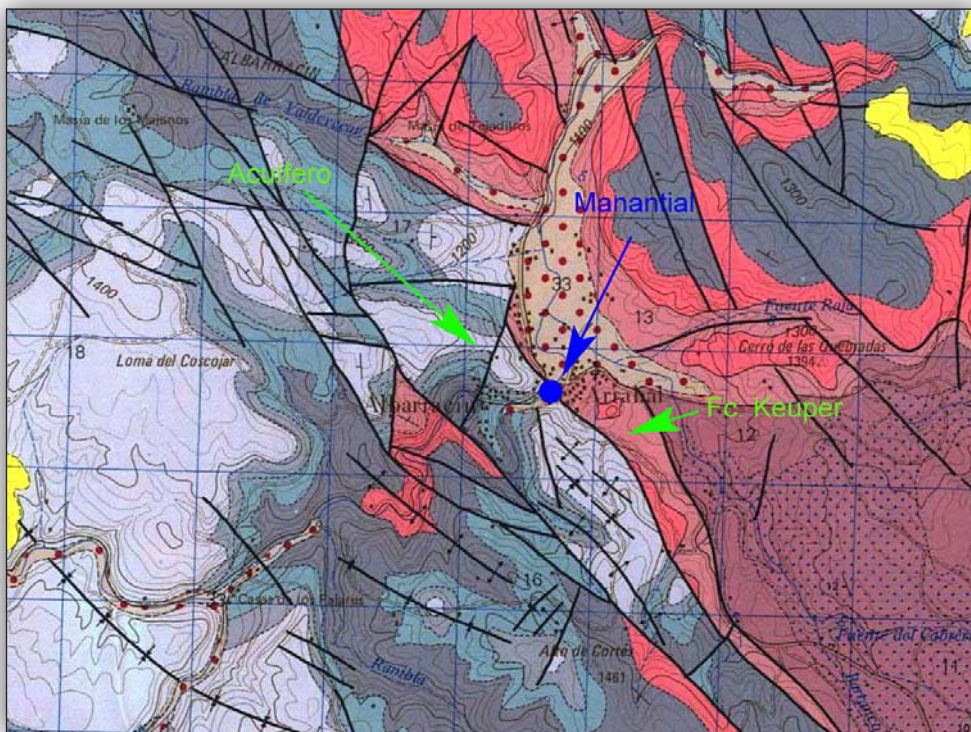
ALMAGRO GORBEA, A. 2002, pp. 213-241: *Acueducto de Albarracín a Cella (Teruel)*. Artífex. Ingeniería romana en Hispania. CEHOPU. M° de Fomento.

ALMAGRO GORBEA, A. 2002: *Acueducto romano de uso industrial de Albarracín a Cella (Teruel)*. TRAIANVS, <http://www.traianvs.net/textos/cella.htm>

2 En el anexo realizado por Francisco Navarro en:

ALMAGRO GORBEA, A. 2002, pp. 213-241: *Acueducto de Albarracín a Cella (Teruel)*... ob. cit.

3 Esa era la opinión inicial del ALMAGRO BASCH, según: CASTELLANO ZAPATER, E. 1981: *Un acueducto romano*... ob. cit.



Las fuentes sobre el mapa geológico IGME, 1983, Hoja nº 566. Cella.

minerales, el regadío de grandes zonas, etc. Pero, ni las características climáticas, ni edafológicas, ni de potencial productivo de la zona de Cella, apuntan a ninguna de estas necesidades.

Además, las características de esta conducción se verían desproporcionadas para el rendimiento de cualquiera de estos usos en esta zona del territorio.

La construcción de este tipo de instalaciones industriales, junto a una derivación del río, con suficiente salto hidráulico, hubiera sido suficiente para un elevado rendimiento de las mismas y se hubiera ahorrado el canal completo que estamos tratando.

Sin embargo, conociendo el papel que el agua de calidad tenía asignado en la vida cotidiana del mundo romano, creemos que solo el abastecimiento de una importante población pudo provocar la concepción de tal obra.

Por otra parte, debemos indicar que, los últimos y más avanzados trabajos que han tratado de la calidad del agua en el abastecimiento a poblaciones romanas, indican claramente que esta procedía con preferencia de los mejores manantiales, de aquellos que aseguraran una calidad, cantidad y permanencia suficiente⁴. Por tanto, no podemos a priori aceptar

como se indica en los trabajos hasta hoy realizados sobre este acueducto que el agua procediera del mismo río Guadalaviar⁵.

En éste caso, como en tantos otros, los ingenieros romanos buscaron el agua de calidad donde la había, al margen de la distancia y las dificultades que pudieran encontrar para canalizarla hasta su destino.

Aún hoy, observando los mapas geológicos y aplicando los conocimientos hidrogeológicos suficientes, vemos que el lugar escogido para la captación del agua no solo es el mejor, si no que prácticamente el único.

Se trata de la zona geológica de contacto entre las calizas jurásicas y las arcillas triásicas de la facies Keuper, en las proximidades de Albarracín. Zona que provoca surgencias de agua que alimentan fuentes y al propio río Guadalaviar, en cuyo lecho aflora mucho del agua que aumenta notablemente su caudal, desde el propio Albarracín hasta varios kilómetros hacia aguas abajo. Los datos aquí expresados en este ámbito se deben a la especial colaboración en este trabajo de los hidrogeólogos Rosana Navarro Nuviala y Antonio Sarasa Brosed.

Conducir las aguas desde las fuentes, en la cabecera del acueducto en la zona de Albarracín hasta el destino en Cella, obliga a la realización de una canalización de enormes dificultades. La orografía no es

4 FEIJÓO MARTÍNEZ, S. 2005: *Las presas y los acueductos de Agua Potable, una asociación incompatible en la Antigüedad: El abastecimiento en Augusta Emerita*. Publicado en *Augusta Emerita. Territorios, Espacios, Imágenes y Gentes en Lusitania Romana*. Nogales Barrasate, T. 2005 (Ed. científica). Mérida.
MORENO GALLO, I. 2007: *LIBRATIO AQVARVM. El arte romano de suministrar las aguas*. AQUARIA. Agua, territorio y paisajes en

Aragón. Zaragoza 2007.

5 Ver a modo de resumen: ALMAGRO GORBEA, A. 2002, pp. 213-241: *Acueducto de Albarracín a Cella...* ob. cit.

favorable en absoluto, tanto es así que se trata de dos cuencas hidrográficas distintas que hay que comunicar, por lo que será necesario de antemano salvar serios obstáculos naturales que el agua no pudo por sí misma, razón por la que se dirigió hacia otra cuenca desde su alumbramiento.

Por tanto, aquí no sirven los rodeos para llevar por su propio peso, por la fuerza de la gravedad, el agua hacia su destino. Solo la perforación del obstáculo que forma la línea de vertientes de ambas cuencas puede conducir al éxito de la empresa.

Evidentemente el obstáculo podría haber sido tan fuerte que ninguna perforación de magnitud razonable hubiera podido salvarlo. Puede considerarse, por tanto, que los técnicos romanos aún tuvieron suerte por el hecho de que el túnel que se vieron obligados a construir solo tuviera cinco kilómetros de longitud, ¡uno de los más largos del Imperio!, comparable, por ejemplo, al túnel de desecación del lago Fucino, obra emprendida en tiempos del emperador Claudio.

La calidad del terreno que en su trazado encontraron los técnicos romanos no siempre fue la mejor para la construcción del canal.

La roca caliza es una constante en todo el recorrido pero, la estratificación demasiado delgada o con intercalados de materiales blandos, las diaclasas abundantes en algunos tramos y otros inconvenientes, proporcionaron serios inconvenientes a la construcción de la obra y no menos a su mantenimiento, durante la vida de esta.

En otras ocasiones la compacidad y dureza de la roca, por ejemplo en las entrañas del túnel, dificultaron la operación enormemente.

Las laderas con líneas de máxima pendiente elevadas, provocaban deslizamientos de tierras por fenómenos erosivos difíciles de evitar y altamente destructivos. Cuando las tierras eran blandas era necesario construir los cajeros en fábrica con mortero de cal para que el canal fuera estable.

En los escarpes rocosos se excavaron galerías cercanas a la superficie con registros frecuentes en forma de ventana. Este método, aunque laborioso y caro inicialmente, proporcionaba una estructura del canal muy estable en los tramos de roca sana, lo que ahorraba muchos trabajos de conservación del canal tan costosos e inevitables en otros tramos.

Los tramos en túnel son siempre de muy costosa realización pero aquí, unas veces por la mala calidad de la roca, otra la presencia de grandes fisuras, otras la dureza extrema de la caliza y otros factores, lo hicieron especialmente difícil, cuando no peligroso.

A pesar de disponer de pozos de registro frecuentes, como es habitual en este tipo de obras romanas,

los de este acueducto revistieron especial dificultad, tanto por la mala calidad de la roca en la que debían ser excavados muchos de ellos, como por la enorme magnitud que alcanzaron algunos.

Aunque la gran longitud del túnel hizo variada la casuística geológica del terreno encontrado, puede decirse que en ningún punto fue favorable. En superficie, la roca muy meteorizada dificultó la excavación de los registros, en el canal, a gran profundidad, masas muy compactas de caliza, muy duras, obligaban a rodearlas o buscar ingeniosas formas de acometer la excavación de las que luego hablaremos.

Otras veces, las diaclasas de gran magnitud podían hacer peligrar la integridad de la galería en no pocos puntos.

3. LA CAPTACIÓN

Bajo el convencimiento de que la captación nunca fue del propio río Guadalaviar, ni ninguna otra esorrentía que pudiera haber sido represada a tal efecto, buscamos las fuentes que hubieran podido servir para abastecer el acueducto.

Deberían, para ello, cumplir las condiciones geométricas de cota suficiente para verter sus aguas en el canal conocido, disponer del caudal suficiente y de la calidad idónea para el fin perseguido.

En apenas unas horas de investigación dimos con ellas. En el propio pueblo de Albarracín se conocen desde tiempo inmemorial un grupo de fuentes que han dado nombre al barrio situado a la entrada de la localidad. Dos de ellas son de agua fría y otra de agua caliente, esta última conocida con el nombre de "El Escaldador".

De su calidad no hay duda, hoy mismo son las que abastecen al pueblo, bombeando su caudal a los depósitos modernos. De su caudal nos hemos asegurado que es suficiente para el canal que conocemos y para ello hemos aforado el conjunto.

El estudio hidrogeológico efectuado al efecto afirma claramente que "dado que por su situación hidrogeológica esta zona de manantío constituye el drenaje principal del acuífero, podemos señalar que se trata de un drenaje persistente y regular, de tal manera que su caudal es bastante constante en el tiempo, en el sentido de que las épocas de gran sequía no suponen una merma considerable de los manantiales, ni tampoco las grandes precipitaciones suponen grandes puntas de caudal y aportación. Es decir, su comportamiento indica que está alimentado por un importante acuífero, con una importante capacidad de regulación y una



Grupo de bombas de la captación del abastecimiento a Albarracín aprovechando los caudales del manantial que abasteció al acueducto romano a Cella.

respuesta muy amortiguada a los episodios climáticos extremos, lo que le confiere una importante garantía en lo que a su aportación se refiere. Además, en esta zona, su nivel de base debe situarse claramente por encima del nivel del río, ya que según las indicaciones del personal encargado de la distribución de agua de la localidad, en los momentos de crecida del río Guadalaviar, éste no afecta a los manantiales de ese entorno (cuya manifestación sería un claro enturbiamiento de las aguas), es decir su potencial hidráulico es claramente superior al del río⁶.

Su caudal se corresponde bien con la máxima capacidad que conducción del canal estudiado, como más adelante razonaremos. Así, en septiembre de 2007, momento de estiaje o de aguas bajas, se aforaron 216 l/sg. Y veremos como el acueducto presenta puntos críticos donde no pueden conducir más de 280 l/sg, ya en tramos de cabecera y algo menores más adelante.

Por otra parte, "teniendo en cuenta que estos manantiales no responden de manera extrema a los episodios de sequía y precipitación, no es descartable que su caudal máximo medio pueda situarse sobre un 40-60% adicional"⁷.

Es decir, el caudal máximo esperable de las fuentes de Albarracín es de unos 300 l/sg. El canal, como vere-

mos, está perfectamente calculado para el aprovechamiento de los caudales normales de las fuentes.

De la cota de las fuentes solo podemos decir que es la ideal para conservar, entre estas y el primer punto conocido de acueducto, la pendiente propia de este canal dando un resultado de tres metros de caída por cada mil.

Como es habitual en este tipo de obras, el lugar de las fuentes ha marcado y ha condicionado todo el trazado del acueducto.

Aunque el contacto entre los terrenos permeables del jurásico y las arcillas impermeables triásicas, hacen manar aquí las aguas recogidas por la Sierra de Albarracín al norte del río Guadalaviar, esta sierra es la única en esta zona, con una cuenca de captación suficiente y unas condiciones geológico-estructurales favorables, para asegurar caudales de filtrado de entidad y permanentes.

Por tanto, la existencia y posterior desarrollo de la ciudad romana a la que abasteció el acueducto, quedó definitivamente condicionada por la presencia de estas fuentes y la posibilidad de conducir sus aguas hasta ella.

4. LA CANALIZACIÓN

La planificación en el proyecto y en la construcción de un acueducto en el mundo romano llegaba

6 NAVARRO NUVALA, R. y SARASA BROSED, A. 2007 (Colaboración en este trabajo): *Aspectos Hidrogeológicos del Manantial de Albarracín*.

7Ídem.

a todos los elementos de éste y teniendo en cuenta todos los factores intervinientes en el mismo.

Como es propio de estas obras, las dimensiones del canal venían condicionadas por el caudal a conducir. Nunca mayor que el que podía aportar la captación.

Del mismo modo, las características del canal dependen siempre de la naturaleza de los terrenos sobre los que se ha de construir, de su impermeabilidad y de su estabilidad al paso del agua.

El equilibrio entre el caudal a conducir, la pendiente, la velocidad y la naturaleza de la superficie mojada ha de ser estudiado con cuidado para asegurar el buen funcionamiento de la conducción.

TIPOS DE CANALES ENCONTRADOS

Considerando que el terreno atravesado por la canalización tiene una buena proporción de materia rocosa, susceptible de ser entallada en forma de canal y que asegurase una aceptable impermeabilidad para la conducción de las aguas, esta fue la forma en la que se decidió canalizar el agua en la mayor parte del acueducto.

Es cierto que, en muchos trozos, la estratificación y el diaclasado de la roca hizo que las fugas fueran algo frecuente. Así lo hemos podido constatar en algunos puntos que hemos examinado. Sin embargo, todo indica que esto no supuso una merma inadmisibles en los caudales necesarios en destino.

No se conoce el canal en el tramo inicial entre las fuentes y los primeros trozos entallados en la roca pero, por la naturaleza del terreno, compuesto de tierras blandas inconsistentes procedentes de las deyecciones del propio río Guadalaviar, debió de ser ejecutado mediante cajeros de fábrica. Casi todo su trazado se desarrollaba en la terraza del río, en un primer tramo de dos kilómetros, pero, luego, bajo la carretera actual hasta la zona de Santa Croche donde se conocen los primeros tramos entallados en la roca.

A partir de aquí, se alternan tramos en roca con otros en tierras, cuya conservación se ha visto mucho más comprometida, hasta el punto de que son muy escasos los restos que se conservan, siendo más difícil también detectar los tramos enterrados construidos en terrenos blandos.

Los tramos entallados en la roca son mucho más conocidos desde siempre, bien por haber permanecido visibles en los escarpes rocosos con sus registros en forma de ventanas, o en las laderas donde afloran los cortes que formaban los cajeros en la roca.

Los tramos con los cajeros construidos en fábrica, en zonas de tierras blandas, han sido víctimas de la

erosión y de los deslizamientos con mayor facilidad. Y cuando han quedado enterrados, la escasa diferencia de composición entre el relleno de los cajeros y el terreno circundante, los hacen indetectables debido al nulo cromatismo diferencial causado por la vegetación o la humedad.

Hasta el lugar de la entrada del gran túnel, cuando el canal lleva recorrido ya 27 kilómetros, el terreno por el que se ve obligado a desarrollar su trazado en función de las cotas necesarias, presenta líneas de máxima pendiente de valores muy elevados, llegando a la verticalidad y al extraplomo en los escarpes que forman las orillas del río Guadalaviar.

El recorrido por algunos de los espigones rocosos entre los barrancos transversales al valle del Guadalaviar, parece haber sido acortado mediante la construcción de pequeños túneles que acortan el trazado. Hemos encontrado, en este sentido, algunos indicios que vienen a ratificar este extremo.

Aunque hemos hallado un buen número de vestigios inéditos hasta hoy, aún no son conocidos todos los que se desearían para completar la traza del acueducto con mayor precisión.

El largo túnel con el que se supera la línea de vertientes de la cuenca del Guadalaviar y del Jiloca, o sea la del Júcar y la del Ebro, supone la mayor singularidad constructiva de todo el canal.

A partir del túnel, el terreno presenta líneas de máxima pendiente suaves que propician la construcción a cielo abierto, en canal escavado en el propio terreno, en el que normalmente la roca aflora a poca profundidad.

CONDICIONANTES TOPOGRÁFICOS Y GEOTÉCNICOS

La planificación general de esta obra no dejó al margen la dificultad extrema, incluso la imposibilidad total, de construir el canal en distintas cotas a las que se hizo.

La caída total entre las fuentes de Albarracín y el pueblo de Cella, bajo cuyas edificaciones se conoce el yacimiento romano, a cuyo servicio se construyó el acueducto, es suficiente como para que la pendiente del acueducto hubiera sido bastante mayor o bien para que los tramos de canal de gran pendiente constatados a la llegada a Cella no hubieran tenido tanta.

Sin embargo, de no haber conservado el canal a la mayor altura posible desde las fuentes hasta la salida del largo túnel, la galería hubiera sido irremediablemente de mucha mayor longitud, cosa absolutamente desaconsejable dada la enorme magnitud que ya representa.



Galería excavada en los escarpes del Azud de Gea. Se observa la mala calidad de la roca, muy fragmentada y blanda.

Tramo de canal desaparecido por los desprendimientos en la roca poco homogénea y escasamente compacta, en los escarpes del Azud de Gea.



Por otro lado, depositar el agua en las proximidades de Cella, la antigua ciudad romana, en un punto mucho más alto del estrictamente necesario, facilitaba la expansión de la ciudad y su desarrollo hacia cotas superiores de una forma inteligente y previsor.

En este sentido, puede considerarse el acueducto que tratamos como una obra ingeniosamente planificada y construida. Trazada la obra con unas pendientes adecuadas al caudal que se pretendía conducir y a la velocidad deseada, para que no sufrieran los materiales por los que discurría el agua en cada tra-

mo, como veremos, se consiguió al mismo tiempo un ahorro en la economía general de una obra que ya, de por sí, puede definirse como faraónica.

La pendiente más frecuente es de dos metros de caída por cada mil. Pero hay excepciones que iremos explicando. Por ejemplo, durante el largo tramo que supone la galería entallada en el escarpe de Gea, paralelo a la carretera, se ha medido una pendiente mucho más pequeña que en otros tramos similares del acueducto. Durante varios kilómetros antes de esta zona la pendiente resultante es incluso más pe-

Otro tramo de galería destruida por los desprendimientos en la roca poco, en los escarpes del Azud de Gea.



queña y no llega en ningún caso al metro de caída por cada mil.

Creemos que esto se buscó intencionadamente como consecuencia de las características geológicas y estratigráficas de esta pared.

Se observa una estratificación muy delgada en una roca blanda, fácilmente erosionable por el agua del propio canal. El conjunto de factores adversos en este tipo de roca ha ocasionado ya múltiples desprendimientos que han destruido hoy en día muchos tramos del canal.

En este tramo medido, la pendiente medida es de noventa centímetros de caída por cada mil metros, lo que reduce mucho la velocidad del agua en toda esta zona, hasta valores de setenta centímetros por cada segundo.

Estas variaciones en el trazado del alzado del canal son frecuentes en todos los acueductos romanos y todas tienen su explicación.

Lo mismo ocurre con los extraños cambios de dirección que se observan en el trazado en planta de estos canales, sobre todo en los túneles.

Varios autores europeos del ámbito arqueológico han estudiado este fenómeno. Normalmente ha sido imputado a errores topográficos⁸ pero nosotros, que siempre hemos tenido fe en la técnica topográfica romana y en la sensatez de los espléndidos constructores de acueductos, hemos buscado otras explicaciones.

Hemos visto personalmente que los túneles de las canalizaciones mineras, en las explotaciones auríferas

del noroeste peninsular, son excavados evitando las durísimas cuarcitas imposibles de romper a pico. La búsqueda de la roca blanda o fácil de romper es una constante en la excavación de galerías en la antigüedad.

El análisis de las curvas y rodeos aparentemente innecesarios de la excavación entre pozos de registro, en la parte visitable del túnel de la Cañada de Monterde, en Gea de Albarraçín, nos hizo sospechar que los técnicos que construyeron tan magnífica obra de canalización no podían cometer errores topográficos tan burdos. Pero, la homogeneidad de la composición de la roca, no explicaba los rodeos por sí misma.

Encargado su examen a los geólogos que han intervenido en nuestro estudio, la conclusión fue inmediata: las diaclasas y las discontinuidades de la roca son en ocasiones la guía de la excavación. En efecto:

“En relación con el tramo inicial del túnel del acueducto visitado y los cambios de dirección bruscos registrados con respecto a la dirección principal, hay que señalar que en esa zona el acueducto discurre por un material calcáreo totalmente masivo, sin que se aprecie una estratificación clara, ni cambios de material que puedan indicar alternancias.

El hecho más significativo es que, en la mayor parte de ese tramo, la traza parece seguir una importante diaclasa, no observándose ningún desplazamiento de la trayectoria respecto a esta. Presenta una apertura de unos cuantos centímetros, con rellenos arcillosos en algunos puntos, aunque mayoritariamente se encuentra limpia.

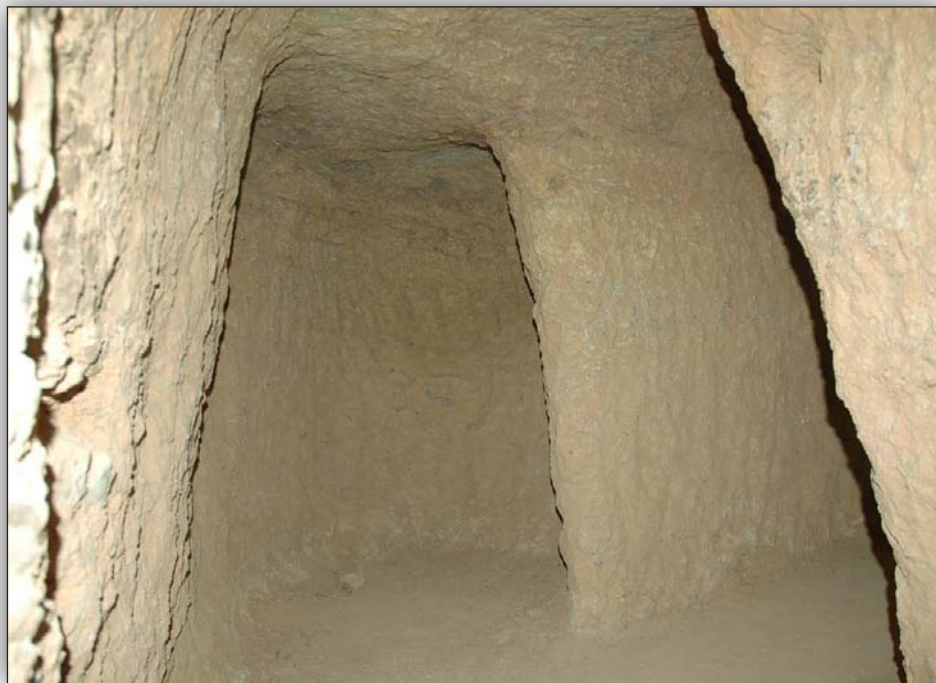
Dicha discontinuidad se reconoce en uno de los hastiales y en el techo para pasar al otro por lo

⁸ GREWE, K 1998: Litch am Ende des Tunnels: Planung und Trassierung im Tunnelbau (Mainz).



Final de la excavación en una de las alineaciones en el túnel de la Cañada de Monterde. A la derecha la galería que da continuidad al canal.

Final de la excavación en otra de las alineaciones en el túnel de la Cañada de Monterde. A la derecha la galería que da continuidad al canal.

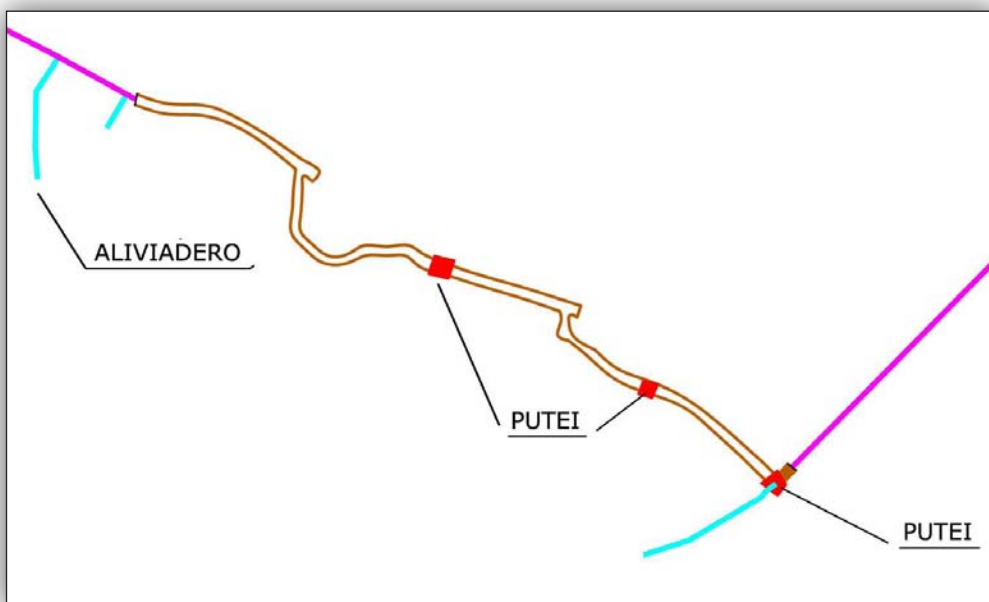


que, a falta de mayores criterios de otra índole diferente a la geológica-geotécnica, dichos cambios bruscos en la dirección de la traza parecen relacionados con la propia discontinuidad.

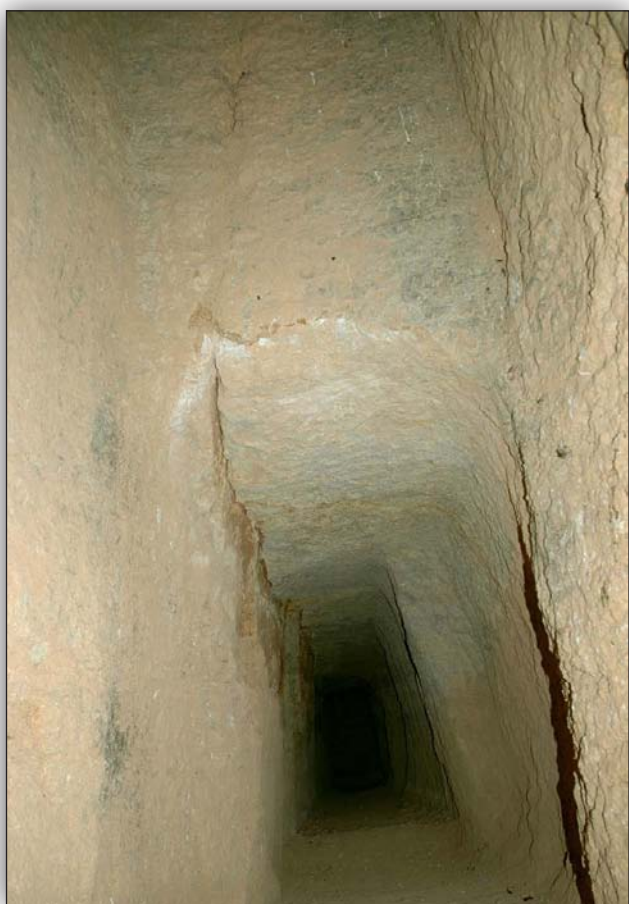
Esto es atribuible al hecho de que lógicamente resultaría más fácil excavar el acueducto en las proximidades de dicha discontinuidad, que actuaría como una zona de mayor debilidad, por donde la roca se desprende con mayor facilidad, resultando en definitiva más rápidos y fáciles los trabajos de excavación.

Un hecho que corrobora este razonamiento es que la práctica totalidad del hastial izquierdo en la mayor parte del recorrido, especialmente en el tramo medio del trazado visitable, presenta una pátina calcáreo-arcillosa que indica que estamos en el plano de la diaclasa.

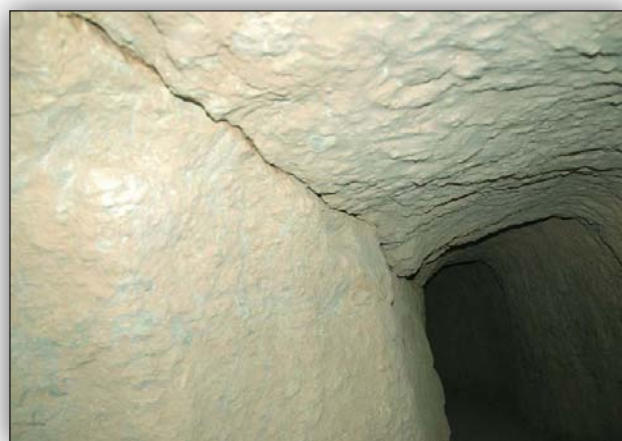
De igual manera, en el comienzo del tramo, donde dicha diaclasa no se reconoce claramente, se puede apreciar que el techo del acueducto es prácticamente plano, hecho que vuelve a estar relacionado con otra discontinuidad del mismo tipo, cuyo plano es parale-



Planta del trazado del inicio del túnel de la Cañada de Monterde en Gea de Albarracín. Se observan los cambios bruscos de dirección explicables geológicamente.



Vista de la diaclasa que recorre el hastial izquierdo de la galería excavada y que continúa en la pared del pozo de registro. Túnel de la Cañada de Monterde



Detalle de la diaclasa que recorre el hastial izquierdo de la galería excavada. Túnel de la Cañada de Monterde

Hay que tener en cuenta que la gran homogeneidad y alta compacidad de la roca en este tramo supuso una dificultad máxima para los medios de excavación de la época, de tal manera que la presencia de discontinuidades, que son zonas por donde la roca puede "moverse" atendiendo a criterios constructivos, deberían ser aprovechadas al máximo, al objeto de ejecutar la tarea de una manera más provechosa⁹.

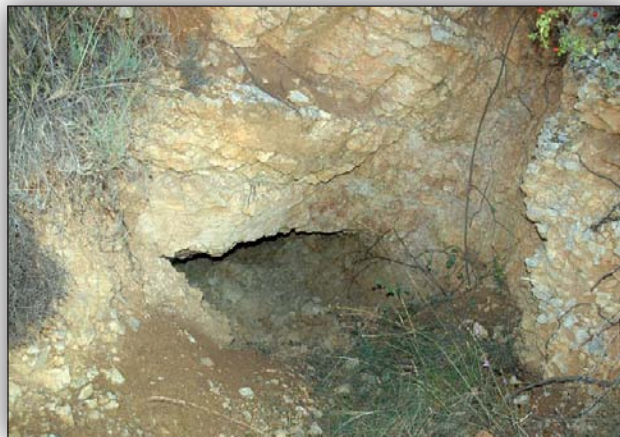
Otro condicionante en la elección del trazado, podemos encontrarlo en la retirada del canal de las zonas expuestas a los daños que las escorrentías superficiales ocasionan en este tipo de obras.

lo al techo del acueducto y por tanto igualmente más fácil de excavar.

9 NAVARRO NUVIALA, R. y SARASA BROSED, A. 2007 (Colaboración en este trabajo): Aspectos Geotécnicos de la Traza del acueducto de Albarracín a Cella.



Cruce del acueducto con la escorrentía del barranco de los Burros. El túnel excavado impide cualquier interferencia entre ambas aguas.



Detalle del hundimiento producido en la boca de salida del túnel que llega al barranco de los Burros.



Supuesto tramo de canal en las canteras de Gea, procedente de la fragmentación natural de la roca y fuera de la cota necesaria para este acueducto.

La pendiente de la ladera condiciona el tipo de canal elegido, en galería o semigalería para los escarpes, enterrado a buena profundidad en pendientes acusadas, o más superficial y cubierto con elementos registrables en las zonas llanas.

Es frecuente en este tipo de obras acondicionar dispositivos para evitar la erosión por escorrentías superficiales. Creemos que serían muy frecuentes las cunetas de guarda, que condujeran las escorrentías hacia lugares donde no ocasionasen daños al canal. Y hemos comprobado que, el trazado en túnel, ha sido elegido para evitar interferencias directas con cauces de agua.

Éste es el caso concreto del barranco de los Burros donde, en el lugar de cruce del cauce con el acueducto, se establece un pequeño túnel en acusado ángulo que libera de la influencia de las escorrentías al canal.

De la misma forma, cuando las laderas se presentan inestables, el canal se prefiere construir en túnel, aún más si con ello se acorta el recorrido atravesando uno de los

espigones de la montaña entre barrancos. En el barranco de los Burros hemos encontrado estos casos, tanto en el lado de aguas arriba, donde se conserva lo que podría ser la boca de salida del túnel que llega a este barranco, como otros menores en el lado de aguas abajo.

No conocemos con exactitud la existencia de otros túneles en este acueducto, pero sospechamos que existen algunos más de no mucha longitud.

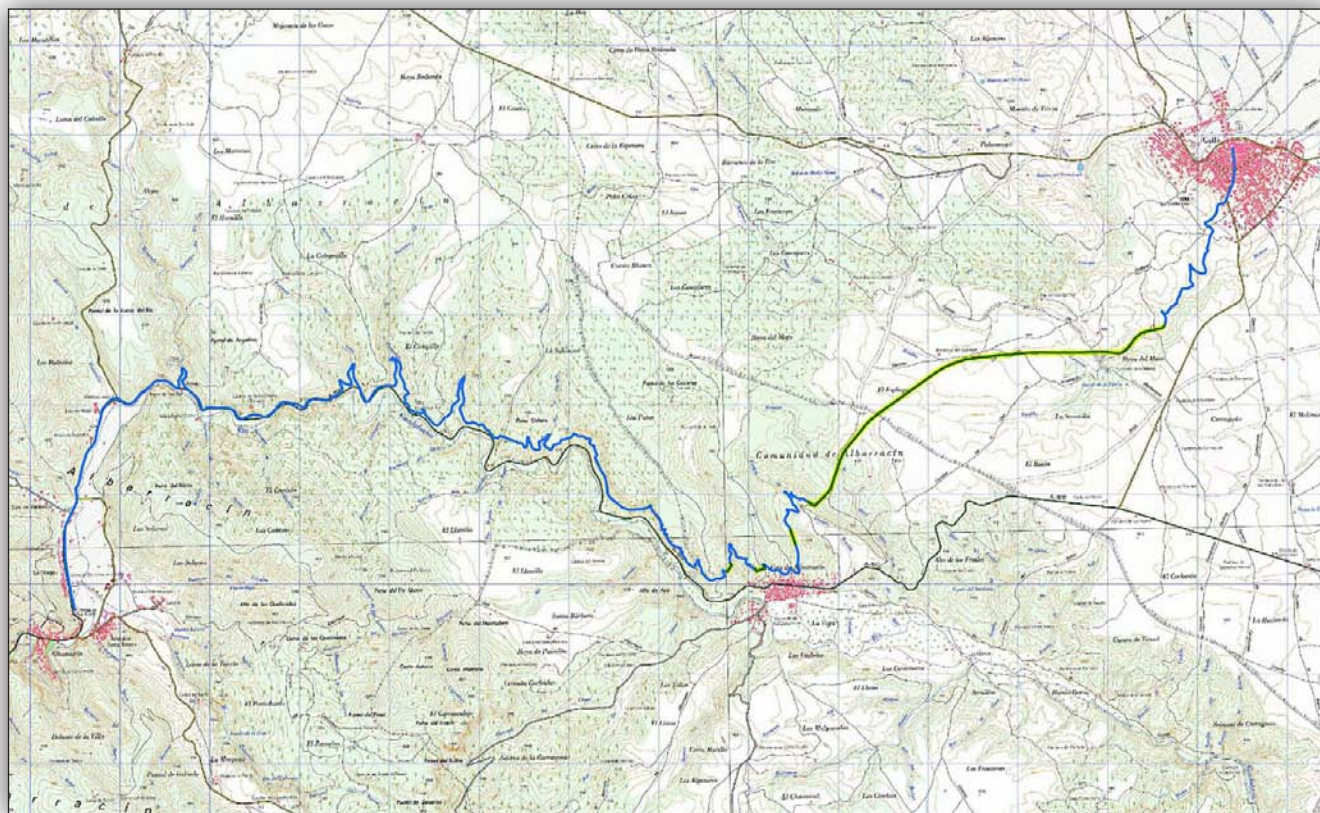
Probablemente es así en algún tramo entre el barranco de los Burros y el de la Cañada de Monterde. Es cierto que, en las noticias que aportan autores anteriores, se habla de antiguos restos de canal en las canteras de Gea, destruidos por la extracción de piedra. Se afirma que "quedan incluso claros vestigios de su recorrido"¹⁰. Sin embargo, nuestro reconocimiento del terreno no ha arrojado frutos en este sentido y más bien parece que las diaclasas abiertas de forma natural en la roca hubieran sido interpretadas como restos de canales.

Hemos visto como la traza final del acueducto quedó altamente condicionada por la orografía de la zona que tuvo que salvar y por la geología del terreno. La economía final de la obra fue el factor determinante.

La consecución de la menor longitud de un túnel, que ya se adivinaba de enormes proporciones, se resolvió de una forma inteligente mediante cálculos topográficos de nivelación de gran magnitud, no exentos de complejidad.

Estos factores responden a una obra perfectamente planificada y con criterios de ingeniería propios de las obras de este tipo en el mundo moderno, indicándonos que el estado tecnológico y científico-técnico del mundo romano es muy superior a lo que se supone normalmente.

¹⁰ ALMAGRO GORBEA, A. 2002, pp. 213-241: *Acueducto de Albarracín a Cella (Teruel)*... ob. cit.



Planta General del acueducto de Albarracín a Cella con indicación de las zonas en túnel.

Hay que considerar que los túneles de los acueductos romanos son los grandes desconocidos de la obra pública de aquél tiempo. A pesar de esto podemos indicar que este túnel del acueducto de Albarracín a Cella, de cinco kilómetros de longitud, es comparable al que sirvió para drenaje del lago Fucino (Italia) de 5,64 km de longitud, aunque aquél se construyó pozos de hasta 122 m de altura¹¹. Existen mayores longitudes de túneles en el Imperio, por ejemplo sabemos que el del acueducto de Aix-en-Provence (Francia) tiene unos siete km de longitud y pozos de 80 m¹², el de Drover-Bergh-Tunnel (Alemania) apenas 1,66 km pero, se sospecha que el de Bolonia (Italia) tiene hasta unos impresionantes 20 km¹³.

De la misma forma, la decisión de construir los tramos en canal a cielo abierto, soterrado o en galerías excavadas, se fueron viendo condicionados

por las características geológicas del terreno que a su paso se iba encontrando. La propia forma de las galerías y su trazado en planta quedaron moldeados por las condiciones estructurales de la roca.

REGISTROS. TIPOS, CARACTERÍSTICAS Y SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA.

Una de las partes primordiales de las obras de canalización, en los abastecimientos de agua romanos, eran los registros. Como hoy en día ocurre también en las canalizaciones a lámina libre soterradas, la obra quedaba registrada frecuentemente al menos por pozos repartidos regularmente.

Pero en los acueductos de la antigüedad los registros cumplían varias misiones a la vez y tenían por tanto mayor importancia en su contexto.

Las aberturas regulares de registro que en este acueducto hemos observado son las habituales en este tipo de obras, en forma de pozo, pero también en forma de ventana en las partes excavadas en los escarpes rocosos. Ambos registros cumplen la misma misión, aunque los segundos son ejecutados a más corta distancia unos de otros por su más fácil ejecución y el menor coste de los mismos.

11 DURAND-CLAYE, A. 1978: *Mémoire sur le dessèchement du Lac Fucino*. Paris, Dunod. Annales des Ponts et Chaussées, XV.

12 LEVEAU, P. 2006, pp. 93-108: Les aqueducs d'Aquae Sextiae et la gestion de l'eau sur le territoire de la cité. Extrait de MOCCI Florence et NIN Nuria, Aix en Provence. Pays d'Aix-Val de Durance (13-4). Paris. Maison des Sciences de l'Homme.

13 GIORGETTI, D. 1985, pp. 37-107: *Lacquadotto romano di Bologna: l'anticunicolo et i sistema di avanzamento in cavo cieco*. Acquadotto 2000. Bologna. L'acqua del duemila ha duemila anni.

Las funciones de los pozos de registro en los acueductos romanos son múltiples y todas ellas muy importantes. Por ellos se inicia la excavación de la obra, por ellos se introduce el replanteo de la planta y del alzado del eje del canal¹⁴ y por ellos se extraen los materiales de la excavación. Más tarde, durante el servicio de la obra, por ellos se realizan las labores de mantenimiento, limpieza y conservación del canal, sirven de referencia para el balizamiento de la obra en superficie y en relación a ellos se colocan los hitos de policía de salvaguarda del acueducto.

Respecto a los tramos excavados a cielo abierto, que en esta obra es la mayoría del recorrido, no hemos observado vestigios en las zonas excavadas de ninguna cobertura de fábrica abovedada en piedra, ni la presencia de losas de cubrimiento.

Creemos que esto es un factor normal en este tipo de obras, lo que no significa que no estuvieran cubiertas en todo su recorrido. Al contrario, pensamos que todo el trazado estaba preservado del contacto con los rayos solares¹⁵ y tapado todo él de una u otra forma¹⁶.

Sin embargo, todo el canal sería registrable de una u otra forma. En estos casos, en los que la cobertura no era de piedra, creemos que la madera era el material utilizado. Nivelados los cajeros del canal de forma que pudieran sujetar bien un entramado de tabloncillos transversales de cobertura continua, éste se convertía en un procedimiento perfecto para preservar el canal de la intemperie y mantenerlo registrable en toda su longitud. De esta forma, el canal podía ser limpiado en cualquier punto aleatoriamente y eliminar en ellos obstrucciones de cualquier tipo que pudieran producirse con muy poco esfuerzo.

Este tipo de coberturas eran muy frecuentes en los canales romanos de abastecimientos de aguas a poblaciones. Por ejemplo, en canales como el de Tiermes (Soria), hemos visto largos tramos donde el entalle superior de la roca en los cajeros del canal delata

claramente la existencia de una cobertura continua. Queda evidenciado que esta no fue de piedra porque no se ha encontrado ni una sola losa de cobertura en todo el yacimiento, sin embargo, deberían haber aparecido cientos de ellas. Pero, el entalle que muestra, es perfecto para la disposición de tabloncillos transversales de cobertura. Lo mismo ocurre en otros canales romanos de abastecimiento construidos a cielo abierto, que hemos observado en otras partes y en los que la cobertura de piedra nunca ha aparecido.

Tratamiento aparte por su complejidad y singularidad podemos dar a los pozos de registro del largo túnel del acueducto. La gran altura que alcanzan algunos de ellos y la naturaleza de la roca en la que fueron realizados, obligó a diseñarlos con una geometría especial y poco habitual en este tipo de obras.

Los pozos han sido promediados aquí cada 35 metros aproximadamente, por lo que habrá cerca de 140 de ellos en todo el túnel. Sin embargo, apenas se conocen o se han identificado una pequeña parte de estos registros, apenas veinte. La mayoría ha quedado cegada por la sedimentación de los siglos y aún más por las labores antrópicas en los terrenos de labranza. De esta forma, se conocen mejor los que han permanecido en terreno no cultivado.

Los de mayor altura de entre los conocidos están entre 50 y 54 m, particularmente los que hacen el número orden 8, 9, 11 y 12 desde la entrada del túnel. Sin embargo sabemos que los habrá de hasta 60 metros en el punto de mayor diferencia entre la superficie del terreno y el canal, que coincide con el lugar donde el túnel corta con el límite de términos municipales de Gea de Albarracín y Cella.

Respecto al terreno en el que están construidos, los primeros metros desde la superficie lo constituyen un terreno suelto o roca muy fragmentada, por lo que la estabilidad de las bocas queda muy comprometida en estos pozos de gran altura.

Para evitar desprendimientos frecuentes que cegarían los pozos se recurrió a la estrategia de dar mayor anchura en las bocas hasta lograr una sección en ellas que fuera estable a los desprendimientos. Con este procedimiento, la forma final de los pozos de gran altura es la de un tronco de pirámide invertida o la sucesión de varios troncos de pirámides invertidas, mayores las de arriba, con escalonamiento entre ellas.

Mientras que la sección inferior en el canal es del orden de 1 x 1,5 m, en la superficie, en los pozos más altos, llega a ser de hasta 9 x 4,5 m en los descubiertos hasta hoy. Pero nosotros hemos podido encontrar en esta investigación otro colmatado en término de Cella con una boca de aproximadamente 19 x 10 m,

14 El replanteo del alzado era afinado posteriormente con niveles de precisión desde el propio canal, probablemente de agua (*libra aquaria*), según se avanza en la excavación. La primera nivelación, en grueso, se realizaba con el *corobate*. Para estos asuntos topográficos véanse las obras:

MORENO GALLO, I. 2007: *LIBRATIO AQVARVM*. El arte romano de suministrar las aguas... ob. cit

MORENO GALLO, I. 2004, pp. 25-68: *Topografía Romana*. II Congreso Europeo Obras Públicas Romanas. Tarragona, octubre de 2004. Libro de Ponencias. Tarragona.

MORENO GALLO, I. 2006, pp. 357-367: *Dioptra*. Nuevos Elementos de Ingeniería Romana. III Congreso Europeo Obras Públicas Romanas. Astorga, octubre de 2006. Libro de Ponencias.

15 VITRUVIO (VIII, VI): "Su obra de albañilería debe ser abovedada, con el fin de proteger el agua de los rayos solares".

16 FEIJÓO MARTÍNEZ, S. 2005: Las presas y los acueductos de Agua Potable... ob. cit.

ISAAC MORENO GALLO

detectable por la diferencia cromática provocada por la humedad del terreno.

Todo indica que, no siendo éste último uno de los pozos más altos del acueducto, el terreno blando de esta zona obligó a aumentar notablemente la sección de la boca en superficie y con ello la inclinación de los taludes de excavación del pozo.

Por tanto, sin ser estos pozos de Albarracín los más altos que se conocen en acueductos romanos, sí que presentan una cierta singularidad en cuanto a su complejidad constructiva como consecuencia de los condicionantes geológicos del terreno donde se desarrolla el acueducto.

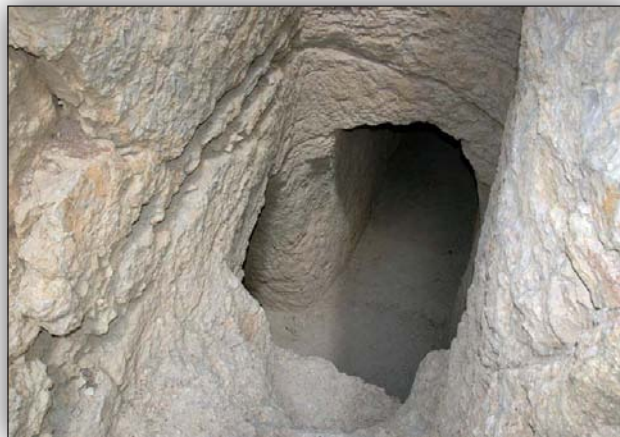
Es interesante reseñar que, según los cálculos realizados al efecto, mientras el volumen de excavación del túnel es de cerca de ocho mil metros cúbicos, el de excavación de la totalidad de los pozos puede sobrepasar ocho veces ese volumen, teniendo en cuenta las enormes dimensiones de los brocales que se adivinan en superficie en las zonas de terreno blando.



Registros en forma de ventana en el canal del acueducto, en el escarpe del barranco de los Burros.



Pozo de registro en el inicio del túnel largo. Se observan los entalles para el apoyo de las maderas de escala.



Pozo de registro en la inflexión ortogonal del túnel en su tramo inicial.



Callejón de evacuación de tierras para la excavación, en el pozo de registro de la inflexión ortogonal del túnel en su tramo inicial.



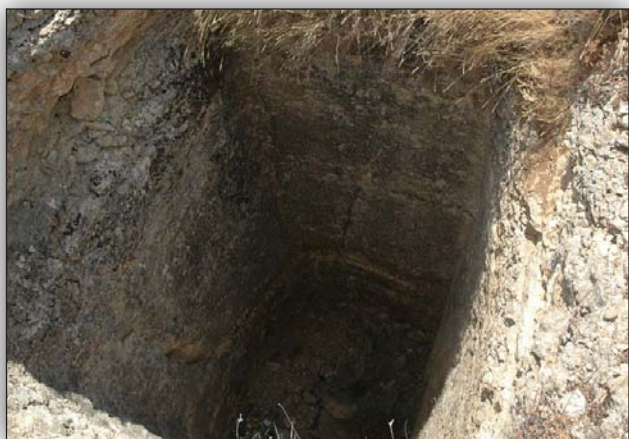
Boca de grandes proporciones o base mayor del tronco de pirámide invertido que forma uno de los pozos de registro mayores del túnel largo.



Boca de grandes proporciones de uno de los pozos de registro más altos del túnel largo.



Boca de pozo de registro.



Pozo de registro de talla bien escuadrada y paredes casi verticales al desarrollarse en roca sana y compacta.



Segundo pozo de registro hoy señalado en término de Cella. Se observa un saneamiento inicial de la roca fragmentada antes de proceder a escuadrar el pozo.



Planta de la entrada del túnel y posición de los primeros registros. Los números 9, 11 y 12, tienen más de 50 metros de profundidad. En la zona central del túnel, llegan a superar los 60 metros de profundidad.

Hemos estimado el volumen de excavación de la galería del túnel más largo y de los registros verticales que el acompañan. Solamente este dato, es lo suficiente impresionante como para darse cuenta del esfuerzo constructivo que una obra como esta supone para los medios de excavación de la época.

En función de los pozos tomados topográficamente en el tramo de túnel visitable en la entrada del mismo y los de su continuación, donde quedan perfectamente identificados por sus bocas en superficie, se puede estimar una distancia media de 35 m. entre pozos. Teniendo en cuenta esta distancia media, el número total de pozos para los 4.750 m. de túnel sería de 136, con una profundidad media de 34 m y con una altura máxima de 60m. Se han calculado el volumen de excavación de la galería y de los pozos.

En el caso de los pozos se ha hecho la estimación de suponer una excavación en terreno consistente. De esta forma, se ha tomado como excavación tipo el volumen medio de excavación de los pozos 19 a 22. En este caso los pozos se encuentran a media ladera, el terreno es consistente y las dimensiones son del orden de 3.00 x 3.00 m en la parte superior y de 2.00 x 1.00 m. en la inferior. Se ha aplicado esta estimación a todo el recorrido, a pesar de que somos conscientes que, como el terreno será peor en otras zonas, esta cifra se dispararía en el volumen real de excavación.

La sección tipo empleada para la medición de la galería ha sido de 0.90 x 1.90, con un arco superior de 0.25 m de flecha.

Los datos de excavación así resultantes son para la galería de 7.828 m³. Para los pozos existentes tomados con datos de topografía, 6.528 m³ y para los pozos restantes estimados 21.102 m³.

El total de excavación de los pozos de registro no habrá sido inferior a los 27630 m³, mientras que el total de la excavación del túnel más la de los registros ascenderá como mínimo a 35.458 m³.

Salta a primera vista un esfuerzo de excavación, en los pozos de registro, de hasta cuatro veces superior en volumen al de la galería del canal. Considerando, además, la dificultad de excavar y evacuar los materiales en vertical, respecto a la más sencilla excavación y evacuación en horizontal de la galería.

REGULADORES DEL CAUDAL Y ALIVIADEROS

En los tramos de canal excavados se han constatado varios puntos de regulación del caudal del acueducto. Uno de ellos, a la salida de la corta galería hoy situada sobre el túnel de la carretera entre Gea y Albaracín, sirve para el desagüe total del canal, es un llamado desagüe de fondo.

Otros son reguladores de caudal que limitan el calado del canal y por tanto la sección mojada. De este tipo hemos encontrado en casi todos los tramos excavados que hemos podido analizar.

En el lugar de los Espejos, en Santa Croche, algunas de las ventanas apenas presentan resguardos de cajero de veinte centímetros de altura, limitando con ello el caudal máximo del acueducto con precisión ya que, a mayores alturas de la lámina de agua, el canal aliviaría por estas ventanas.

En el escarpe llamado Azud de Gea, hemos medido en una de las ventanas un resguardo de solo cuarenta y cinco centímetros que, al coincidir con una zona de muy poca pendiente, constituye un lugar por el que aliviaría el canal con facilidad, si llevara caudales superiores al requerido por cualquier motivo.

Uno de los motivos frecuentes, que pueden aumentar el caudal del canal involuntariamente, es el aporte de caudales procedentes de escorrentías superficiales con ocasión de grandes lluvias o tormentas puntuales. Por esto, los reguladores de caudal son convenientes a la entrada de estructuras que pudieran sufrir daños por un aumento del caudal máximo de diseño.

Los túneles y tramos soterrados son uno de estos lugares vulnerables. Creemos por tanto que, el dispositivo en forma de aliviadero entallado a la entrada del largo túnel, en la llamada Cañada de Monterde, cumple precisamente la misión de preservar al túnel de los aumentos de caudal indeseados.

Este tipo de dispositivos era bien conocido por los técnicos que diseñaban los acueductos de la antigüedad. El conocimiento que tenían del comportamiento del agua, de la forma de conducirla, del control de los caudales que se requerían y de todos los factores que intervenían en el buen funcionamiento de las canalizaciones, convertían a estos hombres en excelentes ingenieros hidráulicos.



Aliviadero ejecutado justo antes de la entrada del gran túnel para evacuación de los caudales sobrantes que pudieran perjudicar la obra interior del túnel.



Aliviadero a la salida del túnel sobre la carretera de Gea a Albarracín. Probable tramo destruido por desprendimientos y restituído en vida del acueducto.



Ventana aliviadero en la zona de los Espejos. La ventana central apenas tiene veinte centímetros de resguardo. Tramo variado en vida del acueducto. Se observa en el exterior el repicado del canal primigenio.

DESTRUCCIONES, DISFUNCIONES Y REPARACIONES

Éste es uno de los aspectos más difíciles de detectar en este tipo de obras tan antiguas, en las que las huellas constructivas o de funcionamiento han desaparecido casi en su totalidad.

Sin embargo, dado que hemos recorrido detenidamente el canal conocido y hemos observado todos los extremos que nos pudieran dar indicios sobre su funcionamiento, hemos tenido oportunidad de encontrar algunos detalles muy interesantes sobre los avatares de la vida del acueducto.

La primera de las grandes reparaciones que hemos encontrado, ha sido en el primer trozo conocido del acueducto. En el lugar llamado de los Espejos, hemos observado como el acueducto fue repuesto en un plano interior de la montaña, cuando esta se desprendió llevándose consigo un tramo del canal.

Se observan los entalles de las paredes y de la base del canal primitivo en el exterior del definitivo. Esta variación supuso un acortamiento considerable del trazado acarreado con ello un aumento de la pendiente muy por encima de la que tenía en un principio. Por este motivo, hemos medido en este rozo una pendiente con una caída cuatro veces superior a la de la media del acueducto.

Los técnicos del momento sabían perfectamente que, a igualdad de anchura del canal y con esa mayor pendiente, se crearía un tramo de gran velocidad del agua, un "rápido" donde la sección mojada sería mucho menor de lo habitual. Y tanto es así que, en este punto, observamos ventanas de registro con tan solo veinte centímetros de resguardo, fenómeno que no entendimos hasta que medimos la pendiente en

el tramo, fruto de la reposición del canal tras su destrucción.

El tramo contiguo parece haber sido también objeto de reposición, víctima de la misma geología inestable de las laderas en las que se asienta. En él se observa de nuevo un tramo de canal que se dirige al exterior y que por sus características no parece un aliviadero, si no un tramo de canal abandonado, más exterior en el escarpe que el definitivo.

De cualquier forma, estos canales que ya solo conducen al vacío pueden haberse hecho funcionar como aliviaderos perfectamente en vida del acueducto y, en este sentido, vamos a dejar abierta la posibilidad de que el aliviadero que hemos observado y tratado, en la zona sobre el túnel de la carretera, proceda de una rotura antigua del canal que luego se retalló en un plano interior del escarpe. Consideremos que la roca de esa zona del escarpe es muy soluble y presenta



Entalle exterior a la galería del acueducto en la zona de los Espejos 1. Se aprecian la pared y la solera de la primigenia galería destruida y variada por la actual.



Canal primigenio en el exterior de la actual galería en la zona de los Espejos 2. Después de haber sido variado por el actual este tramo de canal pudo ser utilizado como aliviadero.



Depósitos calcáreos bajo uno de los registros en forma de ventana en el barranco de los Burros.

hoy mismo una rotura de dimensiones considerables por efecto de la erosión hídrica.

Otro tipo de anomalías funcionales detectadas en este acueducto han sido las filtraciones, cuyos efectos pueden aún hoy apreciarse en determinados tramos. Fundamentalmente, en aquellas zonas donde es observable por debajo del canal el paquete estratigráfico poco homogéneo.

En concreto, en el canal en galería del Barranco de los Burros, en su primera mitad de aguas arriba, pueden verse varios depósitos calcáreos procedentes de la acción del agua. En este caso también solicitamos, al equipo geológico que intervino en este estudio, su opinión sobre la forma en la que estos depósitos se habían producido:

“En los registros en forma de ventana existentes en el acueducto, en la zona del Barranco de los Burros, se aprecia la presencia de depósitos calcáreos de forma alargada cuyo origen debe buscarse, bien en la existencia de filtraciones desde el propio acueducto, bien en las salpicaduras constantes que la circulación del agua produciría.

Si bien la práctica mayoría parece relacionarse con pequeñas incisiones verticales en la roca por donde podría discurrir el agua de lluvia superficial, la presencia de estos depósitos calcáreos debe ser el resultado de una circulación de agua más continuada y abundante, de tal manera que la acumulación se va produciendo por el desprendimiento del CO₂ que rompe el equilibrio del agua con respecto a la calcita y produce su precipitación a modo de una pequeña toba calcárea”¹⁷.



Depósitos calcáreos procedentes de filtraciones del canal, bajo otro de los registros en forma de ventana en el barranco de los Burros.

En el caso de los pozos de registro consideramos que, su construcción y posterior mantenimiento, durante el funcionamiento del acueducto, tuvo que ocasionar no pocos contratiempos debido a la irregular y variable geología en la que se desarrolla el trazado del túnel. Este factor, probablemente impidió o dificultó en extremo la planificación de una sección tipo durante el proyecto de la obra. Por tanto, creemos que algunas de las bocas de superficie que hoy se observan y aún mucho más las que se averiguan, de enormes dimensiones, son fruto de labores de estabilización durante las tareas de conservación, como consecuencia de derrumbes o desprendimientos frecuentes que impedían un funcionamiento correcto del canal y de su propio registro, labor encomendada precisamente a estos pozos.

17 NAVARRO NUVIOLA, R. y SARASA BROSED, A. 2007 (Colaboración en este trabajo): Depósitos Calcáreos en la zona del Barranco de los Burros del Acueducto de Albarracín a Cella.



Boca de un pozo de registro delatada por la humedad del terreno en término de Cella. Sus enormes dimensiones son consecuencia de la naturaleza blanda del terreno en el que se excavó y de posibles sobreexcavaciones de estabilización.

SECCIONES Y PENDIENTES. CÁLCULO DE CAUDALES

Una de las labores fundamentales de este estudio ha sido la realización de un perfil longitudinal de precisión del canal, con la medición de las distintas secciones y el cálculo del caudal normal de trabajo del acueducto.

Es necesario considerar que son muy pocos los tramos medibles, de entre los conocidos con alguna precisión, cuya cantidad y longitud tampoco son hoy en día los deseables para este cometido.

Solo aquellos tramos que tienen suficientes puntos de solera limpia de sedimentos son aptos para esta medición. Cuantos más puntos limpios de solera presentan, mayor exactitud de medición se consigue y cuanto mayor distancia existe entre ellos, más precisa es la pendiente resultante para el cálculo del tramo.

El equipo topográfico empleado ha consistido en dos receptores GPS de doble frecuencia que conectados entre sí nos permitirá trabajar en tiempo real (RTK), con una precisión de 1,5 cm. El empleo de este sistema permite cubrir grandes distancias, de hasta 8 km, con una precisión elevada. Las coordenadas obtenidas se han referido al sistema de proyección de la red cartográfica general de España, UTM, Universal Transversal Mercator, mediante el uso de los vértices geodésicos próximos a las zonas de trabajo.

Este sistema GPS, Sistema de Posicionamiento Global, se basa en la recepción de la señal de un determinado grupo de satélites (NAVSTAR), perfectamente ubicados en el espacio-tiempo. Los receptores

GPS que se emplean adquieren la señal de los diferentes satélites visibles y a través de los diferentes programas de software del controlador, transforman la señal en coordenadas absolutas. El software de trabajo permite la transformación de coordenadas a los diferentes sistemas de referencia empleados (coordenadas geográficas, UTM, etc.), además en función de la situación de los satélites (número, altura sobre el horizonte, etc.) marca la precisión de trabajo. La diferencia entre los receptores comunes y los empleados en topografía se basa en la recepción de una segunda señal satelital (L1 receptores comunes, L1 y L2 receptores topográficos) y en el empleo de dos receptores al mismo tiempo (sistema diferencial).

El método a emplear denominado RTK (Real Time Kinematic) se basa en resolución de las diferentes incógnitas en las ecuaciones de posición, en tiempo real, es decir los dos receptores reciben la señal simultáneamente, el GPS base se haya estacionado en un punto fijo, transmite la señal a través del software y resuelve la posición del GPS móvil.

Los tramos de canal y túnel comprendidos entre Albarracín y Gea de Albarracín corresponden a túneles o zonas abruptas y dadas las dificultades de comunicación entre receptores y satélites, se procedió a realizar la toma de datos con una Estación Total TOPCON GTS 211D

Los resultados obtenidos en este trabajo, sin ser lo extensos que hubiéramos deseado de haber estado el canal mucho más expedito, si que han sido reveladores y suficientemente concluyentes como para evidenciar la excelencia constructiva de esta obra de la ingeniería romana, su correcto funcionamiento y algunos de sus avatares constructivos y de funcionamiento.

La medición de las secciones, al igual que el de las pendientes, ha sido realizada solo en los diversos tramos visibles y limpios. Individualmente, se han calculado los caudales considerando estos factores, observando así que todos los tramos medidos disponen de una capacidad suficiente para la conducción del caudal máximo de trabajo que no es otro que el de las fuentes de suministro.

Los cuadros con los resultados del cálculo hidráulico que exponemos a continuación se han realizado a partir de la aplicación de la fórmula de Mannig, en la que los factores intervinientes son los siguientes:

$$\text{FÓRMULA DE MANNING: } V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n}$$

Q = Caudal (m³/s) = Velocidad x Sección mojada (VxA)

V = Velocidad (m/s)

n = Coeficiente de rugosidad

ISAAC MORENO GALLO

n	Superficie
0.010	Muy lisa, vidrio, plástico, cobre.
0.011	Hormigón muy liso.
0.013	Madera suave, metal, hormigón fratasado.
0.017	Canales de tierra en buenas condiciones.
0.020	Canales naturales de tierra, libres de vegetación.
0.025	Canales naturales con alguna vegetación y piedras en el fondo.
0.035	Canales naturales con abundante vegetación.
0.040	Arroyos de montaña con muchas piedras.

A = Sección mojada (m²)

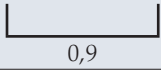
R = Radio hidráulico = Sección mojada / Perímetro mojado

S = pendiente

Existen unos pocos tramos en los que el coeficiente de rugosidad podría considerarse como 0,015, al tratarse de roca suficientemente sana asimilable a un material intermedio entre el hormigón fratasado y la tierra compacta. Otros, sin embargo, son francamente rugosos con las paredes compuestas de una materia mixta de tierra y material pétreo suelto, a los que podríamos asignar un coeficiente de 0,018. Entre ambos existe una amplia variedad que habría que considerar caso por caso. En todo caso, considerando que en escasos metros pueden variar mucho la rugosidad del canal, al variar la composición del terreno por el que discurre, hemos aplicado el correspondiente al tramo que se ha medido para el cálculo del caudal.

El primero de los tramos medidos y precisamente uno de los más críticos, es el llamado los Espejos 1. La presencia de registros en ventana con resguardos muy escasos hace pensar que estos estaban precisamente ajustados al caudal máximo de trabajo del acueducto.

La capacidad de conducción del tramo viene explicada por la elevada pendiente que presenta: 8,41 m de caída por cada mil.

ALBARRACÍN - CELLA - LOS ESPEJOS 1		
	calado considerado	calado máximo comprobado
	0,2	0,2 - 0,3
Rugosidad	n = 0,0160000	
Area (m ²)	A = 0,1800000	
Perímetro Mojado (m)	P = 1,3000000	
Radio Hidráulico (m)	R = 0,1384615	
Pendiente (m/m)	S = 0,0084100	
Velocidad (m/s)	V = 1,5340192	
Caudal (m ³ /s)	Q = 0,2761234	

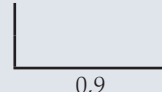
El resultado está sorprendentemente ajustado a los caudales normales de las fuentes de Albarracín.

Al tratarse de un tramo de reposición, en un momento en el que el acueducto llevaría probablemente ya decenios de funcionamiento, el ajuste del resguardo de la ventana al máximo caudal fue, además de intencionadamente ejecutado como aliviadero de los excesos de caudal, fácil de ejecutar, ya que probablemente se acabó de entallar con la canalización funcionando.

Con unos 276 l/sg de caudal máximo establece así mismo el máximo caudal que pudo llevar el acueducto en todo el recorrido y por tanto el que como máximo llegaba a Cella.

Equivalente a unos 23.857 m³/día, este caudal mínimo tendría un potencial de abastecimiento superior a 95.000 habitantes, considerando que las dotaciones normales en el mundo romano se consideraban de unos 250 litros por habitante y día, en los que eran incluidos los destinados a baños públicos, fuentes públicas, etc.¹⁸

En el tramo siguiente y contiguo a éste, el de los Espejos 2, los resguardos comprobados en el canal son muy superiores al anterior, de unos tres pies romanos, evidentemente mayores a los necesarios y sin capacidades de alivio. La pendiente aquí es prácticamente la media y más frecuentemente medida en el acueducto, dos metros de caída por cada mil, que los romanos medirían como dos pies de caída por cada mil.

ALBARRACÍN - CELLA - LOS ESPEJOS 2		
	calado considerado	calado máximo comprobado
	0,33	0,9
Rugosidad	n = 0,0160000	
Area (m ²)	A = 0,2970000	
Perímetro Mojado (m)	P = 1,5600000	
Radio Hidráulico (m)	R = 0,190385	
Pendiente (m/m)	S = 0,002033	
Velocidad (m/s)	V = 0,932663	
Caudal (m ³ /s)	Q = 0,277001	

Vemos que, en este tramo, con un calado de solo 0,33 m ya se conduce el caudal necesario de trabajo.

En el tramo de canal sobre el túnel de la carretera de Gea a Albarracín, los resguardos comprobados son de nuevo mucho mayores a los necesarios, de nuevo del orden de tres pies romanos, con una caída en el tramo de 2,644 pies por cada mil.

18 MORENO GALLO, I. 2007: LIBRATIO AQVAVVM. El arte romano de suministrar las aguas... ob. cit.

ALBARRACÍN - CELLA - TÚNEL CARRETERA	
	calado considerado 0,29
	calado máximo comprobado 0,9
Rugosidad	n = 0,015000
Area (m ²)	A = 0,261000
Perímetro Mojado (m)	P = 1,480000
Radio Hidráulico (m)	R = 0,176351
Pendiente (m/m)	S = 0,002644
Velocidad (m/s)	V = 1,078016
Caudal (m ³ /s)	Q = 0,281362

Aquí solo hacen falta 29 centímetros de calado para conducir el caudal requerido.




Cajero del canal sobre el túnel de la carretera de Gea a Albarracín.



Canal aguas abajo del túnel de la carretera de Gea a Albarracín.

Caso aparte supone el largo tramo medido en los escarpes llamado del Azud de Gea. En ellos la pendiente es ínfima, tal y como hemos explicado, como consecuencia de la calidad de la roca excavada. Aquí se ha medido una caída de tan solo 0,9 metros por cada mil y en una de las ventanas un resguardo de solo 0,45 metros de altura. Todo indica que esta ventana tenía capacidad de alivio o estaba muy próxima a cumplir tal cometido.

ALBARRACÍN - CELLA - ESCARPES DEL AZUD DE GEA	
	calado considerado 0,45
	calado máximo comprobado 0,45
Rugosidad	n = 0,016000
Area (m ²)	A = 0,405000
Perímetro Mojado (m)	P = 1,800000
Radio Hidráulico (m)	R = 0,225000
Pendiente (m/m)	S = 0,000915
Velocidad (m/s)	V = 0,699378
Caudal (m ³ /s)	Q = 0,283248

Observamos que este tramo supone uno de los limitantes de la capacidad, de entre los medidos en todo el acueducto, como consecuencia de su escasa pendiente. En toda esta zona hemos encontrado tramos muy horizontales en el canal. Estos limitaban tanto la velocidad del agua que, con pequeños aumentos de caudal, el calado crecía considerablemente aliviando con facilidad por las ventanas de menor altura.

ISAAC MORENO GALLO

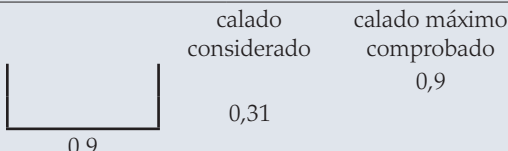


El canal en los escarpes del Azud de Gea.



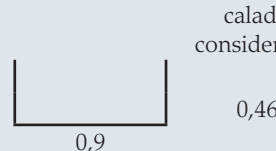
Ventana de registro en el barranco de los Burros con un resguardo de tres pies.

Uno de los tramos mejor conocidos y más fáciles de medir hoy, gracias a la limpieza efectuada, es el del barranco de los Burros. Aquí los resguardos mínimos medidos son del orden de tres pies todos ellos. Estas cifras son muy superiores de nuevo a las necesarias para la conducción del caudal normal de trabajo ya que la pendiente es aquí la más frecuente del acueducto, dos metros de caída por cada mil.

ALBARRACÍN - CELLA - BARRANCO DE LOS BURROS	
	
Rugosidad	$n = 0,015000$
Area (m ²)	$A = 0,279000$
Perímetro Mojado (m)	$P = 1,520000$
Radio Hidráulico (m)	$R = 0,183553$
Pendiente (m/m)	$S = 0,002273$
Velocidad (m/s)	$V = 1,026555$
Caudal (m ³ /s)	$Q = 0,286409$

En este tramo, de nuevo, con 0,31 m de calado, algo más de un pie, se conduce perfectamente el caudal normal de trabajo.

En la entrada del largo túnel, en el barranco de la Cañada de Monterde, hemos medido un tramo revestido de fábrica, de los pocos que hoy se conocen con esta factura en el acueducto. La pendiente es algo inferior a la de la generalidad del acueducto, siendo solo de 1,143 m de caída por cada mil. Para este tipo de revestimiento hemos escogido un coeficiente de rugosidad de 0.017.

ALBARRACÍN - CELLA - BARRANCO DE LA CAÑADA DE MONTERDE-ENTRADA DEL TÚNEL	
	
Rugosidad	$n = 0,017000$
Area (m ²)	$A = 0,387000$
Perímetro Mojado (m)	$P = 1,760000$
Radio Hidráulico (m)	$R = 0,219886$
Pendiente (m/m)	$S = 0,001143$
Velocidad (m/s)	$V = 0,724502$
Caudal (m ³ /s)	$Q = 0,280382$

De los sesenta centímetros de resguardo que hoy pueden medirse en el aliviadero de la entrada del túnel, dos pies, vemos que son necesarios cuarenta y tres para conducir el caudal normal de trabajo del acueducto. Algo más que en otros tramos, debido a la poca pendiente que presenta este tramo previo a la entrada del túnel.

Este aliviadero haría su papel, entonces, con caudales superiores a 434 l/sg. Este caudal podría producirse circunstancialmente como consecuencia del aporte de escorrentías superficiales procedentes de precipitaciones de cierta entidad. En este caso, el sobrante evacuaría por este dispositivo construido en forma de aliviadero.

Pero, el canal en el interior del túnel, tiene un pendiente media de dos metros de caída por cada mil. Dado que está obturado casi todo él, lo sabemos por las mediciones de las cotas hechas en los tramos medibles antes y después de sus bocas y la distancia entre ellos. La sección del canal en su interior es

como la de la mayoría del acueducto, con un ancho de 0,9 m o tres pies romanos. Por tanto, el cálculo del calado para la conducción del caudal normal de trabajo es el mismo que el realizado, por ejemplo, para el barranco de los Burros y éste sería de unos 0.3 m, o sea, del orden de un pie romano.

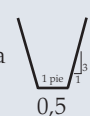


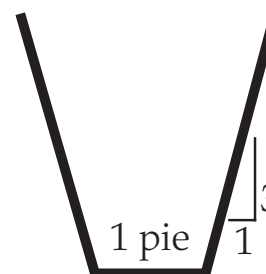
Canal en obra de fábrica en la zona anterior al gran túnel.



Canal en obra de fábrica en la zona anterior al gran túnel.

Estos factores, combinados con el cuello de botella que supone la sección en roca medida, con un ancho muy inferior a las contiguas, nos resulta por el cálculo que el canal debería ir prácticamente lleno, aguas arriba del estrangulamiento que supone la trinchera en roca, para que por esta pasase el caudal de trabajo sin desbordar aguas arriba.

ALBARRACÍN - CELLA - TEJERÍA-BARRANCO		
Sección trapecial en trinchera de roca		calado considerado 0,6
		calado máximo comprobado 0,6
Rugosidad	n = 0,015000	
Area (m ²)	A = 0,240000	
Perímetro Mojado (m)	P = 1,564911	
Radio Hidráulico (m)	R = 0,153363	
Pendiente (m/m)	S = 0,003680	
Velocidad (m/s)	V = 1,158725	
Caudal (m ³ /s)	Q = 0,278094	



Tras la salida del túnel se conoce un tramo en el llamado barranco de la Tejería. En él se aprecia un trozo excavado en trinchera de roca, de forma trapecial, con taludes de proporción: uno en horizontal –tres en vertical. Antes y después de este corto trozo, el canal está excavado en tierra con calado muy inferior al de la trinchera de roca y por tanto, claramente limitante.

Aunque la pendiente de este tramo es ligeramente superior a la media, de 3,68 m de caída por cada mil, el máximo calado disponible aquí es de solo 0.6 metros.

Trinchera trapecial en la margen izquierda del barranco de la Tejería. Su estrecha sección y el escaso resguardo del canal, antes y después de ella, condiciona la capacidad máxima del canal.

ISAAC MORENO GALLO



Tramo de canal en la margen izquierda del barranco de la Tejería.




El canal entallado en las eras de Cella.

Finalmente, en las eras de Cella, el canal presenta pendientes muy elevadas incluso antes del rápido apreciable a simple vista, en el tramo final que se interna en el casco urbano actual del pueblo. Este rápido final, es capaz de canalizar caudales muy superiores al necesario debido a su elevada pendiente.

El tramo inicial presenta una pendiente de 6,345 m de caída por cada mil, muy elevada también, pero que combinada con la escasa sección del canal en esta zona, con una anchura de tan solo 0,5 m, nos proporciona un calado mínimo de 0,43 m para conducir el caudal normal de trabajo del acueducto. Es decir, todo el canal excavado iba prácticamente lleno de agua en el momento de su uso.



El canal entallado en las eras de Cella.

ALBARRACÍN - CELLA - ERAS DE CELLA		
Superficie irregular, a veces ligeramente trapecial, equivalente a:	calado considerado	calado máximo comprobado
	0,43	0,5
Rugosidad	n = 0,018000	
Area (m ²)	A = 0,215000	
Perímetro Mojado (m)	P = 1,360000	
Radio Hidráulico (m)	R = 0,158088	
Pendiente (m/m)	S = 0,006345	
Velocidad (m/s)	V = 1,293827	
Caudal (m ³ /s)	Q = 0,278173	

Vemos por tanto que el canal está construido de acuerdo a un caudal determinado de uso, correspondiente al máximo habitual de la fuente de Albarracín.

La previsión de crecimiento poblacional parece haberse tenido en cuenta también, ya que el acue-



Tramo final del canal internándose en el casco urbano de Cella. Proceso de medición altimétrica.

ducto tenía una capacidad importante, comparada con los caudales que se conocen en otros del mundo romano.

En el siguiente cuadro vemos las dotaciones que se conocen en algunos acueductos romanos, pero téngase en cuenta que algunas ciudades tenían más de un acueducto de suministro.

ACUEDUCTO	CAUDAL (M ³ /DÍA)	CAUDAL (L/S)	HABITANTES POTENCIALES (250 L·H/DÍA)
Rodez	37.800	437,50	151.200
Colonia	35.000	405,09	140.000
Nimes	35.000	405,09	140.000
Cartago	30.000	347,22	120.000
Albarracín-Cella	23.857	276,12	95.428
Saintes nuevo	22.600	261,57	90.400
Poitiers	6.713	77,70	26.852
Perigueux	6.170	71,41	24.680
Tiermes	6.000	69,44	24.000
Sasamón	4.750	54,98	19.000
Saintes primitivo	4.085	47,28	16.340
Cahors	3.840	44,44	15.360
Lutecia	2.340	27,08	9.360

Si esta población romana de Cella no tenía un alcance poblacional tan importante como indica su acueducto, las pretensiones de cara al futuro parecían halagüeñas y en este sentido, parece haber sido planificada la obra. Por otro lado, mientras la población, junto con sus necesidades de ocio e higiene, no consumiese el caudal necesario, es posible que el sobrante fuera destinado a riegos u otros usos.

5. EL DESTINO

Se sabe que en el punto de destino del acueducto, en Cella, existió población romana. No se conoce con precisión la dimensión del yacimiento ni el alcance poblacional que tuvo en época romana, pero probablemente fue destruida siendo sustituida luego por una población medieval, de no mucha importancia, mencionada como *Celfa la del canal* en el Cantar de Mío Cid¹⁹.

19 Cantar de Mío Cid, I, 32, v. 649; I, 46, v. 869; II, 73, v. 1194.

Por su situación y génesis toponímica pudo ser la *Urbiaca* del Itinerario de Antonino, mencionada en la vía de *Caesaraugusta* a *Laminio*.

En lenguaje indígena el nombre (*ura* y *urba*) es indicativo de lugar de agua, que bien podría hacer referencia al gran manantial del nacimiento del río Jiloca, allí situado desde siempre. Literalmente, *Urbiaca* significaría acuática. Aún hoy, nombres con la misma raíz existen en euskera: *urbasa* es cenagal y *urbatu* es lago o charca.

En este sentido la topografía del terreno también indica que, aguas abajo de la surgencia conocida como el Pozo de Cella, había un pequeño endorreísmo que a buen seguro formó un encharcamiento en épocas históricas.

Almagro²⁰ nos dice que “Los actuales regadíos de Cella aprovechan la zona antigua lagunar y pantanosa que se mantuvo hasta su desecación a partir del siglo XII y que acabó dando origen a la actual Fuente de Cella”. Sin embargo, confunde los términos de la noticia, ya que la surgencia de Cella no tiene su origen en ninguna desecación que, en todo caso, se acometió bajo la cota 985 mientras que la fuente está en la 1020.

La fuente estuvo allí siempre, más o menos acondicionada para su aprovechamiento y como hemos indicado, lo más probable, es que diera nombre a la población indígena cuyos restos arqueológicos han sido atestiguados y que acabó romanizada como una importante ciudad en la vía de *Laminio*.

De entre los caminos antiguos que hoy afluyen a la población de Cella, hemos constatado la presencia del *Camino de los Moros* que comunica directamente Cella y Teruel y el *Camino del Collado* que llega a Cella desde Santa Eulalia. Los trazos de la *Carretera Antigua* y *Camino Real Viejo* de Zaragoza a Teruel, anterior al siglo XIX, quedan en Calamocha, Caminreal, Monreal, Torrelacárcel y Torremocha.

En alguno de ellos estará la infraestructura que soportó el tránsito de las mercancías que dieron esplendor a la antigua población romana de Cella. Pero, éste, es ya un estudio diferente al que aquí nos ocupa.

20 ALMAGRO GORBEA, A. 2002, p. 237: *Acueducto de Albarracín a Cella...* ob. cit.