

ANÁLISIS DE TÉCNICAS PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA INGENIERÍA HIDRÁULICA ROMANA

TECHNICAL ANALYSIS FOR WATER SUPPLY
IN THE ROMAN HYDRAULIC ENGINEERING

ÓSCAR BENITO SEGURA
Arquitecto Técnico

FRANCISCO JAVIER CÁRCEL CARRASCO
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ciencias Económicas y Empresariales

Ingeniería y Tecnología



ANÁLISIS DE TÉCNICAS PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA INGENIERÍA HIDRÁULICA ROMANA

**TECHNICAL ANALYSIS FOR WATER SUPPLY IN THE ROMAN
HYDRAULIC ENGINEERING**

ÓSCAR BENITO SEGURA

Arquitecto Técnico

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia

FRANCISCO JAVIER CÁRCEL CARRASCO

Dr. Ingeniero Industrial

Dr. Ciencias Económicas y Empresariales

Universitat Politècnica de València

Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia



Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L

Quedan todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida, distribuida, comunicada públicamente o utilizada, total o parcialmente, sin previa autorización.

© del texto: **los autores**

ÁREA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO, S.L.

C/ Els Alzamora, 17 - 03802 - ALCOY (ALICANTE) info@3ciencias.com

Primera edición: **Diciembre 2015**

ISBN: **978-84-944687-6-6**

Registro: **2015074464**

DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2015.10>

Summary of the book's research

The approach of this research work is the analysis and the comparison of the system of drinking water supply from the Roman times to the present day, analyzing three fundamental phases: acquisition, transport or pipeline and distribution in populations. The aim is to give a preliminary view of the differences in techniques, methods, treatment and quality of water supply. Will analyse each of the phases separately to thus be able to assess the progress achieved over time. Analysis of the techniques employed in Roman times has been extracted from the reading and comprehension of texts written by professionals who have done work referred to the subject matter that we try to, with regard to the analysis of supply today apart from the knowledge acquired through consultations to texts professional of the sector, expressing in this document practical professional knowledge of authors over years of work in the sector of distribution and supply of water to populations. Contribution on the ground as shown in graphic and written information of the Peña Cortada aqueduct.

Keywords:

Drinking water, hispania, hydraulic engineering, hydraulic system, roman aqueduct.

Resumen del libro de investigación

El planteamiento de éste trabajo de investigación es el análisis y la comparativa del sistema de abastecimiento de agua potable desde los tiempos de los romanos a nuestros días, analizando tres fases fundamentales: la captación, transporte o canalización y distribución en las poblaciones. El objetivo es dar una visión preliminar de las diferencias en cuanto a técnicas, métodos, tratamientos y calidad de suministro de agua. Se analizarán cada una de las fases por separado para de esta manera poder valorar el avance alcanzado a lo largo del tiempo. El análisis de las técnicas empleadas en tiempos de los romanos ha sido extraído de la lectura y comprensión de textos escritos por profesionales que han realizado trabajos referidos a la temática que tratamos, respecto al análisis del abastecimiento de hoy en día aparte de los conocimientos adquiridos por las consultas a textos profesionales del sector, expresando en este documento los conocimientos prácticos profesionales de los autores a lo largo de años de trabajo en el sector de distribución y suministro de agua a poblaciones. Como aportación sobre el terreno muestra información gráfica y escrita del acueducto de Peña Cortada.

Palabras clave:

Acueducto romano, agua potable, ingeniería hidráulica, hispania, sistema hidráulico.

Tabla de Contenido

Vocabulario Romano	11
Capítulo I. Introducción	13
Introducción	15
Capítulo II: La captación.....	17
El concepto	19
Las captaciones de gran caudal	21
Los manantiales	21
Los ríos	21
Las presas	21
Las captaciones de pequeño caudal.....	24
Las Galerías de infiltración	24
Los pozos.....	24
Las cisternas o aljibes.....	24
La comparativa	25
Capítulo III: El transporte, canalización	29
El planteamiento	31
El caudal necesario.....	32
La topografía	32
Las dimensiones del canal.....	33
La canal superficial	35
Los tipos	35
El revestimiento interior	36
Los Acueductos puente	37
Las proporciones.....	37
Los túneles.....	37

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Los pozos de registro	37
Los sifones	38
Equipos auxiliares de los acueductos	40
Los materiales	41
La comparativa	42
Capítulo IV: La distribución	47
El Concepto	49
Los depósitos.....	51
Los partidores.....	51
Las tuberías	52
Los elementos de regulación.....	53
La Calidad del agua.....	54
La comparativa	54
Capítulo V: Caso particular	63
El acueducto de Peña Cortada:	65
Capítulo VI: Conclusiones	71
Conclusión:	73
Referencias bibliográficas	75
Referencias bibliográficas:.....	77
Referencias de clásicos:.....	80
Relación de figuras	81
Relación de figuras y de tablas:	83

Vocabulario Romano

Acueducto; conducción de agua.

Aquilegus; zahorí

Architectus; el que diseña, calcula y presupuesta el acueducto.

Arcuaciones; arcos de fábrica por donde circula el agua.

Artifices; trabajadores especializados en algún oficio.

Caducae; agua sobrante o excedente.

Calciscoctores; especializados en mortero y hormigón.

Calix; cuarto de contadores.

Canalis structulis; solera.

Caput aquae; captación.

Caput fontis; captación.

Cippus; señalización correspondiente al eje del canal.

Contectis piscinis; decantador o aireador de agua.

Cuniculus; túnel.

Curator de aguas; autoridad principal.

Ferrarii; herrero.

Figulusii; alfarero-

Fistulis plumbeis; tuberías de plomo.

Fistulis fictilibus; cañerías de barro.

Fossorii; especialista en excavación y entibado de túneles.

Genículus; codo en la parte inferior de los sifones.

Institores; los que abastecen de material de construcción y herramientas.

Lapidarii; canteros que tallan las dovelas de los arcos.

Later coctus; ladrillo cocido.

Libra acuaria; nivel de agua.

Librator; nivelador, topógrafo.

Lignarii; leñador.

Machinatore; el que diseña y fabrica máquinas.

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Marmolarii; canteros que tallan piedras especiales y hacen molduras.
Metallarii; los que arrancan piedras de la cantera.
Navicularii; transportista fluvial o marino.
Ninfeos; grandes depósitos decorados.
Opus caementicium; hormigón.
Opus signimum; mortero de cal y ladrillo.
Piscinis limarea; estanque de decantación.
Plumbarii; especialistas en conducciones de plomo.
Plumbum; plomo.
Praedes; los que avalan a los contratistas.
Praepositi; capataz de obra.
Serrarii; los que cortan las piedras.
Silicarii; empedradores.
Specus; canal de conducción de agua o galería.
Spiramen; pozo de registro, inspección o arquetas.
Structores; especializados en mampostería y ladrillo.
Substructio; construcción a cielo abierto.
Tectores; trabajan el opus signimum para impermeabilizar las canales.
Teselarii; talla teselas de mosaicos.
Thermae; termas.
Tignarii; carpintero.
Vectularii; transportista terrestre.
Villicus; responsable técnico de conducción en sifones.
Villicus plúmbo; responsable técnico de conducción dentro de la ciudad.

Capítulo I. Introducción

Introducción

Como el trabajo se basa en una comparativa, aquí tenemos una que deja patente la importancia del agua:

El aire y el agua son sin duda, los elementos naturales más indispensables para el hombre. El aire lo es de manera inmediata e inaplazable. El agua, también de forma imprescindible, pero aplazable dentro de ciertos límites. El aire se obtiene sin esfuerzo, en todas partes y sin restricción. El agua tan solo existe en ciertos sitios y en cantidad variable de unos momentos a otros. Por ello se comprende que todas las civilizaciones antiguas hayan dependido de los lugares donde había agua. (De la Peña, 2010)

El ingenio humano ha permitido que los hombres puedan vivir alejados de las zonas por donde fluye el agua de forma natural. Esta independencia de las poblaciones respecto a la fuente, conseguida por el avance técnico del transporte del agua, ha permitido la expansión geográfica y el desarrollo de la civilización.

El interés del pueblo romano por el agua y su preocupación por que sea abundante y de calidad es un hecho notorio que podemos apreciar por las lecturas de numerosos autores y observando el legado que nos han dejado y que todavía quedan muestras a lo largo de todo su extinguido imperio. (Vitruvio, Frontino, Plinio...). Según Vitruvio, los conceptos a tener en cuenta para la realización de la obra son que debe ser útil, duradera y bella.

Decir que lo que se entiende por acueducto no es sólo el “puente acueducto” como la mayor parte de los humanos entienden, sino todo el tramo de conducción desde la captación del agua hasta la llegada a la ciudad.

El propósito de éste trabajo en cuanto a los tiempos de los romanos es el análisis de los acueductos de suministro de agua potable para consumo de la población, no analizando las conducciones para otros fines como los de riego o mineros porque la ejecución difiere en cuanto a los acabados, planteamientos, etc... .Por ejemplo no se cubría la canalización, no se daba un tratamiento de paredes y fondo para refino, etc...

Decir que los constructores de los acueductos en tiempos de los romanos, no siempre hacían las construcciones perfectas, también tenían sus defectos tanto de diseño, técnicos como de cálculo de costes, los cuales muchas veces se encarecían a medida que la obra se retrasaba. (Frontino).

El concepto de agua que tenemos, sólo contempla en la mayoría de nosotros el agua potable que bebemos y el agua sucia o usada (residual). Sin embargo podemos ampliar éste concepto de manera mucho más descriptiva; tenemos aguas de lluvia, de manantial, de pozo, de río, de pantanos, duras, blandas, termales, medicinales, de regadío, industrial y otros muchos tipos de clasificación, dándole a cada tipo un uso totalmente distinto. Pero nosotros solo nos referiremos al agua potable para consumo humano.

La base de éste trabajo es el líquido elemento H₂O esencial para todo tipo de vida en éste planeta desde el origen de todos los tiempos. Existen textos desde antes del segundo milenio antes de Cristo sobre la realeza hitita que dan valor al agua de calidad: “El agua que bebe en palacio ha de ser pura y no debe mancharse, por ejemplo, con cabellos ajenos” (Fatás, 2006).

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Se aporta documentación gráfica de un acueducto que es el más significativo de la Comunidad Valenciana; es el acueducto de Peña Cortada. Se incluye información extraída de la ponencia que realizaron José Luis Jiménez Salvador, catedrático de arqueología de la Universidad de Valencia y Juan José Ruiz López, arqueólogo, en Tuéjar en el congreso comarcal de arquitectura tradicional y patrimonio organizado por Tradiarq el 16 de Abril del 2015.

Pocas personas son conscientes de los procesos y del camino que recorre el agua hasta que con un pequeño gesto el agua brote del grifo.

Las comparativas que se realizan en cada uno de los temas son referentes a los sistemas actuales de instalaciones para dichos fines tratados en cada capítulo, y en concreto a la forma de trabajar en España y más concretamente en Valencia.

Capítulo II: La captación

El concepto

Para que la captación de agua para consumo humano fuera aceptada, se debían de dar sobre todo dos premisas: que la calidad del agua fuera buena y que la cantidad que suministrase fuese acorde a la demanda en cualquier estación del año. Los romanos consideraban que el agua para consumo humano debería ser agua no estancada, ya que de esa forma podría corromperse.

Tras la captación, y antes de canalizar las aguas a las conducciones que la transportaban hasta la ciudad, se aseguraba que ésta fuese lo más pura y transparente posible; pero en muchas ocasiones llegaba muy turbia y con mucho material en suspensión, entonces los ingenieros hidráulicos romanos construían balsas de decantación de las arenas y lodos. Vitruvio (VIII, 8, 3) lo recomienda para las aguas de uso público:

“... Si se hiciesen esos depósitos en número de dos o de tres, de modo que por decantaciones sucesivas pueda pasar el agua de uno a otro, ello daría por resultado un agua mucho más sana y agradable; porque, al quedar el limo sedimentado en cada uno de los depósitos, el agua sería en el otro mucho más clara y conservaría sin olor su sabor. En caso contrario será menester echarle sal y filtrar... “. Esto es, podía llegarse a flocular el agua por métodos químicos, para hacerla más potable y menos dura, para después pasarla por filtros.

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

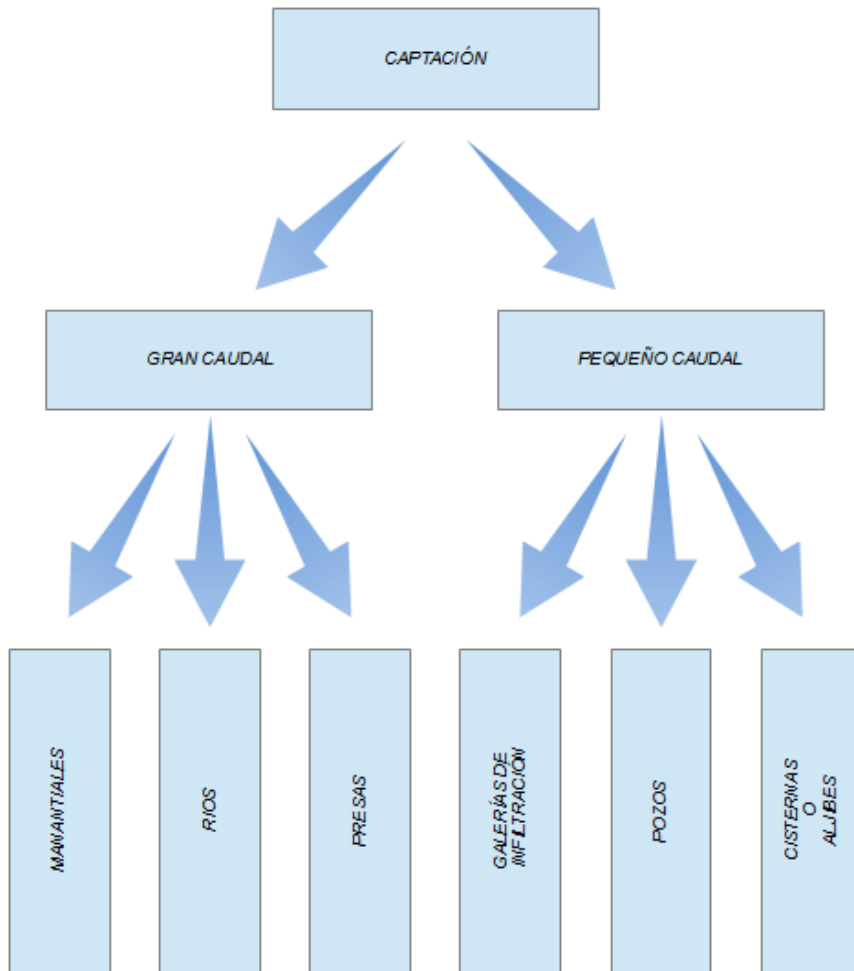


Figura 1. Esquema captaciones época de los romanos. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Las captaciones de gran caudal

Aquí consideraremos las captaciones que aportan el caudal suficiente como para abastecer a poblaciones relativamente grandes, o dicho de otra forma, las que son capaces de mantener el canal del acueducto en unos niveles de agua que justifiquen su construcción, durante todas las estaciones del año.

Los manantiales

La captación de agua de manantial era de lo más apreciado por la población romana, lo consideraban como de una calidad excelente, aunque según Plinio (XXXI, 21, 33) ellos sabían que este tipo de aguas no eran exclusiva garantía de calidad; pero sí lo daba en la mayoría de los casos.

Los ríos

La captación de río era muy común para los ingenieros romanos, eso sí la realizaban aguas arriba del río en lugares donde la contaminación era poco probable.

Las formas más utilizadas para la realización de la captación del río se hacían, según Vitruvio, atendiendo a las variaciones de caudales que pudiera haber a lo largo del año:

- Captación por derivación, se levanta una pequeña presa oblicua a la corriente de agua, de forma que se aumente la altura de la lámina de agua y así desviar por un lateral parte del agua que encauzaremos al canal del acueducto.
- Captación directa, abriendo por uno de los lados del río un canal que conecte directamente con el acueducto.

Las presas

No está claro que los romanos hiciesen presas para el consumo humano, según que autores leamos podemos sacar una u otra conclusión; no obstante en la siguiente tabla se citan las presas que en España han tenido una cierta consideración.

NOMBRE	ALTURA	RÍO	CUENCA
Almonacid de la Cuba	34,0	Aguasvivas	Ebro
Proserpina	21,6	Aº de las Pardillas	Guadiana
Cornalvo	20,8	Albarregas	Guadiana
Ermitea Virgen del Pilar	16,7	Santa María (Aguasvivas)	Ebro
Alcantarilla	15 a 20	Guajaraz	Tajo
Muel	13,0	Huerva	Ebro
Pared de los Moros	8,4	Aº Farlán (Aguasvivas)	Ebro

Tabla 1. Principales presas de la época romana en España. Fuente: Arenillas, 2002

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Una presa, para que sea efectiva, debe cumplir dos funciones simultáneas. Una es ser impermeable, la otra es ser lo suficientemente resistente como para aguantar el empuje del agua embalsada.

El agua embalsada crea un empuje hacia el exterior directamente proporcional a la profundidad que estemos considerando, creando un gradiente de presiones de forma más o menos triangular, de modo que en la parte inferior de la presa es donde se presentan los mayores empujes. Concretamente, para una simple pared vertical, aproximadamente a 1/3 de la altura total del agua embalsada. (Rubio, 2008).

Otro dato de especial importancia es el tipo de fábrica con que se ejecutaron, que fueron: (Fernández, 1972).

- Opus Quadratum.

Es lo que nosotros llamamos Sillería. Este era un tipo de construcción antiguo, pero reservado casi exclusivamente para las grandes obras, debido al enorme coste que levantar estos muros requería.

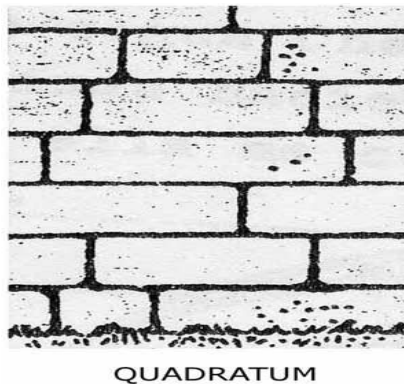
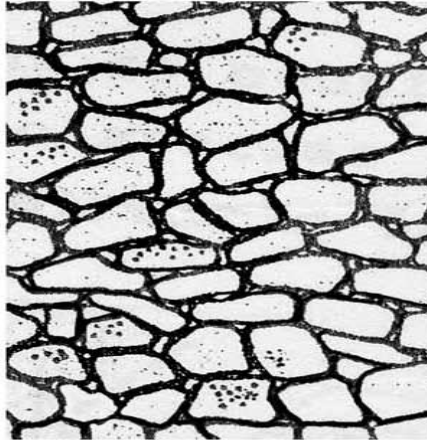


Figura 2. Representación de Opus Quadratum. Fuente: Rubio, 2008

Opus Incertum.

Este tipo de paramento es lo que habitualmente llamamos Mampostería. Habitualmente está hecho de piedras colocadas a mano (de ahí el nombre), trabadas someramente con pequeñas piedras (ripios). Es el tipo de construcción más primitiva con la que se levantaban muros de piedra. Tiene la ventaja de la relativa facilidad y rapidez de ejecución de la obra, pero precisamente por ello, adolece de ciertos problemas de inestabilidad cuando la altura del muro sobrepasa ciertos límites, debido a las juntas verticales, que tienden a separarse en cuanto aparecen asientos diferenciales en el terreno.

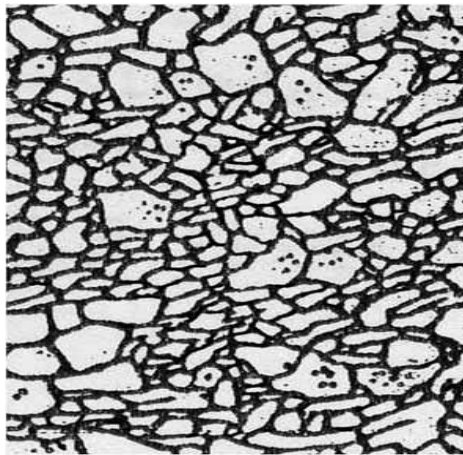


INCERTUM

Figura 3. Representación de *Opus Incertum*. Fuente: Rubio, 2008

Opus Caementicium

Este fue sin duda el gran logro de los arquitectos romanos. Pese a su nombre, no tenía nada que ver con el cemento actual, pues el aglomerante que empleaban era principalmente cal. Como tal, el *Opus caementicium* no se empleaba como paramento, sino que se usaba de relleno entre dos paredes confeccionadas con otros aparejos autoportantes.



CAEMENTICIUM

Figura 4. Representación de *Opus Caementicium*. Fuente: Rubio, 2008

Se solían usar varios tipos de fábrica en la misma obra, por ejemplo era habitual el hacer dos paredes paralelas de *opus incertum* y entre ellas rellenar con *opus caementicium*, para luego reforzar con *opus quadratum* el paramento de aguas arriba o la realización de contrafuertes aguas abajo. (Díez-Cascón & Bueno, 2001)

Las captaciones de pequeño caudal

Este tipo de captación es el que por sus características no es capaz de abastecer a una población relativamente grande a lo largo de todo el año.

Las Galerías de infiltración

Algunos autores lo consideran un tipo especial de pozo, pero con la diferencia de que la perforación es en horizontal con una pequeña pendiente para que el agua fluya hacia la salida de la galería. La longitud de estas perforaciones sería entre 20 y 100 metros, excavados bajo la montaña de manera que se interceptaba el nivel freático y alguna posible vena de agua. A la salida del túnel el agua drenada se conducía a un depósito y arenero o bien se conducía directamente a la conducción.

Los pozos

A causa de la escasa tecnología de la época, este tipo de captación no se usó nada más que para el uso individual o particular. La elevación de agua era muy costosa y la maquinaria requería mucho mantenimiento, por lo que no era rentable. Este tipo de captación también era muy apreciado porque el agua era de buena calidad y su frescura les daba a pensar que era saludable.

Las cisternas o aljibes

Este es el método quizás más antiguo de captación, el agua se obtiene de la lluvia y se guarda en unos depósitos llamados cisternas y que más tarde se terminó llamando aljibes. Vitruvio, (VIII, 8, 2) tras hablar de los pozos, trata de las cisternas. El agua obtenida así, solamente se podía utilizar para consumo propio o de una pequeña comunidad; pero no para el abastecimiento de una ciudad.(De la Peña, 2010).

En las ciudades sin acueducto una forma de aporte se hacía por cisternas. Las cisternas podían ser básicamente rectangulares, simples o compartimentadas comunicadas por un arco de medio punto, las más frecuentes, incluso se ha encontrado alguna fuente o ninfeo con una cisterna adosada. También cisternas con pozo. Todas ellas van recubiertas de bóveda de cañón y el exterior plano.

El problema de las cisternas eran las precipitaciones del lugar, que podría ser que no cubriera las necesidades de agua.

La comparativa

Hoy en día la procedencia de las captaciones no tiene la importancia que se le daba en tiempos de los romanos hace 20 siglos. Al estar obligados por ley al tratamiento del agua para consumo humano (lo mínimo sería una desinfección), la procedencia tiene su origen tanto superficial (ríos, lagos) como subterráneo (mediante pozos perforados verticalmente hasta encontrar el nivel freático). Para pequeñas poblaciones podría darse el caso de que la captación fuese de manantiales, pero para grandes poblaciones como es el caso, la procedencia del agua, dada la cantidad necesaria, debe ser de los sitios antes mencionados. También decir que con los métodos que tenemos hoy en día es posible desalar el agua de mar e incorporarla a la red para consumo, ya que una vez tratada es potable, el inconveniente es el coste de construcción de las plantas y su mantenimiento, al igual que la vida útil que es limitada.

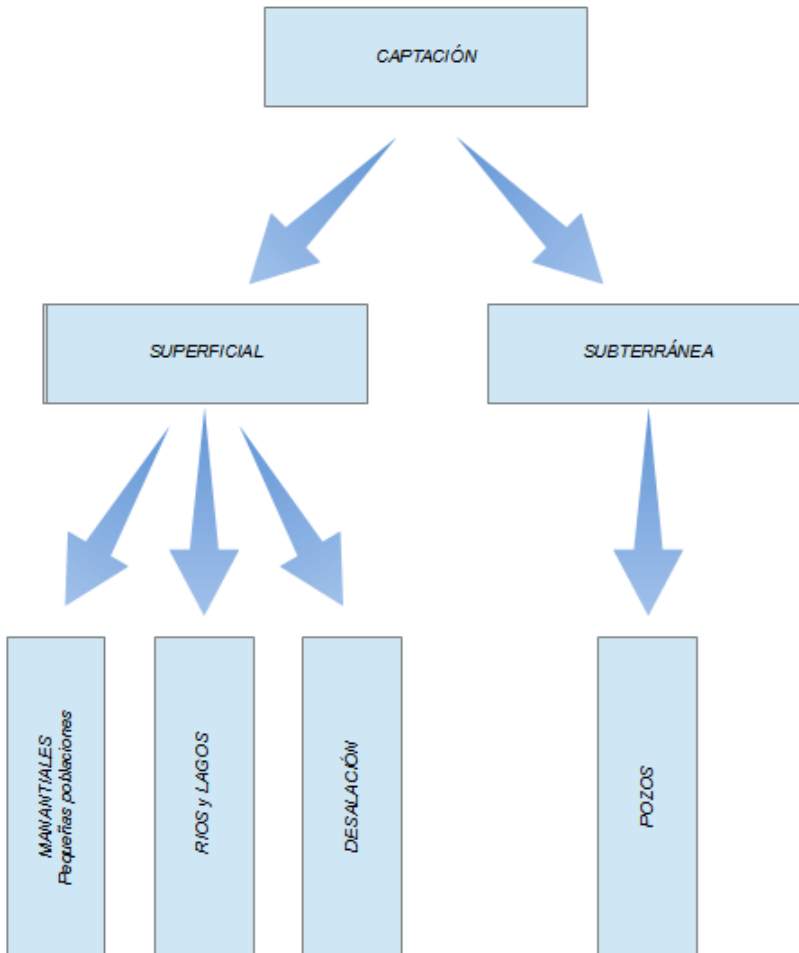


Figura 5. Esquema captaciones siglo XXI. Fuente: elaboración propia, 2015

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Un proceso de potabilización es mucho más complejo que una simple desinfección, para la desinfección basta con aportar cloro líquido al agua en una dosificación aproximada de 1 ppm (parte por millón), con lo que eliminaremos los microorganismos patógenos que contiene el agua. Para la potabilización se dan como mínimo cuatro pasos:

- Pre tratamiento, eliminación de cuerpos sólidos en suspensión.
- Coagulación, floculación, decantación; se trata de separar las pequeñas partículas en suspensión.
- Filtración, es un cribado muy fino con arenas finas.
- Dosificación de cloro y elevación a depósito para su posterior canalización a los lugares de consumo.

Para la extracción del agua de los pozos usaremos las bombas sumergidas en el agua contenida en la capa freática en donde se ha hecho la perforación. Realmente son un grupo formado por dos elementos principales que en orden de abajo arriba son:

- Motor, suelen ser motores eléctricos de tensión trifásica que hacen mover un eje vertical que está conectado mecánicamente al siguiente componente.
- Bomba, es el elemento encargado de elevar el agua desde el nivel del agua de la capa freática hasta la superficie.

En esta bomba sumergible se puede apreciar de abajo hacia arriba las partes de que se compone; motor refrigerado por agua, bomba impulsora y cuatro rodetes que hacen que la presión de impulsión sea mayor (a más número de rodetes mayor presión de impulsión).



Figura 6. Grupo motor-bomba sumergido. **Fuente:** Redhip, 2013

También existen los grupos moto-bomba de bancada, que por su disposición pueden ser verticales u horizontales. Estos grupos se usan para elevar el agua a depósitos o para aumentar la presión del sistema.

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Hoy día es muy habitual que el funcionamiento de las bombas (grupos moto-bomba) se haga con variadores de velocidad, que son aparatos electrónicos que regulan a través de la variación de la frecuencia del motor, la velocidad con la que giran los motores. Si controlamos la velocidad de giro del motor conseguimos controlar el caudal y la presión de la red, de forma que controlamos el suministro.

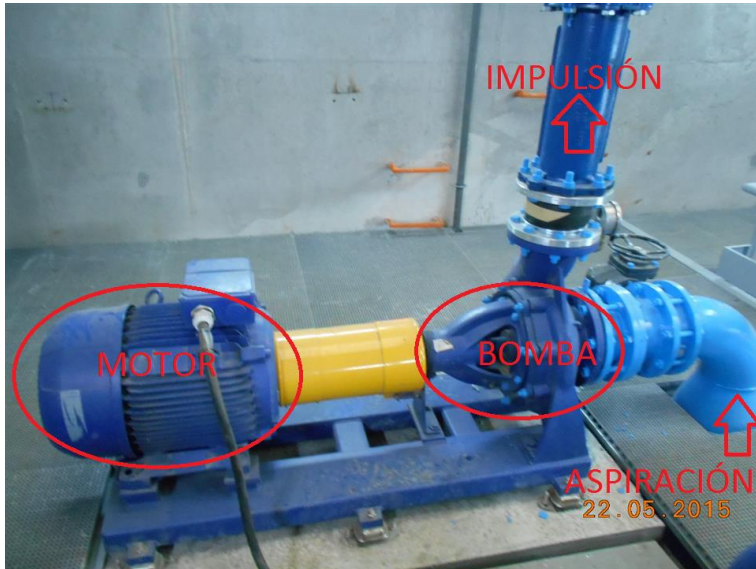


Figura 7. Partes de una bomba de bancada. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Capítulo III: El transporte, canalización

El planteamiento

Para la realización de un acueducto, entiendo que antes había que plantearse varias preguntas y hacer un estudio de viabilidad, trayecto, dimensiones, obstáculos, pendientes... La conducción iría en canal, "specus", "canalis" o "rivus", debería ir cerrada por que como hemos dicho al principio es para consumo humano.

Según el tamaño de la localidad, se estructuraba la red de abastecimiento de agua, de esta manera podemos encontrarnos un único acueducto de abastecimiento, un grupo de acueductos, o acueducto compartido.

El más común es el acueducto único, se canalizaba el agua desde el manantial hasta la ciudad a distancias normalmente kilométricas salvando los diferentes obstáculos geográficos y técnicos hasta la entrada a la ciudad. El recorrido elegido era la labor más complicada para los técnicos, ya que debían elegir un itinerario por donde se pudieran mantener las pendientes de forma constante, no alargar las distancias desproporcionadamente y mantener lo más posible el régimen laminar el agua para mantenerla lo más pura posible.

Cuando las ciudades eran más grandes y pobladas, podía ser necesario más de un acueducto.

El acueducto compartido es cuando un único acueducto abastecía a una región; compartiendo el acueducto varias localidades. Eso sí, cada localidad tenía su propio depósito principal de distribución y desde allí se distribuía por la ciudad.

Problemas a tener en cuenta a la hora de plantearse si es posible la ejecución de un acueducto cuando las cotas de altitud entre origen y destino de la canalización son pequeñas (gradiente hidráulico):

- que la diferencia de cota entre la captación y destino sea positiva (que la captación no esté a menor cota que la población a suministrar)
- Si la diferencia de cota es mínima respecto a la longitud entre el origen y destino de la canalización (% de la pendiente bajo), se plantea un gran problema para que sea una pendiente uniforme.
- Si la pendiente es mínima debemos saber calcular la sección del canal para que el caudal circulante sea el que requiere la demanda de la población.
- Sin olvidar que las paredes del canal y su solera producen una pérdida de carga considerable cuando hablamos de miles de metros de distancia, factor éste muy importante cuando la pendiente es mínima.

Otra cuestión a tener en cuenta es los costes de construcción, como curiosidad aporto una tabla en la que aparece reflejado el coste de algunas conducciones en Roma.

COSTES MEDIOS DE CONDUCCIONES DE AGUA EN ROMA (basado en el coste de las conducciones Marcia y Claudia-Anión Nuevo)			
Conducción	Longitud		Coste construcción (sextercios)
	pasos	metros	
Apia	11.190	16.561	32.641.230
Anión Viejo	43.000	63.640	125.431.000
Marcia	61.710	91.331	180.000.000
Tépula*			
Julia	15.426'5	22.831	48.158.037
Virgen	14.105	20.875	44.658.007
Alsietina	22.172	32.815	70.483.604
Augusta	800	1.184	2.578.628
Claudia	46.406	68.681	154.530.664
Anión Nuevo	58.700	86.876	195.469.336
TOTAL	273.509'5	404.794	853.950.506

Tabla 2. Coste de los acueductos en la época romana.

Fuente: De La Peña, 2010

El caudal necesario

La anchura de las zanjas (specus) era variada, dependiendo del caudal a transportar.

Por oposición a los conductos a presión, en los que el agua llena completamente el conducto, en un canal abierto, siempre existe una superficie libre en contacto con el exterior, y a la presión atmosférica, que normalmente tomaremos como referencia, y de valor cero. Este hecho, por una parte facilita los cálculos, pues el término de presión lo podemos eliminar, al ser conocida en los dos extremos del canal, pero por otra parte lo complica, al resultar la forma de la superficie libre desconocida. Tiene una distribución tridimensional de velocidades, mayores en el centro, y menores a medida que nos acercamos a las paredes y a la solera, que llega a ser cero, un canal cualquiera, de forma rectangular, el rendimiento hidráulico óptimo se obtiene, cuando el calado es la mitad del ancho del canal.

Los romanos intuían el principio de la conservación del caudal, esto es, que el caudal es constante en todo el recorrido, por lo tanto en los tramos de menor pendiente, la velocidad del agua es menor, y por consiguiente, aumenta el calado, mientras que en los tramos de mayor pendiente, el calado disminuye.

La topografía

La topografía era importante en el sentido de que de ella dependería la longitud de la canalización, del número de puentes, túneles...

La pendiente del trazado estaba condicionada sobre todo para que la velocidad del agua no fuera elevada para no producir erosiones en el canal, que además del deterioro del mismo generaba que se mezclasen partículas en suspensión en el agua y por tanto que la calidad de la misma se redujera. Para corregirlo una solución es ensanchar el canal para reducir la velocidad, con lo que se produce la decantación de las partículas en suspensión.

Para realizar las obras debieron recurrir a los conocimientos de geometría que los matemáticos egipcios y griegos lograron desarrollar con anterioridad. Uno de los instrumentos más utilizados fue la dioptra, servía para medir ángulos con precisión, tanto verticales como horizontales necesaria para las grandes parcelaciones, la triangulación en grandes superficies, también estaba como instrumento de precisión el corobate, que apoyado sobre trípode también realizaba funciones topográficas.

Las dimensiones del canal

Una norma que parece se cumplía era que la sección del canal era rectangular y que la altura de la lámina de agua era la mitad que la anchura de la canal, este dato era una consideración a la hora de calcular el caudal circulante.

Suelen presentarse tres invariantes en el trazado, que afectan sensiblemente a las dimensiones del canal:

- El primer tramo, el más cercano a la captación, suele tener una pendiente muy pequeña, menor que el resto. El motivo podría ser el asegurarse durante todo el recorrido que el caudal no sobrepasara una cierta profundidad, pues una cosa que sin duda los ingenieros hidráulicos conocían perfectamente, es que en un caudal uniforme, el calado de la corriente de agua es inversamente proporcional a la pendiente de la misma.
- En el tramo intermedio la pendiente aumenta, en algunos casos de forma notable. Estos grandes cambios de pendiente, no son en general demasiados largos, por lo que pueden muy bien ser debidos a una cierta aplicación industrial del acueducto.
- En el tramo final, cerca de la entrada de la ciudad, la pendiente vuelve a ser pequeña. La explicación de esta pendiente mínima parece claro que obedece a dos motivos principales:

Favorecer la acción de los elementos decantadores al circular el agua más lentamente, depositándose los elementos en suspensión en el fondo del canal.

Cuando las ciudades estaban situadas en lugares elevados se hacía indispensable el levantamiento de un canal elevado sobre pilares.

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

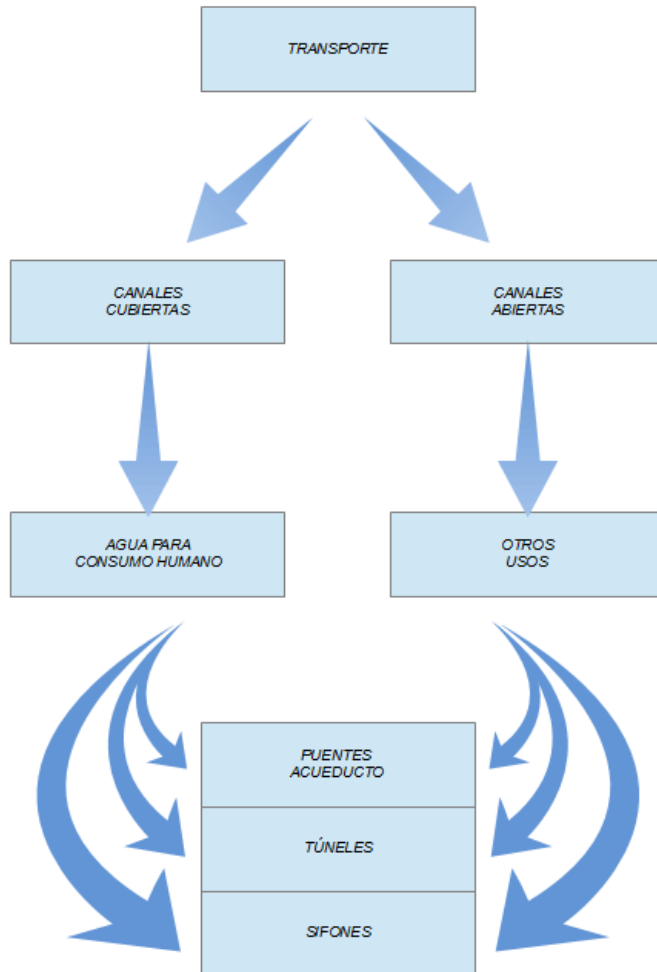


Figura 8. Esquema transporte época de los romanos. **Fuente:** elaboración propia, 2015

La canal superficial

Según los romanos el agua debe ir a salvo de la luz para que no proliferen las algas, bacterias, etc. por lo que estaban cubiertas en la mayoría de los tramos de los acueductos para agua de consumo humano, también servía para que el agua no se ensuciara con polvo, materia orgánica, obstrucciones por derrumbes en terrenos montañosos etc.

Según el volumen que ocupa el agua dentro de la canal distinguimos los de agua rodada o canales abiertos y los sifones o de agua forzada.

Los tipos

La parte superior del *specus* se cubría generalmente con una bóveda de cañón continua. Los materiales de los cuales estaba hecha, generalmente eran los de la zona. Podían ser ladrillos, o simplemente lajas de piedra. El resto, hasta el nivel del terreno se cubría de tierra.

Así Vitruvio (VIII, 7, 2) comenta respecto a la necesidad de cubrir el canal:

“... Si la conducción se hiciese por zanjas o canales, las obras de albañilería deben ser lo más sólidas posible y con una pendiente de no menos de un cuarto de pulgada por cada cien pies de longitud, siendo además necesario que la construcción esté cubierta con bóveda, a fin de que el sol no toque de ningún modo el agua...”

Los tipos según la cubrición podemos enumerarlos de la siguiente forma:

1. Bóveda, es el más utilizado.
2. Dintel plano, utilizado para desagües o arquetas de canalización de tuberías.
3. Apuntado, bastante utilizado por su rápida y fácil construcción, pero con peor inspección y estanqueidad.
4. Falsa bóveda, poco frecuente.

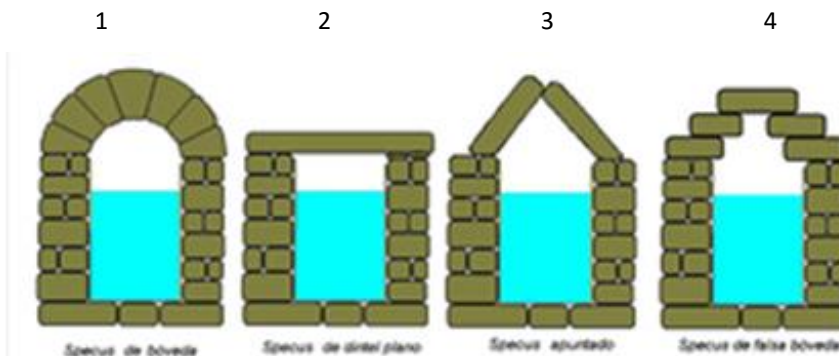


Figura 9. Diferentes secciones de canales según el tipo de cubierta. Fuente: De la Peña, 2010

El revestimiento interior

Los canales estaban impermeabilizados (*opus signinum*) por varios motivos tales como no perder el agua, evitar que las corrientes de agua provocasen el deterioro y posible destrucción del acueducto, conseguir que el agua a su paso tenga el menor coeficiente de fricción (pérdida de carga) sobre las paredes del canal, por lo se conseguía también con ello tener un flujo laminar y no provocar turbulencias. También se trataba de que la sección fuese uniforme, con cambios de dirección suaves y pendientes uniformes y pequeñas para que la velocidad del agua fuese constante pero no elevada.

La impermeabilización se conseguía con capas sucesivas de *opus signinum*. Siendo el espesor de las mismas variables, en las paredes laterales no solía pasar de 4 cm., pero en la cara del fondo, hay mucha variedad. El acueducto de Trembaly sólo tiene 2cm, el de Cartago 13, y el *Aqua Marcia* 18 (Malissard, Alain. 2001). También, para dar mayor estanqueidad se solía encintar las esquinas de unión entre las caras laterales y el fondo, con un cuarto bocel de *Opus signinum*.

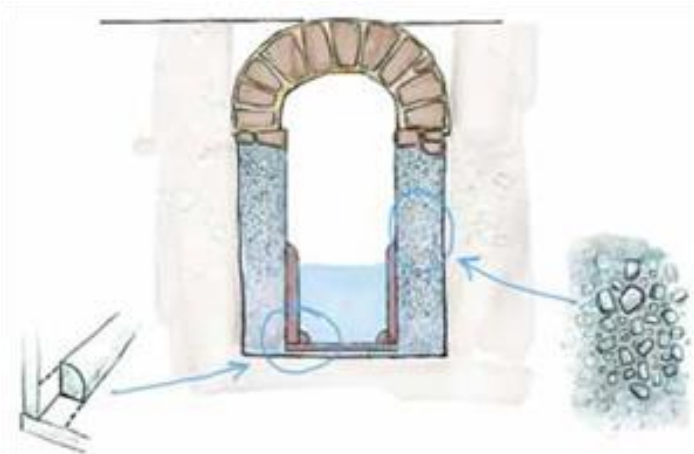


Figura 10. Sección de una conducción tipo. **Fuente:** Feijoo, 2006

Los Acueductos puente

Los materiales utilizados en las arcuaciones, refiriéndonos a los arcos de los puentes acueducto, por norma general eran de la zona. Los puentes eran de uno, dos o tres hileras de arcadas.

Las proporciones

Geométricamente se había preconcebido unas proporciones entre la altura del arco de medio punto y la anchura o luz del arco; así podemos hablar de la razón áurea, la proporción cordobesa... entre las más usuales.

La razón áurea es la proporción entre los lados de un rectángulo particular. Vino enunciada por primera vez por Euclides de Alejandría en su libro III de su "Tratado de los elementos". La formulación de Euclides se limitaba a establecer que un rectángulo encierra la máxima belleza si resulta semejante a otro formado por su lado mayor y la suma de ambos lados. El "rectángulo áureo" se obtiene como proporción entre el radio de la circunferencia circunscrita a un decágono regular y el lado del mismo. Al número 1,618... se le llama por lo mismo, "Número de oro".

La llamada proporción cordobesa se obtiene entre el radio de la circunferencia circunscrita a un octógono regular, y el lado del mismo. El cociente obtenido es el llamado Número Córdoba 1,3065...

Los túneles

Las elevaciones del terreno, planteaban tantos problemas como las depresiones, sin embargo, jamás los ingenieros romanos dudaron en perforar las montañas cuando era necesario. Es notable en este aspecto la experiencia adquirida en la excavación de túneles mineros, técnica anterior a los acueductos. Es por esto que los túneles abundan más que las grandes *arcuationes* y mucho más que los sifones.

El mismo Vitruvio, recomienda en el capítulo VII de su libro VIII referido al agua, horadar sin más ante la presencia de un obstáculo en el trazado de un acueducto.

Los túneles, generalmente empezaban a excavarse por los dos extremos. Si tenían una longitud considerable, se empezaban también por puntos intermedios, manteniendo siempre la misma pendiente.

Los pozos de registro

Los pozos de registro los encontramos en los tramos de canalización enterrada o que discurre bajo la superficie del terreno.

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

En la construcción del acueducto en túnel es por donde se empieza la excavación de la obra, por ellos se introduce el replanteo de la planta y del alzado del eje del canal y por ellos se extrae el material de la excavación.

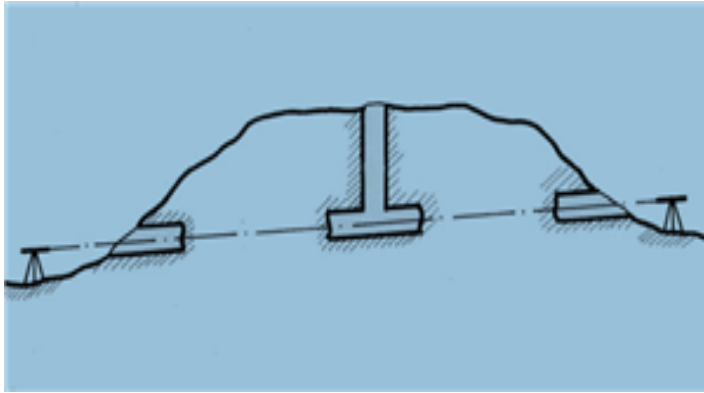


Figura 11. Excavación de túneles. **Fuente:** Rubio, 2008

Otro uso muy importante de los pozos de registro es el mantenimiento del canal del túnel, para la limpieza e inspección. Además también servía de referencia para poner los balizamientos del acueducto en superficie, donde se colocaban los hitos de policía de salvaguarda del acueducto (Moreno, 2010).

Los sifones

Los romanos no eran muy partidarios de la construcción de sifones, por las dificultades que ello entrañaba. Tener en cuenta que un sifón romano es un sistema que permite el paso de agua de un lugar a otro por gravedad, y que las presiones de entrada y de salida son la misma.

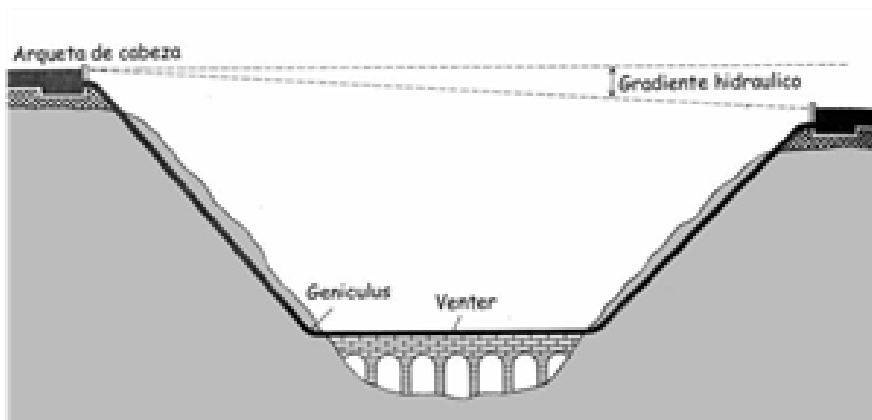


Figura 12. Esquema de un sifón romano. **Fuente:** Rubio, 2008

Varios fueron los problemas a los que se tuvieron que enfrentar y que no fueron completamente capaces de resolver, el primero con las cañerías de plomo y cerámicas, fue el de la estanqueidad para las altas presiones a las que las tuberías de los sifones estaban sometidas. El otro gran problema fue la extracción del aire de las conducciones en los sifones.

Cuando la depresión a salvar era demasiado profunda (Si tenemos en cuenta que el "record" de altura de unas *arcuationes* está aproximadamente en 50 m. en el Pont du Gard, es de suponer que este era el límite) se procedía a la construcción de un sifón.

En un principio, los sifones eran simples tuberías apoyadas en las laderas de las montañas, con una parte horizontal (*Venter*) en el fondo del valle, para suavizar el cambio de dirección, y un acodamiento más o menos pronunciado en cada extremo de la parte inferior (*Geniculus*).

Posteriormente las tuberías se enterraban por dos motivos: uno era protegerlos de la rapiña, y el otro era evitar en la medida de lo posible que los cambios de temperatura afectasen a las dilataciones de las tuberías. Otra medida imprescindible en las arquetas de cabecera era un buen sistema de decantación de arenas y limos.

Los ingenieros romanos, a base de sentido común, llegaron de una forma empírica a solventar la manera de enfrentarse a tres fuerzas que aparecen en los sifones: La resistencia de las paredes, la presión estática, y la pérdida de carga.

La resistencia de las paredes del sifón es debida a que en el mismo, la superficie de contacto entre el agua y la tubería es total, a diferencia de lo que ocurre en los canales, donde la superficie del agua rueda libre. Esto hace que el rozamiento sea comparativamente mayor en los sifones que en los canales abiertos. Por ello, si las arquetas de entrada y de salida del sifón se colocasen a la altura que correspondería a un canal de agua rodada, al agua fluiría tan despacio que acabaría desbordándose en la arqueta de cabecera. El gradiente hidráulico necesario, para un sifón ha de ser por lo tanto mayor. Generalmente duplica la pendiente normal del acueducto.

La presión estática es la que soporta la tubería debido a la profundidad a la que está respecto a la arqueta de cabeza. Esta presión es independiente de si el agua está quieta o en movimiento. Cuando la presión era muy elevada se recurrían las tuberías de plomo. Cuando no era demasiado alta, se colocaban tuberías cerámicas.

Las tuberías de plomo se fabricaban enrollando sobre un cilindro de madera una plancha de plomo, y posteriormente soldando la junta. Las longitudes de estas tuberías eran de unos tres metros. El ancho de la plancha de plomo, oscilaba entre tres y cinco centímetros. (*Hodge, 2002*)

*Las tuberías cerámicas presentaban el inconveniente de la estanqueidad, y de la relativamente escasa resistencia a la tracción que presenta la cerámica. La resistencia la obviaban empleando estas tuberías en aquellos sifones que no estaban sometidos a una presiones demasiado altas, y la estanqueidad la resolvían empleando una pasta adherente especial (*Malthae*) que menciona Plinio el Viejo.*

En otras ocasiones, y sin duda impelidos por la necesidad, se vieron obligados a construir las tuberías de piedra. Es el caso del sifón de Cádiz, formado por el ensamblaje de miles de piedras perforadas y unidas con *Maltae*.

El tercer problema que los ingenieros romanos debieron solventar fue el de la pérdida de carga inercial del agua (debida al movimiento) en los codos de la cañería. Por una parte habría que anclar fuertemente los codos, pues la pérdida de carga se produce siempre hacia el exterior de la curva.

Aparte de esto, debían tener en cuenta el llamado “golpe de ariete” que se produce en una tubería acodada cuando se somete a presión bruscamente. La tubería pues, debe ser llenada poco a poco para evitar que reviente en el primer codo. Al mismo tiempo, para vaciarla, tampoco debe cortarse el suministro de golpe, pues el efecto de onda de choque que se introduce, hace que esta se dispare en el interior de la tubería.

Equipos auxiliares de los acueductos

Para que el agua conservara su calidad, lo que se hacía era antes de empezar a hacer su recorrido por el acueducto era pasarla por un depósito de decantación “*piscinae limariae*” según Frontino (XV, 2).

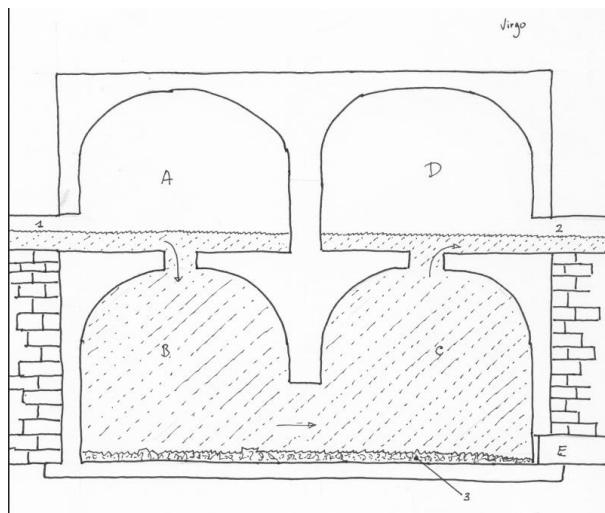


Figura 13. Esquema de un decantador romano. Fuente: Rubio, 2008

Luego en las proximidades de las ciudades se volvía a hacer pasar por otro decantador y aireador del agua, llamado “*contectis piscinis*”. También servían como decantadores los propios depósitos de distribución de las ciudades.

A lo largo de las conducciones se disponían equipos para optimizar el funcionamiento del sistema. Podemos clasificarlos según su finalidad.

Calidad: desarenadores, aireadores.

Cambio de carga hidráulica: pozos o cascadas, resaltos, escaleras.

Regulación de caudal: aliviaderos laterales, desviadores.

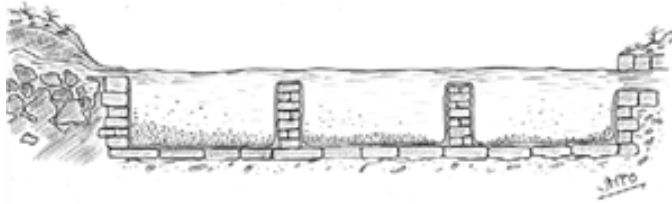


Figura 14. Esquema decantador de arenas, junto a la toma de agua de la conducción.

Fuente: De la Peña, 2010

Los materiales

No tenían los conocimientos que hoy tenemos sobre la confección de morteros, hormigones y demás materiales en los que para que tengan unas determinadas características, es necesario tener conocimientos de química, microscopía, etc., ellos deducían el comportamiento de los materiales de forma empírica, por lo que incurrían en errores y contradicciones a menudo.

En lo que sí llegaron a ser unos verdaderos maestros, fue en la confección de hormigones de cal. Hoy en día nosotros usamos como aglomerante el cemento, ellos usaban la cal, cuando unían la cal con arena y agua obtenían el opus caementicium, lo que nosotros llamamos hormigón.

La cal, los romanos no fueron los inventores de la cal de obra, aunque sí fueron los primeros que la emplearon de forma masiva como elemento aglomerante de construcción. (Hernández, 2002)

Las cales en construcción se dividen en cales hidráulicas, capaces de endurecer bajo el agua y cales aéreas, que no endurecen bajo el agua. Los romanos utilizaron las cales aéreas, ya que las hidráulicas desconocían la tecnología necesaria para su confección, sí decir que de forma indirecta consiguieron acercarse a ellas cuando mezclaban “polvo de Puzol”, que no es otra cosa que un polvo volcánico con sílice y alúmina. Este polvo mezclado con cal, formaba una pasta que era capaz de fraguar y endurecer bajo el agua.

La cal aérea es el resultado de la descomposición por calor de las rocas calizas, formadas básicamente por carbonato cálcico. Cuando la roca alcanza los 900 °C se descompone en dióxido de carbono y óxido de calcio. El óxido de calcio es lo que llamamos “cal viva”, que es muy inestable, pues cuando reacciona con el agua da hidróxido de calcio y desprende calor. El hidróxido de calcio es lo que llamamos “cal apagada”. La cal apagada la usamos como pasta que fragua lentamente en dos tiempos, primero pierde el agua de amasado y luego se produce la carbonatación, que consiste en la absorción por parte del hidróxido de calcio del anhídrido carbónico del aire, formando el carbonato cálcico. Vemos que al final del proceso hemos obtenido de nuevo el carbonato cálcico, por lo que al menos teóricamente hemos reconstruido la roca natural.

La cal hidráulica fragua bajo el agua. Cuando mezclamos arcilla del 8 al 20% y caliza, a la sometemos a temperatura superior a 900°C reaccionan el óxido de calcio, el anhídrido silíceo y la alúmina, formando silicatos y aluminatos, que al reaccionar con el agua forman hidrosilicatos e hidroaluminatos que cristalizan en forma de cristales entrecruzados, formando una masa compacta que al necesitar agua para el endurecimiento, puede hacerlo bajo el agua.

Los morteros. Cuando la cal se seca y se endurece, sufre una considerable pérdida de volumen que la hace resquebrajar. Este es el motivo por el que no es muy idónea en estado puro como material de construcción. Desde muy antiguo se supo que mezclándola con arena de distintos grosores, se evitaban estos efectos nocivos. A esta mezcla de cal y arena es a lo que llamamos mortero. Al conjunto de arena y grava, le llamamos árido. Una clasificación genérica del tipo de árido sería de mina, de río y de playa.

El material de revoco por excelencia era el opus signinum, este compuesto de arena de río, fragmentos de cerámica y cal, tenía buen comportamiento con el agua, por ello lo usaban para recubrir los canales, cisternas, depósitos, por su buen comportamiento en cuanto a impermeabilización.

Los ladrillos. A la obra levantada con ladrillo se le llamaba opus testaceum. Los ladrillos se obtienen de la cocción de la arcilla, que es un silicato aluminico hidratado. La materia prima es el caolín. Cuando la arcilla, simplemente está seca, puede volver a formarse una pasta moldeable en contacto con el agua. Si se emplea para construcción en forma de ladrillo, se llama adobe. Cuando la arcilla pierde el agua de composición, es cuando decimos que la arcilla está cocida. En ese punto ya no vuelve a poder moldearse en contacto con el agua.

Vitruvio Menciona tres tipos de ladrillos, aunque los romanos sólo usaron uno, el llamado didoron que tiene 1 pie de largo y 1/2 de ancho.

Las piedras son otro de los elementos constructivos fundamentales empleados por los romanos. De hecho, es el más antiguo. La variedad de la piedra era tal que su uso en construcción se hacía necesario en función de las proximidades, salvo en el caso de la construcción de lujo, y evidentemente como capricho de algún potentado.

La comparativa

Las plantas potabilizadoras necesitan una extensión de terreno de miles de metros cuadrados, por lo que económicamente no es rentable su ubicación dentro del casco urbano de las ciudades. También hay que tener en cuenta la situación de los puntos de captación o entrega del agua a potabilizar.

El transporte hasta los lugares de distribución se le llama aducción (acción de conducir), es decir desde los depósitos de salida de plantas potabilizadoras hasta la distribución a poblaciones. El tamaño de estas tuberías es muy variado, dependiendo del suministro requerido en las horas de mayor demanda, de forma que se aporte el caudal necesario y que la presión en el punto de suministro no baje por debajo de unos límites. Para el cálculo y dimensionado de los elementos de la red existen programas que tienen en

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

cuenta multitud de factores para calcular las características de los elementos a instalar en la red, por ejemplo tenemos el Sara, Infoworks y quizás el más utilizado Epanet que es un programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, con ellos podemos analizar los sistemas de distribución y hacer simulaciones hidráulicas, obteniendo los datos de caudal, velocidad, presión y altura.

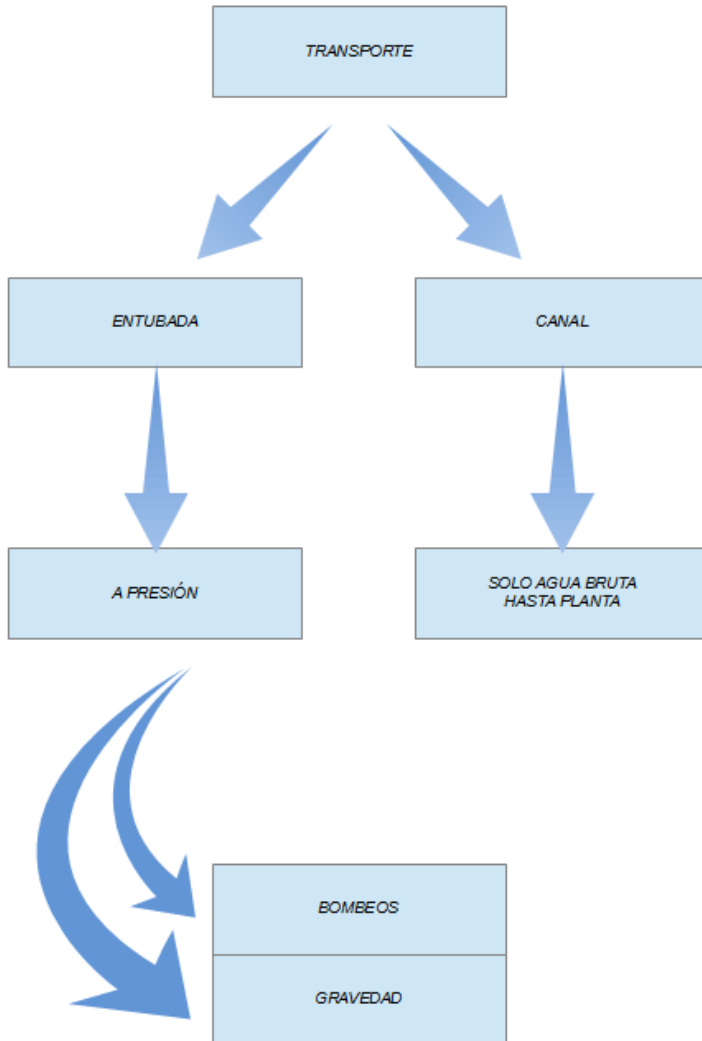


Figura 15. Esquema transporte siglo XXI. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Las aducciones pueden ser de varios tipos, las más significativas serían:

- Aducción por gravedad, el agua circula por la diferencia de la cota geométrica entre dos puntos.
- Aducciones por bombeo, es necesario bombear el agua para que circule entre los dos puntos.

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

- Aducciones por presión, el conducto se encuentra lleno y a presión.
- Aducciones por lámina libre de agua, el agua no cubre toda la superficie del conducto.
- Aducciones simples, no hay elementos intermedios entre los dos puntos.
- Aducciones con elementos intermedios, para el control y correcto funcionamiento de la instalación se ponen elementos tales como válvulas reductoras de presión, automáticas, etc...

A lo largo de la red de aducción tenemos elementos para el control de la conducción. Entre los más importantes cabe citar las válvulas que intercaladas entre las tuberías, lo que hacen es regular las presiones, caudales y poder cortar el suministro en caso de que se origine una fuga o rotura en la red.

Las conducciones son cerradas, de sección circular y los materiales con los que están hechas las tuberías pueden ser: (García & Pérez, 2012)

- Metálicos, de fundición dúctil o acero. Se utilizan en grandes diámetros.
- Hormigón armado y pretensado, también para diámetros grades, aunque su uso es menor que los metálicos.
- Materiales plásticos, usados para diámetros más pequeños.

Otro punto muy importante y que los romanos no supieron controlar fue el problema que causaba el aire cuando se quedaba dentro de los sifones, este problema lo solucionamos con la colocación en determinados puntos de las conducciones de las ventosas. La misión de las ventosas será la de dejar entrar o salir el aire de la conducciones según si estamos llenando o vaciando las tuberías y la otra misión muy importante es eliminar el aire liberado en el transcurso del funcionamiento del sistema; este aire liberado en la conducción tiene orígenes como el cambio de la temperatura o la presión (a > presión >el aire que puede disolver, lo mismo con la temperatura pero al revés), los vórtices de la aspiración de bombas y en las depresiones creadas por una presión negativa dentro de la conducción.

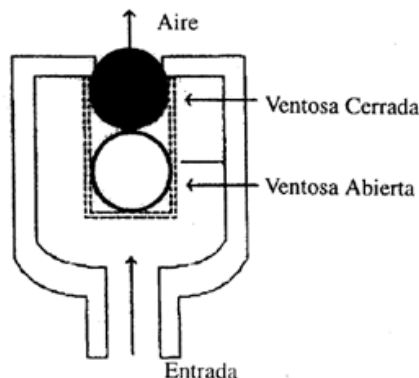


Figura 16. Funcionamiento de una ventosa de bola. Fuente: Redhip, 2013



Figura 17. Seccionamiento ventosa de triple efecto. **Fuente:** elaboración propia, 2015

No debemos olvidar la importancia que tienen los depósitos desde la captación hasta la distribución. Además de servir como almacenamiento del agua, también tienen otras funciones tales como reguladores de presión, evitar golpes de ariete, evacuadores del aire de las conducciones, chimeneas de equilibrio, etc. Tendremos que tener en cuenta que el agua en los depósitos creará un circuito de entrada hacia la salida, el motivo es la renovación del agua del depósito cada determinado periodo de tiempo. En caso de entrada y salida por el mismo tubo, lo que se hace es que la altura de la lámina de agua del depósito varíe en un ciclo de tiempo estipulado, es decir el nivel de agua del depósito sea variable, par de esta manera se producía la renovación del agua.

De forma genérica podemos clasificar los depósitos según su cota sobre el terreno como depósitos de superficie y depósitos elevados. Los materiales de construcción son de forma predominante el hormigón armado en sus versiones de ejecutado in-situ y prefabricados.

Los depósitos elevados son de menor capacidad (m³) que los de superficie por razones obvias, la estructura y el coste de un depósito elevado son infinitamente superior que la de uno de superficie para grandes volúmenes de agua. Los elevados se están olvidando porque la principal misión que cumplían, que era subir la cota de nivel para de esta manera asegurarse una presión estable en la red de distribución y suficiente para el suministro a los usuarios. El motivo es la utilización de válvulas reguladoras automáticas que regulan la presión abajo de la válvula y el uso de variadores de velocidad que elevan la presión de aguas abajo del motor.



Figura 18. Depósito elevado. **Fuente:** elaboración propia, 2015



Figura 19. Depósito de superficie. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Capítulo IV: La distribución

El Concepto

El concepto de distribución de agua en una ciudad lo podemos entender como el reparto de agua a todos y cada uno de los barrios, edificios y viviendas. Nosotros utilizamos el concepto de caudal, volumen que pasa por la conducción en la unidad de tiempo, para la distribución del agua. Los romanos utilizaban la sección de la tubería para determinar su unidad de medida que era la quinaria, era aquella que tenía 5/4 de dedo, 2'31 cm, de diámetro y 4'19 cm² de sección.(De la Peña, 2005)

Trataban de que el agua no estuviera en contacto con el exterior, que no estuviera estancada y que las velocidades no fuesen altas para que no arrastrasen material en suspensión.

El agua podía entrar en la ciudad de tres formas si atendemos a la cota de recepción; a nivel, es lo más común, directamente entra al depósito principal desde el canal. Forzada, el agua entra a menor cota, por lo que se debe elevar hasta el depósito. En sifón, aprovechamos un punto elevado del acueducto para desde allí introducirla en una conducción cerrada para aprovechando la presión elevar el agua hasta el depósito, donde saldrá libre a presión atmosférica.

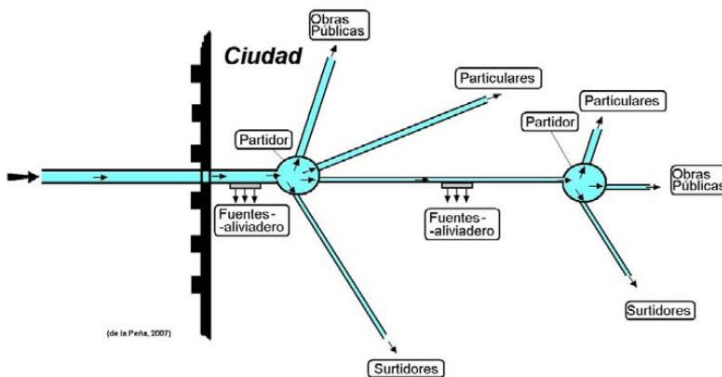


Figura 20. Esquema de abastecimiento de agua en su etapa inicial. **Fuente:** De la Peña, 2010

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

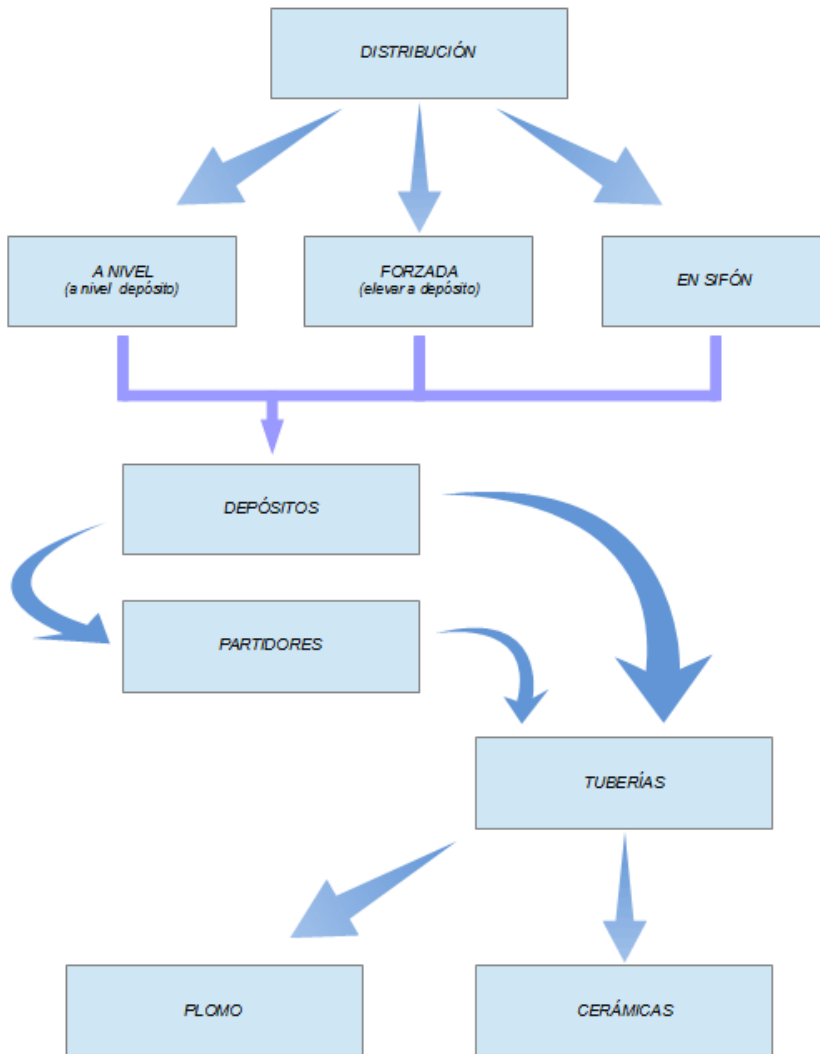


Figura 21. Esquema distribución época de los romanos. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Los depósitos

Los depósitos como hoy en día sabemos son básicamente un “recipiente” que acumula un determinado volumen de agua para consumos varios, principalmente son para agua potable, por lo que el consumo puede ser humano. En tiempos de los romanos el uso era similar, aunque hay que añadir que en ocasiones juntaban en un mismo edificio depósito principal, aireador y partididor, elementos que luego definiremos.

De los depósitos salían conducciones de gran sección que conectaban los distintos depósitos entre sí. En caso de ser grandes depósitos podrían estar decorados, en cuyo caso se llamarían ninfeas.

Su clasificación la podemos realizar según se encuentren respecto a la cota del terreno; enterrados, semienterrados, a nivel o por último elevados. Si atendemos a su estructura interior podemos clasificarlos según el número de cámaras.

Los partidores

También denominados depósitos repartidores, era desde donde se hacían las desviaciones para consumo.



Figura 22. Funcionamiento de un partididor. **Fuente:** Feijoo, 2006



Figura 23. Cámara de distribución del castellum aquae, con orificios calibrados para distribuir el agua a los barrios. **Fuente:** Moreno, 2007

Las tuberías

Las tuberías que se usaban eran de materiales tales como el plomo, cerámica, piedra y bronce. Las secciones eran muy variadas y el uso de cada una de ellas dependía sobre todo de la presión y el diámetro necesario. Las de piedra se usaban para comunicar los distintos depósitos y siempre funcionaban a presión. Las de cerámica no soportaban grandes presiones, pero eran relativamente económicas. Las de plomo eran las más utilizadas porque aguantaban la presión, aunque según Vitruvio (VIII, 7, 9) ya sabían que el plomo con el agua produce albayalde, un compuesto blanquecino poco saludable. Por último tenemos las tuberías de bronce, las cuales se usaban para pequeños tramos junto a los grifos, contadores, etc.



Figura 24. Tuberías de plomo. **Fuente:** Acero & Cano, 2007



Figura 25. Tuberías de barro para presión. **Fuente:** De la Peña, 2010

Los elementos de regulación

Dentro de la red, y en las conducciones principales, y en los depósitos principales y secundarios, se situaban lo que llamaban “fuentes aliviadero” que tenían dos finalidades, como su palabra indica: servir de fuente pública, y a su vez funcionaba como un aliviadero lateral que regulaba la lámina de agua que iba a distribuirse.

Otros tipos de reguladores se encargaban de controlar el caudal de salida, desvíos y cortes de suministro, regulación de presión en las tuberías (mas bien limitación de presión) y eliminación de aire de las tuberías a presión. Par ello usaban grifos, extractores de aire, válvulas de presión y caños.

Al final de cada rama de la conducción existía un vertedero en el último depósito de distribución, para eliminar el agua sobrante o excedente, “caducae” en la conducción que en ocasiones muy excepcionales el Emperador podía dar en concesión, aunque lo habitual es que se usara para limpieza de calles y alcantarillas (De la Peña, 2005)



Figura 26. Fuente aliviadero típica romana. **Fuente:** De la Peña, 2010

La Calidad del agua

El agua la cuidaban desde la captación hasta su vertido al alcantarillado. La calidad del manantial o fuente de captación debía ser muy buena, luego antes de canalizarla le daban un tratamiento de decantación de las partículas en suspensión, el transporte también lo cuidaban para que no se contaminase por el camino, de forma que antes de meterla en la distribución se daba el último tratamiento de aireación y decantación.

No tenían posibilidades de depurar el agua desde el punto de vista bacteriológico o químico, por lo que la calidad del agua era excelente desde la captación.

La comparativa

Las redes de distribución serán de diseño mallado, eliminando puntos que faciliten la contaminación o el deterioro del agua distribuida.

Dispondrán de mecanismos adecuados que permitan su cierre por sectores, con objeto de poder aislar áreas ante situaciones anómalas, y de sistemas que permitan las purgas por sectores para proteger a la población de posibles riesgos para la salud. (BOE, 2003)

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

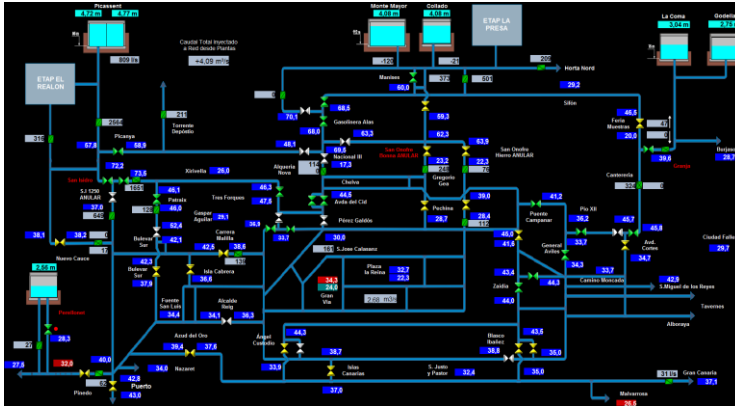


Figura 27. Pantalla mural esquematizando la red de distribución de Valencia. **Fuente:** elaboración propia, 2015

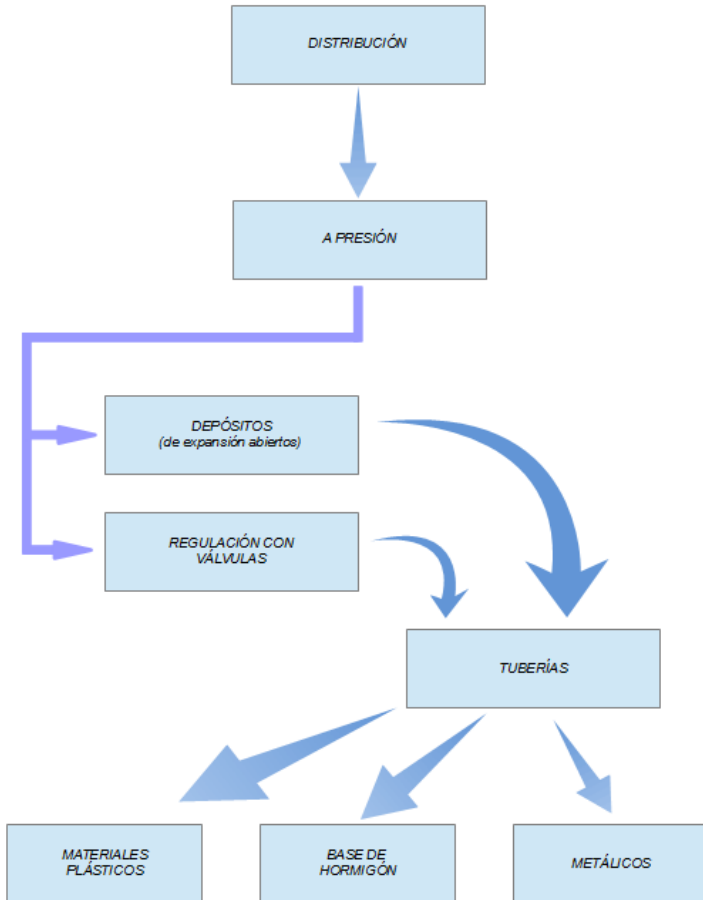


Figura 28. Esquema distribución siglo XXI. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Como elementos de maniobra y control nombraremos los más importantes y que se encuentran en todas las redes de distribución:

- Válvulas de seccionamiento, se ponen cada determinada longitud según las derivaciones a las que pueda afectar y las utilizaremos para poder aislar los sectores y de esta manera, ante una avería no sería necesario cortar el suministro de agua a toda la red. Los tipos de válvulas que se emplean son de mariposa y de compuerta.
- Válvulas de regulación, sirven para ajustar el caudal y/o la presión a los requerimientos de la red. Su accionamiento puede ser manual o motorizado. Estas válvulas suelen estar alojadas en arquetas accesibles y ventiladas. Estas válvulas se pueden hacer automáticas para de esta manera regular la presión (reductora o sostenedora) limitar el caudal, etc...
- Válvulas de retención, sirven para que el agua circule en un solo sentido, impidiendo el retorno a la red.
- Ventosas, se instalan en los puntos altos o cambios de rasante para sacar el posible aire de las conducciones, también pueden meter aire en caso de que queramos vaciar la tubería.
- Otras, de protección, alivio, antiinundaciones, etc...



Figura 29. *Válvula de retención de cámara partida. Fuente: elaboración propia, 2015*

Otro apartado son los elementos de medida, que en ocasiones son imprescindibles para el buen funcionamiento de la red. Nos aportan datos que nos sirven para el control de red. Comentaremos los más usuales atendiendo a la medida de magnitud que miden:

- Medición de presión, denominados comúnmente como manómetros de presión, pueden ser de distintas escalas dependiendo de la presión a medir.
- Medición de caudal, aquí diferenciaremos lo que son caudalímetros; miden el caudal instantáneo (notar que también miden el caudal acumulado tanto en sentido directo como inverso) basándose en la velocidad del agua, los más comunes los electromagnéticos y los ultrasonidos. Y contadores; que miden el caudal acumulado y si queremos saber el instantáneo debemos hacer una simple operación matemática que nos divida el caudal que ha pasado entre el tiempo que ha tardado en pasar. Estos últimos son de tipo mecánico, de turbina o hélice

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

según diámetros, aunque últimamente se ven muchos electrónicos de menor peso y coste.



Figura 30. Manómetros depresión. Fuente: elaboración propia, 2015



Figura 31. Contador mecánico. Fuente: elaboración propia, 2015



Figura 32. Electrónica de caudalímetro electromagnético. Fuente: elaboración propia, 2015



Figura 33. Caudalímetro electromagnético. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Las válvulas son esenciales en cualquier tipo de conducción desde las que podemos usar en las captaciones hasta las que usamos en casa para lavarnos las manos, por ello merece la pena hacer un recorrido por las más utilizadas y comentarlas someramente. Todas las que nombremos son válvulas cerradas que trabajan con agua a presión:

- De compuerta, apertura y cierre por el desplazamiento vertical de una “compuerta” que asienta sobre un elastómero, el movimiento se lleva a cabo por el giro de un eje acoplado a la compuerta.



Figura 34. Válvula de compuerta. **Fuente:** elaboración propia, 2015

- De mariposa, por su bajo coste son muy utilizadas, sobre todo para diámetros grandes, a partir de 300mm. Constan de un disco que gira 90° sobre un eje acoplado en la diagonal, para tuberías de secciones grandes y si la presión diferencial es considerable, se suelen poner unos desmultiplicadores que hacen que girando un eje se transmita el movimiento a la válvula con menor fuerza.

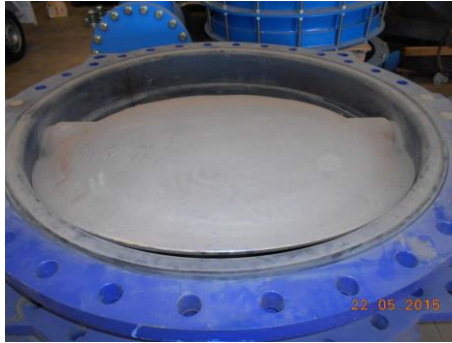


Figura 35. Válvula de mariposa. **Fuente:** elaboración propia, 2015

- De bola, es como una bola perforada con el diámetro de la tubería, por lo que la pérdida de carga a su paso es nula, se utiliza en pequeñas secciones de tubería y tiene una excelente estanqueidad.

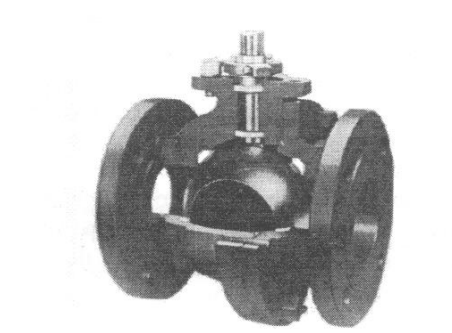


Figura 36. Válvula de bola seccionada. **Fuente:** Redhip, 2013

- De asiento plano, consiste en un eje que se desplaza verticalmente y empuja una corona que se asienta sobre la superficie plana del interior de la cámara. Tiene elevadas pérdidas de carga si la comparamos con las anteriores. En ella se basan las actuales válvulas hidráulicas de control automático, eso sí con una gran variedad de formas constructivas y tipos de funcionamiento.



Figura 37. Válvula de asiento plano. **Fuente:** elaboración propia, 2015

- Otros tipos, solo decir que existen otros tipos pero que para el tema que nos abarca no es meritorio que las describamos.



Figura 38. Partes de una válvula de regulación anular automatizada. **Fuente:** elaboración propia, 2015



Figura 39. Partes de una válvula de mariposa automatizada. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Cuando se dispone de elementos de regulación y control de la red, se suelen ubicar en arquetas bajo tierra donde se construye un recinto transitable y acondicionado para que los equipos estén en condiciones ambientales aceptables y que para el personal de mantenimiento no suponga riesgos. Los elementos de control de la red los hay que nos dan información (presión, caudal), que pueden variar las condiciones de la red (actuadores), de seguridad (ventosas, limitadoras de presión), de análisis (clorímetros), que mantienen las condiciones de los locales (extractores, bombas de achique), iluminación, aviso de movimientos, etc... Todos se controlan desde un cuadro de “control” eléctrico, que se instala en la propia estación y que a través de las comunicaciones vía radio, cable o redundantes (doble sistema de comunicación) se transmiten los datos y se mandan a una sala de control donde los operadores de sala controlan toda la red.



Figura 40. Vista de estación automatizada en by-pass. **Fuente:** elaboración propia, 2015



Figura 41. Cuadro eléctrico de control de una estación remota. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Capítulo V: Caso particular

El acueducto de Peña Cortada:

Este capítulo lo voy a dedicar a un acueducto que es el más significativo de la Comunidad Valenciana; es el acueducto de Peña Cortada. La información gráfica aquí expuesta procede de fuentes propias, son fotografías tomadas el día 10 de Mayo de 2015.

La captación del acueducto tiene su origen en un lugar conocido como “El Nacimiento”, en el término municipal de Tuéjar, a una altitud de 580 metros sobre el nivel del mar. (Canto & Curiel, 1998)

El resto mejor conservado corresponde al puente acueducto del barranco llamado de la Cueva del Gato.



Figura 42. Vista del puente acueducto en la Cueva del Gato.

Se conservan aquí dos pilares que conforman tres arcos, junto con los apoyos en las paredes del barranco.



Figura 43. Vista de los dos pilares del puente acueducto.

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Los pilares son de opus quadratum y llegan a tener en la parte más elevada una altura de 33 m sobre el fondo.



Figura 44. Vista de la cimentación de los pilares sobre roca. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Como se puede ver en las fotos los apoyos de los pilares son directamente sobre la roca del lecho del río, los dos apoyos extremos de los arcos también son sobre las rocas laterales.



Figura 45. Vista del apoyo del arco sobre roca.

Una vez rebasado este puente el specus (la canal) gira bruscamente en dirección este para seguir a través de un impresionante cortado denominado Peña Cortada (nombre que le da al acueducto), un tajo vertical de 25 m de altura, 90 cm de anchura y 50 m de longitud, (Fernández, 1983) con un estribo central, a manera de apoyo.

La roca extraída debió aprovecharse en la construcción del puente acueducto.



Figura 46. Vista de la brecha en la roca. **Fuente:** elaboración propia, 2015



Figura 47. Vista del canal en la roca. **Fuente:** elaboración propia, 2015

A continuación, el acueducto presenta un total de 11 túneles en roca compacta, con ventanas de aireación para permitir la extracción del material.



Figura 48. Ventana de aireación de un túnel. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Las dimensiones de los túneles son similares: 1,80 m de altura aproximadamente y 80 cm de anchura. (Canto & Curiel, 1998).

Se aprecia claramente el trazado serpenteante del canal a lo largo de los túneles para mantener el nivel y adaptarse a la ladera de la montaña.



Figura 49. Boca de un túnel. **Fuente:** elaboración propia, 2015

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Son muy apreciables en muchos tramos las diaclasas, grietas en las rocas sin desplazamiento, se distinguen de las fallas por que en estas últimas sí que hay desplazamiento de las rocas.



Figura 50. Diaclasa en la roca. **Fuente:** elaboración propia, 2015

El acueducto tiene en total una longitud aproximadamente de 11 Km pero al final desaparecen sus rastros por completo.

No sabemos exactamente adonde llevaba el agua, aunque por sus características, de tipo “industrial”, lo más probable es que llevase agua para el riego de los campos de Villar, Casinos y Liria.

Se ha especulado también con la posibilidad de que llevase agua a Sagunto, o la localidad de Chelva, pero ello no es probable. Para abastecer Chelva, no era necesaria una obra de esta envergadura, y los romanos siempre tendieron a evitar las obras innecesarias en la medida de lo posible. Por otra parte, Sagunto queda demasiado lejos, teniendo además la posibilidad de tomar agua de puntos más cercanos. (Canto & Curiel, 1998)

Existen rutas desde las localidades de Chelva y Calles desde las que a pie se puede visitar las ruinas del acueducto, el recorrido se puede ver en 2 horas y la dificultad es baja, lo más peligroso es el cruce del puente acueducto, donde en Julio del 2014 hubo un desgraciado accidente que le costó la vida a una excursionista.

Capítulo VI: Conclusiones

Conclusión:

Un concepto a tener en cuenta respecto a la comparativa realizada en éste trabajo es que en época de los romanos el abastecimiento de agua potable a una población se realizaba sin ningún tratamiento bacteriológico, o tratamiento análogo a los que se hacen hoy en día, antes el agua tal cual se tomaba, así llegaba a las poblaciones. Por ese motivo se tomaba el agua de manantiales para asegurarse de que no estaba contaminada, razón por la cual el agua provenía de distancias kilométricas, pudiendo llegar a más de cien kilómetros en algunos casos.

También nos encontramos con la dificultad de que aun conociendo el procedimiento mecánico para ejecutar éstas construcciones, lo que no se sabe claro es de qué manera plantearon y diseñaron las obras.

Los romanos han dejado patente que han sabido aprovechar los medios que tenían a su alcance para realizar las obras de ingeniería hidráulica que en sus tiempos hicieron. Supieron crear asentamientos, industria y agricultura a kilómetros de donde se encontraban de forma natural los recursos hidráulicos.

Lo que se plantea es; ¿qué ha cambiado respecto a la captación, transporte y distribución del agua potable para el consumo humano desde tiempos de los romanos?. Realmente se siguen haciendo los mismos pasos:

- Captación, lo que varía es el lugar, de modo que antes se tenía que captar agua que no fuera necesario su posterior tratamiento bacteriológico, y ahora no es problema porque el tratamiento sabemos hacerlo. Qué duda cabe que si el agua es más pura mejor para nuestro gusto y olor. También precisar que la construcción hoy día de grandes presas nos ayuda a tener reservas con las que paliar los periodos de sequía.
- Transporte, hoy día es más flexible el trazado por donde queramos llevar el agua. Hemos solucionado el problema que conlleva el transporte de agua en conducciones cerradas, a presión y salvando obstáculos de diferencias de cota tanto positivas como negativas. Tenemos los elementos necesarios para transportar el agua desde la captación hasta el lugar de distribución de forma fiable y controlada.
- Distribución, la distribución es lo que más ha cambiado, hoy en día tenemos elementos que nos permiten controlar la red aunque el caudal sea reducido, controlamos las fugas, los consumos de todos los sectores de la red, su calidad y algo que ellos no hicieron, que es reciclar el agua que después de usarla la desechamos.

Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas:

- Abad Balboa, T. Historia de las técnicas constructivas en España. Madrid: FCC. 2000
- Abadía Doñaque, J.C. Algunos comentarios sobre el abastecimiento de agua a Caesar Augusta <http://traianus.redis.es>. *Traianvus 2001*
- Acero Pérez, J. & Cano Ortíz, A.I. *El plomo y sus aplicaciones en una ciudad romana: Augusta Emerita. Instituto de Prehistoria y Arqueología Sautuola. Santander. 2007.*
- Adam, J.P. La construcción romana. Materiales y técnicas. León: Editorial de los Oficios.1996.
- Almagro Basch, M. El acueducto romano de Segóbriga. Revista de Archivos, Bibliotecas y Museos, Nº 81, 1976 (pags. 875-902)
- Almagro Gorbea. A. El canal de Albarracín a Cella (Teruel). Artífex: Ingeniería romana en España: Museo Arqueológico Nacional, Madrid, Marzo-Julio de 2002 (pags. 213-240). Madrid: Secretaría de Estado de Cultura, Subdirección General de Información y Publicaciones. 2002.
- Almagro-Gorbea M. Segóbriga. Cuenca: Diputación Provincial. 1989.
- Arenillas Parra. M. La presa de Almonacid de la Cuba: del mundo romano a la ilustración en la cuenca del río Aguasvivas. Aranjuez: Doce Calles. 2001.
- Arredondo Y Verdú, F. Cales. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el cemento. 1976.
- Estudio de materiales. Madrid: Servicio de publicaciones de la ETS de Ingenieros de Caminos. 1983.
 - Hormigones. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el cemento, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Patronato de investigación científica y técnica "Juan de la Cierva". 1976.
 - Las rocas en la construcción. Madrid: Instituto técnico de la construcción y el cemento. 1961.
- Beltrán Lloris, M. *La presa romana de Almonacid de la Cuba*, Zaragoza. 2006.
- BOE nº 45, Ministerio de la Presidencia. RD 140/2003 de 7 de febrero.
- Canto Perelló J. y Curiel Esparza J. Infraestructura hidráulica de Peña Cortada. Actas del II Congreso Nacional de Historia de la Construcción (págs. 93-98). Madrid: Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 1998.
- Cazalla Vázquez, O. Morteros de cal: Aplicación al patrimonio histórico. Granada: Universidad de Granada. 2003.
- Cuellar Lázaro, J. España romana: Arquitectura romana en España. Madrid: Agualarga D.L. 1995.

- Peña Olivas, J.M. De la. *Sistemas Romanos de Abastecimiento de Agua*. 2004.
- Díez Cascón Sagrado, J. Y Bueno Hernández, F. *Ingeniería de presas: presas de fábrica*. Santander: Servicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria. 2001.
- Durán Fuentes, M. *Técnica y construcción de puentes romanos*. 2002.
- Fatás Cabeza, G. *Textos sobre la realza en Hatti*. Versión de G. Fatás sobre traducciones de G. Beckman. 2006.
- Feijoo Martínez, S. *Las presas y los acueductos de agua potable, una asociación incompatible en la antigüedad. El abastecimiento en Augusta Emerita. Augusta Emerita, territorios, Espacios, imágenes y gentes en la Lusitania Romana (págs. 399-412)*. Madrid: Ministerio de Cultura, Subdirección General de Publicaciones, Información y Documentación. 2005.
- Las presas y el agua potable en época romana: dudas y certezas* <http://traianus.redis.es> TRAIANVUS 2006.
- Fernández Casado C. *Ingeniería Hidráulica romana*. Madrid: Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Turner. 1983.
- Acueductos romanos en España*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja. 1972.
- García Bermejo, J., Pérez de la Cruz, F.J. *Abastecimiento de aguas*. UPC.2012. http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/10061/mod_resource/content/1/Tema%2015%20MATERIALES%20DE%20CONDUCCIONES.pdf
- García Merino, C. *Avance al estudio del acueducto de Uxama. Nuevos Elementos de Ingeniería Romana. III Congreso Europeo de Obras Públicas Romanas*. Astorga: octubre de 2006. Libro de Ponencias.
- González Tascón I. La ingeniería civil romana Artifex: Ingeniería romana en España: Museo Arqueológico Nacional, Madrid, Marzo-Julio de 2002 (págs. 33-198)*. Madrid: Secretaría de Estado de Cultura, Subdirección General de Información y Publicaciones. 2002.
- Hernández González F. *Actas del I Congreso Nacional de Historia de las Presas. Tomo I (pags. 227- 251)* Badajoz: Diputación de Badajoz, Servicio de publicaciones. 2002.
- Hodge, A. Trevor. *Roman aqueducts & water supply*. London: Duckworth. 2002.
- Sifones en los acueductos romanos. Investigación y Ciencia* Nº 107, Agosto 1985. (págs. 80-87).
- Una fábrica romana. Investigación y Ciencia* Nº 172, Enero 1991 (págs. 60-65).
- Iglesias Gil J.M. Actividad edilicia en Hispania en el Alto Imperio romano y el acueducto de Segovia*.
- Malisard, Alain. *Los romanos y el agua*. Barcelona: Herder. 2001.
- Moreno Gallo, I. *Análisis técnico y constructivo del acueducto romano de Albarracín a Cella*. 2004.

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

- Topografía romana. Elementos de ingeniería romana. (págs. 25-70). Madrid: Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas. 2004.

Libratio Aquorum. <http://traianus.redis.es> TRAIANVUS 2007.

Ramírez Gallardo A. Supervivencia de una obra idráulica. El acueducto de Segovia. Segovia s.n. 1995. Valencia Artes Gráficas Soler.

Redship. Curso de hidráulica básica para operadores. Redhisp-I.I.A.M.A. Cap. 1 y 2. 2013.

Rubio Bardón, C. T. Acueductos Romanos De Hispania. 2008.

Sánchez Almonacid M. El acueducto romano de Cabeza del Griego. Boletín de la Real Academia de Historia, Tomo 15, 1889.

Schram, Wilke D. Roman aqueducts;
www.cs.uu.nl/people/wilke/castellaeintro/castellae.htm . 2004.

Trevor Hodge A. Sifones en los acueductos romanos.

www.traianus.net

www.colegiomexicanodeingenierosciviles.com

www.islamyal-andalus.org

www.cps.unizar.es

www.unex.es

www.blc.jcyl.es

www.cechelva.org

www.romanaqueducts.info

www.es.wikipedia.org

Referencias de clásicos:

Dionisio De Halicarnaso. Historia Antigua de Roma; Editorial Gredos

- Roman Antiquities, Loeb Classical Library Edition

Frontino Sexto, J. De Aqueductu Urbis Romae. Madrid: Gráf. Condor. 1971.

Plinio El Viejo. Historia natural; Editorial Gredos. 2001.

- Historia natural; Ediciones Cátedra. 2002.

Vitruvio Polion, M. Los diez libros de arquitectura. Barcelona: Iberia, D.L. 1982.

Relación de figuras

Relación de figuras y de tablas:

Figura 1. Esquema captaciones época de los romanos. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 2. Representación de Opus Quadratum. Fuente: Rubio, 2008

Figura 3. Representación de Opus Incertum. Fuente: Rubio, 2008

Figura 4. Representación de Opus Caementicium. Fuente: Rubio, 2008

Figura 5. Esquema captaciones siglo XXI. Fuente: elaboración propia, 2015.

Figura 6. Grupo motor-bomba sumergido. Fuente: Redhip, 2013

Figura 7. Partes de una bomba de bancada. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 8. Esquema transporte época de los romanos. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 9. Diferentes secciones de canales según el tipo de cubierta. Fuente: De la Peña, 2010

Figura 10. Sección de una conducción tipo. Fuente: Feijoo, 2006

Figura 11. Excavación de túneles. Fuente: Rubio, 2008

Figura 12. Esquema de un sifón romano. Fuente: Rubio, 2008

Figura 13. Esquema de un decantador romano. Fuente: Rubio, 2008

Figura 14. Esquema decantador de arenas, junto a la toma de agua de la conducción. Fuente: De la Peña, 2010

Figura 15. Esquema transporte siglo XXI. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 16. Funcionamiento de una ventosa de bola. Fuente: Redhip, 2013

Figura 17. Seccionamiento ventosa de triple efecto. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 18. Depósito elevado. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 19. Depósito de superficie. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 20. Esquema de abastecimiento de agua en su etapa inicial. Fuente: De la Peña, 2010

Figura 21. Esquema distribución época de los romanos. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 22. Funcionamiento de un partidor. Fuente: Feijoo, 20063

Figura 23. .Cámara de distribución del castellum aquae, con orificios calibrados para distribuir el agua a los barrios. Fuente: Moreno, 2007

Figura 24. Tuberías de plomo. Fuente: Acero & Cano, 2007

Figura 25. Tuberías de barro para presión. Fuente: De la Peña, 2010

Figura 26. Fuente aliviadero típica romana. Fuente: De la Peña, 2010

Análisis de técnicas para abastecimiento de agua en la ingeniería hidráulica romana

Figura 27. Pantalla mural esquematizando la red de distribución de Valencia. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 28. Esquema distribución siglo XXI. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 29. Válvula de retención de cámara partida. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 30. Manómetros depresión. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 31. Contador mecánico. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 32. Electrónica de caudalímetro electromagnético. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 33. Caudalímetro electromagnético. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 34. Válvula de compuerta. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 35. Válvula de mariposa. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 36. Válvula de bola seccionada. Fuente: Redhip, 2013

Figura 37. Válvula de asiento plano. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 38. Partes de una válvula de regulación anular automatizada. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 39. Partes de una válvula de mariposa automatizada. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 40. Vista de estación automatizada en by-pass. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 41. Cuadro eléctrico de control de una estación remota. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 42. Vista del puente acueducto en la Cueva del Gato. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 43. Vista de los dos pilares del puente acueducto. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 44. Vista de la cimentación de los pilares sobre roca. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 45. Vista del apoyo del arco sobre roca. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 46. Vista de la brecha en la roca. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 47. Vista del canal en la roca. Fuente: elaboración propia, 2015.

Figura 48. Ventana de aireación de un túnel. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 49. Boca de un túnel. Fuente: elaboración propia, 2015

Figura 50. Diaclasa en la roca. Fuente: elaboración propia, 2015

Tabla 1. Principales presas de la época romana en España. Fuente: Arenillas, 2002

Tabla 2. Coste de los acueductos en la época romana. Fuente: De La Peña, 2010

Ingeniería y Tecnología

