

El Acueducto del Padre Tembleque Complejo Hidráulico del S. XVI -Técnicas Constructivas-



Arcos del acueducto del Padre Tembleque. Fotografía tomada por Dra. Graciela Mota Botello

El Acueducto del Padre Tembleque Técnicas Constructivas

Antonio Mateo Linaza Ayerbe

Mateo Linaza
Foto: Dra. Graciela Mota Botello



Edificación

Los indígenas tenían la cultura de recolectar el agua de las lluvias en jagüeyes y llevarla a sus hogares, pero con la llegada de los españoles se introdujeron también los acueductos, aljibes y presas.

A Otumba le llamaban la tierra maldita, porque sólo se abastecían de agua de lluvia, que acumulaban en oquedades naturales, en contraste con los aljibes que están hechos por el hombre de cal y canto. En ese entonces, no había ni vacas, ni caballos, solo aves.

Y cuando Fray Francisco se dio cuenta de que cuando los españoles llegaron y comenzaron a dar de beber a sus caballos en los jagüeyes donde los indígenas iban por agua para abastecerse, ahí revolvieron el agua de lluvia y era un lodazal.

El agua se contaminó, y esto dio origen a múltiples enfermedades, sobre todo gastrointestinales.

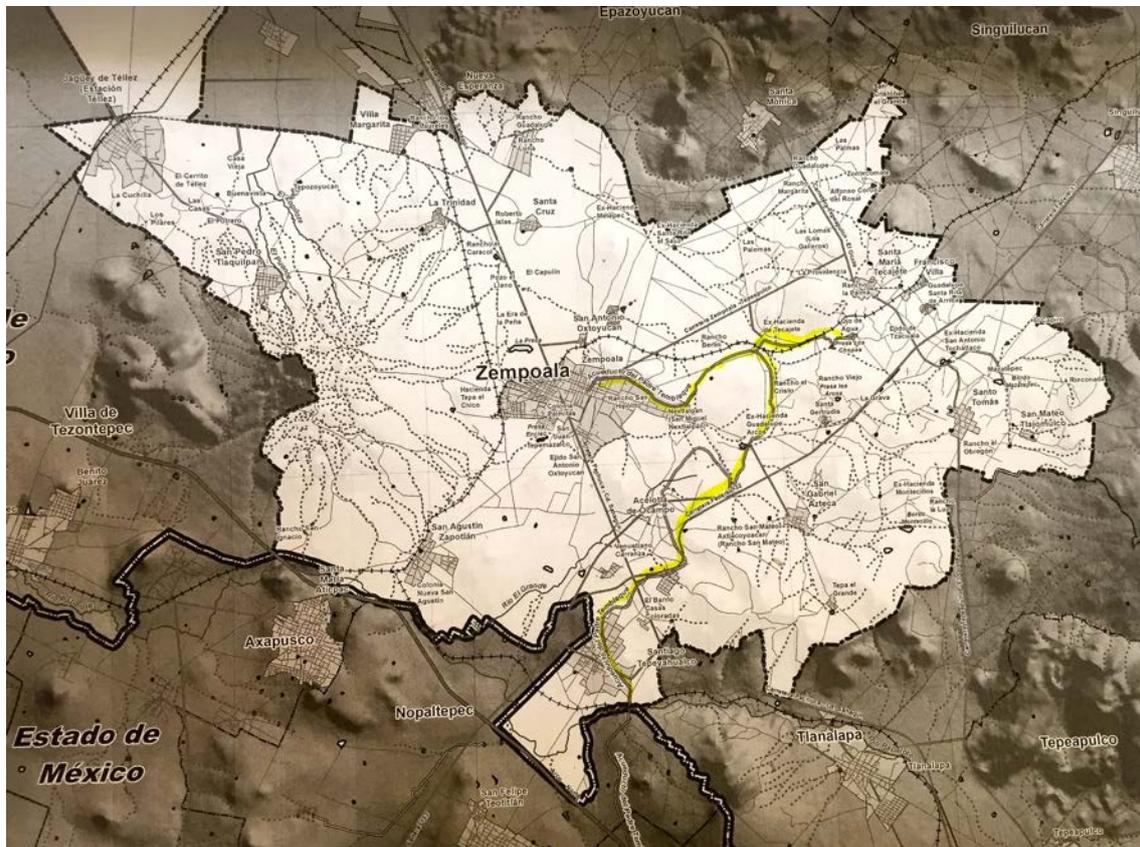


Maqueta de los arcos del acueducto del Padre Tembleque
Fotografía tomada por Dra. Graciela Mota Botello



Arcos del acueducto del Padre Tembleque. Acervo Dra. Graciela Mota Botello

SISTEMA HIDRAULICO PADRE TEMBLEQUE



Extensión del acueducto del Padre Tembleque dentro del municipio de Zempoala
Fuente: Acervo del Patronato Acueducto Tembleque, AC



Una vez que los señoríos de Texcoco y de Tepeapulco se negaron a venderles agua, el Padre Tembleque se dio cuenta de la necesidad de trasladar el agua de un lugar a otro, fue que convocó a la gente de Otumba para que buscaran agua. Zacuala, fue el lugar donde encontraron unos manantiales.

En 1553, se firmó el contrato entre los señoríos de Zempoala y Otumba, con los Frailes de la orden Franciscana que estaban en el convento de Otumba, y tiempo después, el virrey firmará la cédula de consentimiento para iniciar el acueducto como obra de infraestructura civil.



Fuente: Acervo del Patronato Acueducto Tembleque, AC

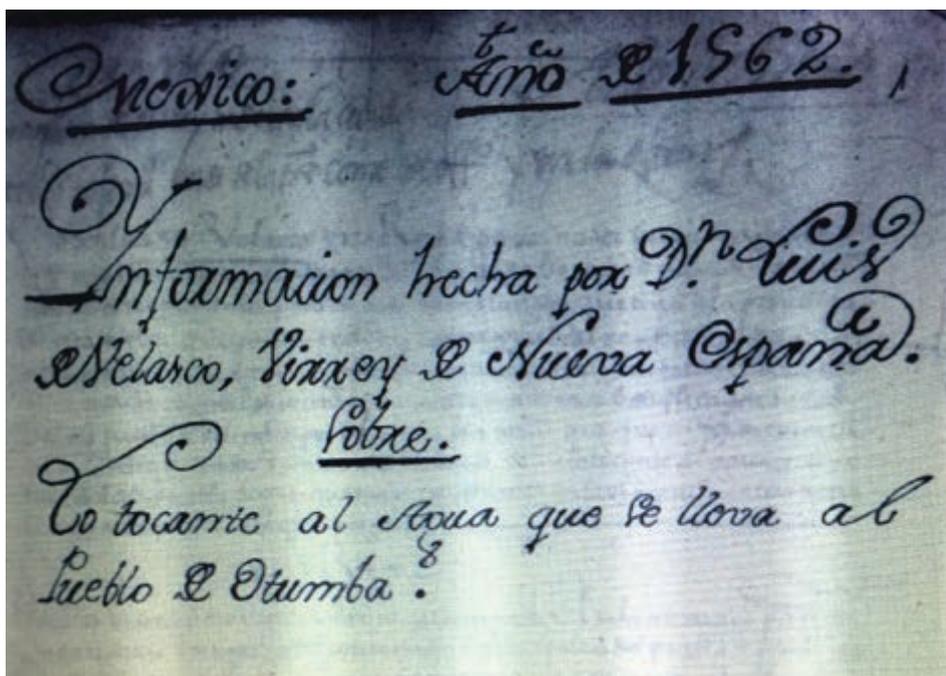


El tipo de técnica de construcción utilizada fue la clave, por la cual persiste hasta hoy en día el acueducto. Esta técnica de cal y canto es prehispánica.

Una vez que los señoríos de Texcoco y de Tepeapulco se negaron a venderles agua, el Padre Tembleque se dio cuenta de la necesidad de trasladar el agua de un lugar a otro, fue que convocó a la gente de Otumba para que buscaran agua. Zacuala, fue el lugar donde encontraron unos manantiales.

En 1553, se firmó el contrato entre los señoríos de Zempoala y Otumba, con los Frailes de la orden Franciscana que estaban en el convento de Otumba, y tiempo después, el virrey firmará la cédula de consentimiento para iniciar el acueducto como obra de infraestructura civil.

El tipo de técnica de construcción utilizada fue la clave, por la cual persiste hasta hoy en día el acueducto. Esta técnica de cal y canto es prehispánica. Y su debida mezcla, es la que permite que la humedad mantenga en pie al acueducto, e intactos los apantles. Si estos se secaran empezaría a desmoronarse. Además la argamasa que se usó, fue también lo que evitó que las plantas crecieran en los arcos.



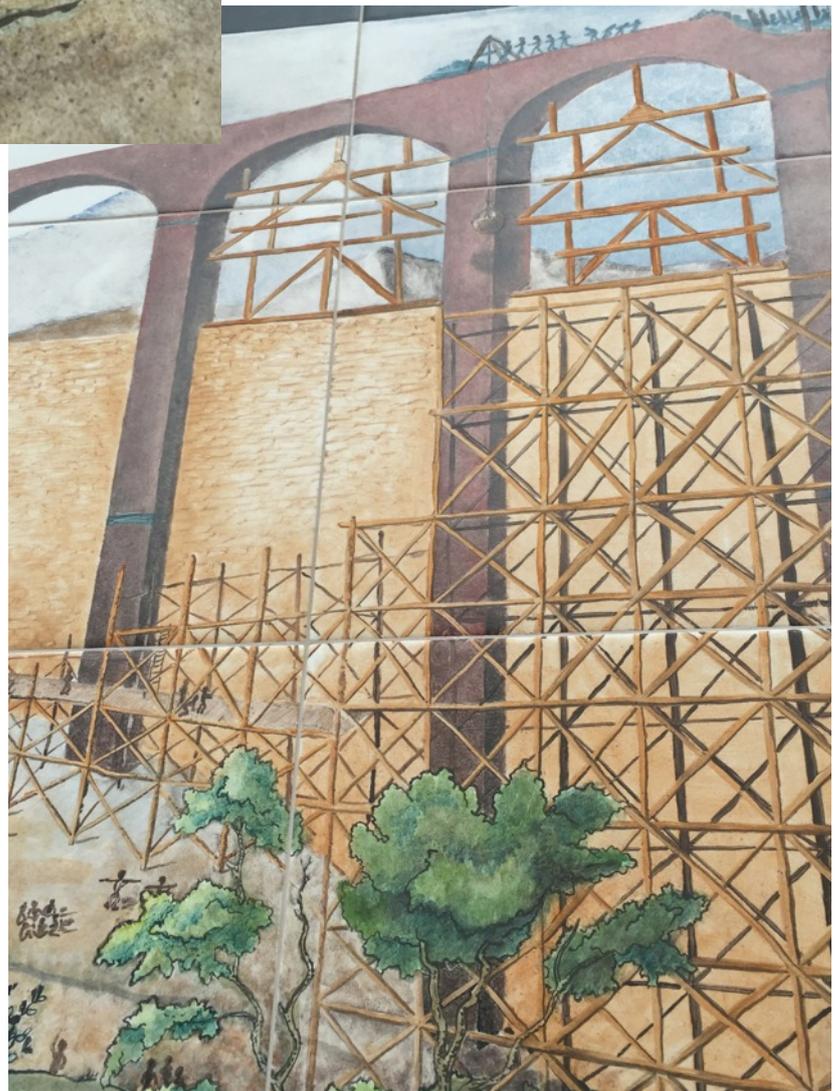
Documento facsimilar con la Firma de Don Luis de Velasco, Virrey siglo XVI: 1562
Acervo del Patronato Acueducto Tembleque, AC



Estatua del padre Tembleque, Zempoala, Hgo. Foto Tomada por la Dra. Graciela Mota



Restos de cimbra en arcos
Foto: Dra. Graciela Mota



Detalles del mural dedicado al Padre Tembleque.
Arriba: Tamizado de la cal
Abajo: construcción de andamije
Derecha: Cimbra.
Fuente: Acervo del Patronato Acueducto
Tembleque, AC
Foto: Dra. Graciela Mota



El padre Ángel y el padre Tembleque

El padre Ángel Cerda, originario de Michoacán, desde niño se enamoró de la historia del Padre Tembleque. Cuando era seminarista se ganó una beca para ir a un seminario en Santander, España.

Entre las clases tomó una que se llamaba *Restauración de Monumentos del siglo XVI de la América Independiente*. Así tuvo acceso al Archivo de Indias como estudiante.

De ahí, obtuvo información sobre el Convento de Todos los Santos

en Zempoala, Hidalgo; el Convento Franciscano de Zempoala y el Convento de la Purísima Concepción de Otumba. A lo largo de su investigación encontró cómo se trabajaba la cal y cómo se hacía el apagado de ésta, con el fin de aplicar estas técnicas en la restauración del acueducto del Padre Tembleque. Por su parte, él ya tenía experiencia en técnicas tanto prehispánicas como coloniales.

Cuando regresó a México, aplicó estos conocimientos en la restauración de los conventos y en el acueducto.

El INAH le dio los permisos, guía y asesoramiento; mientras que por su parte, el padre Cerda les enseñó a los habitantes de la región a hacer la técnica del bruñido, el proceso de la cal y de la argamasa –la cual aprendió en España– ya que estas tres, se habían perdido en



Retratos del padre Ángel Cerda. . Foto del Patronato, Tomada por la Dra. Graciela Mota



Reconocimiento al padre Ángel Cerda . Foto del Patronato, Tomada por la Dra. Graciela Mota

A la fecha, es vigente un decreto presidencial, que data de la época de Plutarco Elías Calles, del miércoles 15 de agosto 1928, donde indica que por las facultades que la constitución mexicana le otorga, nacionaliza los siete manantiales del padre Tembleque y les da a cada uno su nombre: San Francisco, San Antonio, San Bernardo, San Juan, Chaco Prieto, Santa Veracruz, El nuevo y El barrilito.

Y también expresa que son propiedad de la nación, tanto los manantiales, como las riveras de dichos apantles, los causes y las riveras con los metros que designe la ley.

El primer reto con el que se enfrentó fue traer nuevamente la cantera y la cal a la zona.

Se fue a varios lugares, utilizando la metodología de prueba y error, para saber cuál era la mejor y de dónde la sacaría. El mejor resultado fue una cantera de cal,

ubicada al Este del estado de Hidalgo, *i.e.* Tizayuca, de donde obtuvo la cal nixtamalizada.

Cuando llegó en los años setentas, fue cuando empezó a comprar materiales y capacitar a la gente para que lo apoyaran a restaurar el convento de Todos los Santos.

Ahí, fue cuando el padre logró afianzar el claustro de abajo, lo que arregló fueron los capitales, fustes y bases. Además hizo las vigas con el material que tenía.

Después, tapó el claustro bajo, para restaurar las vigas en el claustro alto. Intervino en todas las puertas, ventanas e imágenes de los santos. Desgraciadamente, la capilla abierta, sufrió un incendio a principios de los ochenta y se perdieron muchas cosas. De hecho, actualmente se está restaurando con un apoyo de la Cámara de Diputados.



Capilla abierta en el Convento de Todos los Santos. Fotografía por la Dra. Graciela Mota

Hay un decreto de Plutarco Elías Calles, del miércoles 15 de agosto 1928, donde indica que por las facultades que la constitución mexicana le otorga nacionaliza a los siete manantiales del padre Tembleque y les da a cada uno su nombre: San Francisco, San Antonio, San Bernardo, San Juan, Chaco Prieto, Santa Veracruz, El nuevo y El barrilito. Así están en el decreto presidencial, así como también expresa que son propiedad de la nación, tanto los manantiales, como las riveras de dichos apantles, los causes y las riveras con los metros que designe la ley.



Mateo Linaza Foto: Dra. Graciela Mota Botello

Hoy en día la ley ya designó y dice que son 7.5 m. de cada lado de los apantles, 20 mts. de las arquerías y 200 m. en arquería monumental.

Lo cual no se está respetando, queremos que se aplique la ley y el Lic. Saúl Uribe no quita el dedo del renglón en presidencias municipales con gobernadores, con cámara de diputados, con cámara de senadores, con el INAH y con CONACULTA; pero ahí seguimos. Lo único que queremos es que se aplique y que se respete la ley porque empiezan a surgir construcciones cercanas que no respetan esta medidas.

Los nombres de manantiales del acueducto son:

San Francisco, San Antonio, San Bernardo, San Juan, Chaco Prieto, Santa Veracruz, El Nuevo y El Barrilito



Vista de una sección del Acueducto.
Fotografía: Patronato Acueducto Tembleque



Vista aérea del acueducto del padre Tembleque. .
Fotografía: Patronato Acueducto Tembleque

De acuerdo a los vestigios orales, sabemos debido a las intervenciones del padre Cerda el acueducto todavía funcionaba hasta Zempoala, en los años ochenta.

Ya en el año de 1985, lo mandaron a la ciudad de México a realizar estudios en torno a la beatificación de Juan Diego.

En una iglesia que está muy cerca de la villa. A finales de la década de los ochenta, la presidencia municipal (en ausencia del padre) en vez de tomar agua de los manantiales empezó a hacer pozos por todos lados.

Cuando obtuvieron el agua directamente, fue entonces que se olvidaron del acueducto, de

tal forma que dejó de llegar el agua a Zempoala.

Pero como él no quitaba el dedo del renglón, en el año 1990, un día que el padre llegó de visita junto con otros padres, para mostrarles la construcción monumental.

Para su sorpresa, en los aljibes, se encontró con perros muertos que olían muy mal, con lo cual, no estaba de acuerdo.

A raíz de esto, fué organizó la organización civil, del Patronato Acueducto Tembleque, A.C., pues sabía que ante la ley, tiene mayor peso ésta que una sola persona.



Oficinas del Patronato. Fotografía Dra. Graciela Mota Botello

Los puentes fabricados por arcos de medio punto, son seis: el primero se encuentra al sur del cerro de Tecajete, el segundo puente en la hacienda de Guadalupe de los Arcos, que es parte del tramo de 530 metros que forma el sifón, la parte de ingeniería hidráulica más importante del sistema. Luego sigue el puente de Acelotla de un solo arco.

En los límites de los estados, está el puente monumental y al final se encuentran dos puentes más de un solo arco, ya restaurados.

Después de la fundación del patronato el padre Ángel va con el gobernador del estado de Hidalgo, Jesús Murillo Karam, a pedirle ayuda con el asunto del acueducto, él le responde: “la arquería monumental ahí está pero tú me hablas que va hasta Otumba y no sé si realmente existe ese monumento

del que hablas”. El padre responde: “sí, gobernador responde: “no te creo”.

El caso es que el secretario del gobernador Murillo era de desarrollo social en ese entonces, José Antonio Rojo García de Alba, hoy diputado. Finalmente, en 1997 le dan al padre \$300,000.00 y con eso se arreglan un poco los manantiales, también se empieza a buscar en otras áreas para demostrar que *sí* existía el acueducto del Padre Tembleque y fue entonces



Fotografía tomada por Dra. Graciela Mota Botello

El padre decía que las comunidades eran como una olla donde había agua; el pueblo, nuestros valores lo que somos; luego el aceitito, las autoridades distintas regiones del país.



El padre decía que las comunidades eran como una olla donde había agua; el pueblo, nuestros valores lo que somos; luego el aceite, las autoridades que son todos los demás que están en el pueblo pero que no son, entonces es un trabajo antropológico social introspectivo.

Toda la primera etapa de restauración, el padre la controló y dirigió desde Pradera, Una iglesia que está al oriente de la delegación Gustavo A. Madero, en la ciudad de México, Ahí estuvo el padre después de que se fue de Zempoala, pasó por muchos lugares entre ellos en la basílica de Guadalupe, en fin. Así empezó esta historia en los finales del S. XX.

Detalles del mural dedicado al Padre Tembleque.
 Fuente: Acervo del Patronato Acueducto Tembleque, AC
 Foto: Dra. Graciela Mota



Funcionamiento

El agua proviene de las filtraciones de la laguna de Tecocomulco, que se encuentra a 22 Km.

En línea recta, es una laguna muy grande que está al oriente del cerro del Xihuingo.

Los siete manantiales se interconectan por medio de apantles, confluyendo en un punto de intersección.

La caja distribuidora repartía el agua a los señoríos de Zacuala, Tlaquilpan, Zempoala y Otumba. Ahí encontramos una caja y arenero antes de llegar al municipio de Zempoala, donde está un sistema que distribuía a los tres señoríos.

La caja de agua tiene un metro de profundidad que funge como arenero.

Por eso, todas las arenas y piedritas caen, suben el nivel de agua y se va por estos distribuidores.

El chilacastle que tienen los aljibes, sirve para hacer una capa que protege al agua del polvo, además de oxigenarla, está en la parte de arriba flotando.

Éste es un sistema conformado por tres distribuidores, en donde: si se tapan dos, se va para Zempoala; si se cierra otro, se va para Tlalquilpan; y si se destapa el otro se va para la comunidad de Zacuala. Estos tapones se tapaban con pencas de maguey.

El chilacastle que tienen los aljibes, sirve para hacer una capa que protege al agua del polvo, además de oxigenarla, está en la parte de arriba flotando.

Hay tres aljibes terminales, los primeros corresponden a la comunidad; terminando en el convento de Todos los Santos, en Zempoala, y el de Otumba, en el convento de la Purísima Concepción.

Éstos riegan las huertas de los dos conventos.



Chilacastle en aljibe
Foto: Dra. Graciela Mota

Tembleque
acueducto

CAJA DISTRIBUIDORA DE AGUA Y ARENERO, REPARTÍA EL AGUA A LAS COMUNIDADES DE ZEMPOALA, ZACUALA Y SAN PEDRO TLAQUILPAN

La construcción del sistema hidráulico inició en el año 1555. Tardó en realizarse 17 años.

Es la obra de ingeniería hidráulica más importante durante los 300 años de la época virreinal en la Nueva España.

Obra mestiza, donde se amalgama la cultura indo europea de relevancia mundial.

Dirigida también por el Maestro de Castilla Juan Correa y Agüero.

PATRONATO
Acueducto Tembleque A.C.

EXII LEGISLATURA
CAMARA DE REPRESENTANTES



Mateo Linaza explicando el funcionamiento de la caja distribuidora de agua.

Fotos: Dra. Graciela Mota





Arquería del acueducto del Padre Tembleque. Foto: Dra. Graciela Mota





Detalle de arco
Foto: Dra. Graciela Mota



Caudal de aguas contaminada
Foto: Dra. Graciela Mota



Mateo y Amparo.
Acervo fotográfico: G. Mota

Restauraciones Actuales



En la actualidad, nos apegamos a la restauración más ortodoxa posible, empezando por la materia prima. Compramos la cal en piedra, por costales de 50 kilos, y nosotros la apagamos.

El proceso de apagado de la cal consiste en mezclar la cal viva (la de los costales) con agua y agitarla con una

pala. Esto es importante porque de esta forma se ayuda a romper los pequeños caliches que puedan dar problemas en el futuro, además de facilitar el posterior tamizado.

Cuando la cal está fría se tamiza. Tenemos artesas, cada una tiene tres secciones: grueso, mediano y fino; cambiamos la cal de una a la otra por unas mallas, y la tercera prácticamente es una malla de una mosquitera, queda como si fuera polvo. La cal se tiene que apagar durante seis meses por lo menos, es decir, tiene que estar hidratándose con agua dentro de una artesa, se tiene que mover y luego pasarla por varios filtros. De esas calderas tenemos 0% de desperdicio; mientras que en las calderas industriales obtienen un desperdicio de un 20% a 25%, por eso la descartamos.

El acueducto lleva en la parte de arriba una laja, que se obtiene de una cantera especial. Hoy en día, para hacer las reposiciones se adquieren las lajas por medio de un catálogo que las envía por piezas, o por metro cuadrado.

Éstas las hacemos con barrera y con cuña de madera -inflan la madera y la revienta- lo cual abarata costos, así podemos hacer más metros cuadrados de restauración, sin consumir nada de neumáticos.



Problemática Actual

Amenazas

Hoy en día la ley ya quedó designado que son 7.5 m. de cada lado de los apantles, 20 m. de las arquerías y 200 m. en arquería monumental. Lo cual no se está respetando, y quisieramos que se aplique la ley. De hecho, el Lic. Saúl Uribe no quita el dedo del renglón en presidencias municipales con gobernadores, con cámara de diputados, con cámara de senadores, con el INAH y con CONACULTA; pero ahí seguimos. Lo único que queremos es que se aplique y que se respete la ley porque empiezan a surgir construcciones cercanas que no respetan esta medidas.



Destrucción de apantles. Foto: Dra. Graciela Mota

Desde el domingo 5 de julio, fecha del nombramiento por la UNESCO, el siguiente sábado llegaron 2 autobuses de turistas de Japón. Obviamente, se dieron una vuelta, estuvieron 30 minutos y se fueron a comer a Huasca. El primer domingo llegaron 30, 40 carros, el siguiente llegaron 80, 90 carros y este último que acaba de pasar, ya rebasaron las 100 unidades Y COMO no tienen donde estacionarse, usan los arcos para que les den sombra a los coches.

Ahí es donde está la cimentación, pero también de los residuos que quedan de mampostería de doble, entonces con la fricción y el pasar de los coches se va desgastando y estamos perdiendo lo poco que queda de cómo nos imaginamos que fueron las etapas constructivas de la arquería monumental. Este próximo fin de semana nos vamos a encontrar donde no hay estacionamiento, no hay autoridad, baños



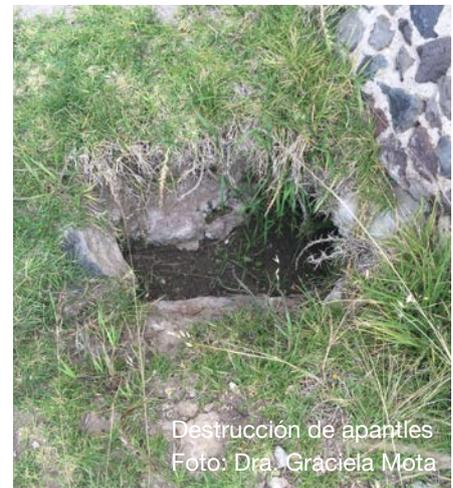
Invernaderos que roban agua del acueducto. Foto: Dra. Graciela Mota



Vandalismo. Foto: Dra. Graciela Mota

públicos, donde no hay caminos, donde la gente se brinca de un lado a otro en las puertas de los vecinos, y al final vamos a tener un problema social, porque los vecinos van a decir :

¿porqué me estas invadiendo y me estas dañando mi cosecha ?. ¿Quién me va a pagar mi cosecha ?



Destrucción de apántles
Foto: Dra. Graciela Mota

El turismo no respeta.

El turismo ve una puerta cerrada y la abre.

El turismo ve que no hay camino y se brinca al terreno del vecino, así sea propiedad, porque además es propiedad y el señor lo tiene plantado, sembrado de cebada en este caso.

Como no hay baños públicos, y hay huertas de nopales, entonces se van detrás de los nopales y

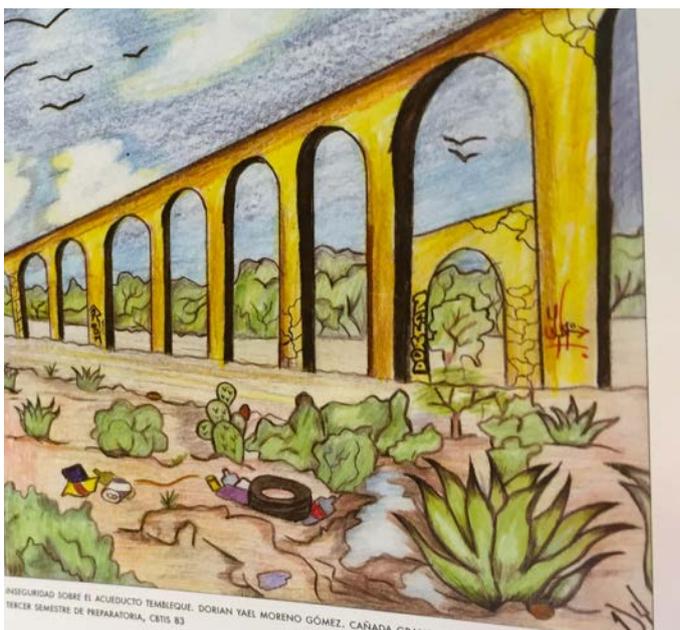
hacen sus necesidades sobre los nopales.

Entonces, cuando van a recoger las tunas y las ven todas contaminadas, a quien le reclaman.

Por tanto van a empezar a hacer muros para proteger su propiedad.

¿Qué dibujan los niños ?

Dibujan la llanta, los botes de frijoles, de atún y demás, porque ya se acostumbraron a que así es el paisaje.



INSEGURIDAD SOBRE EL ACUEDUCTO TEMBLEQUE. DORIAN Yael MORENO GÓMEZ, CAÑADA GRANDE
PRIMER SEMESTRE DE PREPARATORIA, CESTIS 83

Dibujos de niños, en el que se observa la basura alrededor del acueducto. Foto: Dra. Graciela Mota



Arriba: Durmientes rotos
 Arriba - Derecha: Puestos de comida
 Derecha: Mateo Linaza señalando
 diferencia entre restauraciones

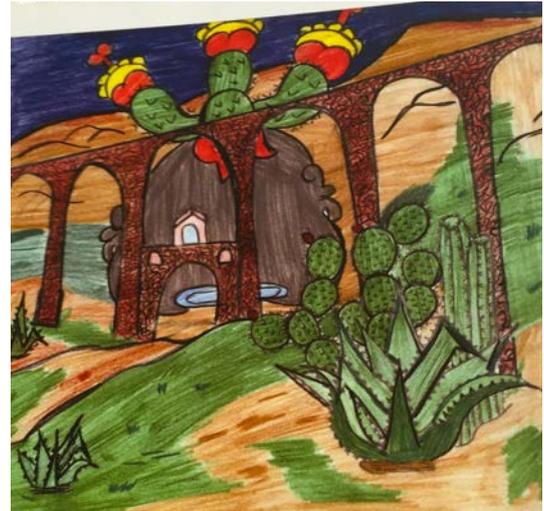
Fotos: Dra. Graciela Mota

Cuando fueron a custodiar al presidente municipal, un sábado había seis patrullas, baños. El domingo ya no había nadie solo una patrulla pero sin ninguna autoridad.

El sábado vimos a unos turistas extranjeros, que venían con basura, preguntando ¿donde esta la basura ?

No basta la buena fé. Es preciso hacer las cosas bien, pero también la genere debe darse cuenta de que puede hacer más.

Para profundizar debidamente en este tema, a continuación se presentan dos trabajos especializados que dan cuenta de una mayor información en el tratamiento técnico de dos informaciones sustantivas:



Dibujo del acueducto hecho por un niño
Foto: Dra. Graciela Mota



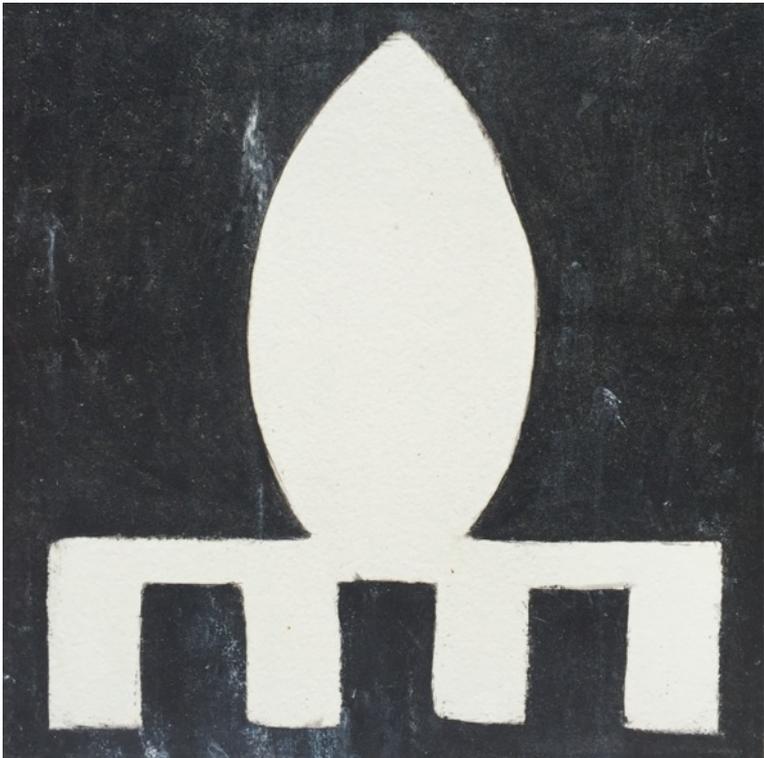
Mateo Linaza (izquierda), Graciela Mota (centro), Guillermina Acosta (derecha), amistades y miembros del Patronato





Glifos

Glifos del Mural del acueducto, Zempoala, Hgo.
Fotos Graciela Mota



LOS GLIFOS DEL ACUEDUCTO DE ZEMPOALA

Carmen Lorenzo Monterrubio

Instituto de Artes - UAEH

Introducción

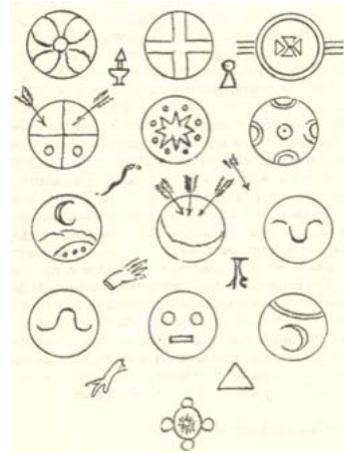
El Acueducto de Zempoala es una obra monumental iniciada en el año de 1555 y terminada 17 años después en 1572.¹

Su construcción se debe a los cientos de indígenas otomíes y nahuas que con su trabajo lograron levantar imponentes arquerías y a la organización del fraile franciscano Fray Francisco de Tembleque.

Los glifos del Acueducto de Zempoala, tanto los de la arquería de Tepeyahualco como los de las Haciendas de Tecajete y de Arcos han recibido, por desgracia, poca atención.

Existen algunas referencias a ellos, como la más temprana del capuchino Francisco de Ajofrín, de la Sagrada Congregación de Propaganda FIDE, quien visitó Zempoala en el siglo XVIII y dibujó algunos de los glifos de la arquería de Tepeyahualco, y la de Ángel Ma. Garibay, quien fue el primero en interpretarlos.

Después siguieron algunas descripciones someras, pero no encontramos un registro detallado o una interpretación con bases sólidas.²



Dibujos de Ajofrín, tomado de Musset. "El acueducto de Zempoala...".

Todos los glifos de la arquería de Tepeyahualco se ubican, sin excepción, en el lado oeste de la arquería, tanto en el intradós, en las caras externas de las dovelas y ocasionalmente en las paredes entre los arcos mayores.

Al parecer los glifos se distribuyen de manera aleatoria, es decir, no existe un patrón en su ubicación, lo mismo sucede en cuanto a su tamaño y disposición. Algunos motivos se repiten de manera constante, como círculos, caras, escudos, universos, y otros, pero a pesar de ser semejantes presentan leves diferencias, es decir, ningún glifo es exactamente igual a otro.

En este trabajo sólo presentamos algunos glifos representativos.

¹ Alain Musset. "El acueducto de Zempoala. Las respuestas de fray Francisco de Tembleque", en: Historias 19. Dirección de Estudios Históricos, INAH, México, 1988.

² Se tiene noticia que Joaquín Galarza realizó un estudio de los glifos pero, por desgracia, no lo publicó.

Los glifos de las arquerías de las Haciendas de Tecajete y de Arcos, a diferencia de los de Tepeyahualco, se encuentran grabados en las paredes de los arcos, las dovelas y en la piedra clave, ninguno se localiza en el intradós de los arcos.

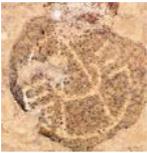
En la Hacienda de Tecajete los motivos se presentan en el lado este de la arquería, a excepción de solo dos motivos (un juego de pelota y un círculo con un elemento interior) que se localiza en la cara opuesta. Aquí encontramos nuevos motivos como casas (una de éstas con la inscripción

OTOSA CALI), juegos de pelota, una cara y un pez. En la Hacienda de Arcos son pocos los motivos, pero muy semejantes a los de Tepeyahualco y de Tecajete, aunque de menor calidad.

El registro de los glifos da una cifra de 607 dibujados con cal en los arcos de Tepeyahualco, 25 grabados en la arquería de la Hacienda de Tecajete y más o menos 20 grabados en la arquería de la Hacienda de Arcos,³ dando un total aproximado de 652 glifos dibujados y grabados en todo el Acueducto de Zempoala.

Los Glifos

TEPEYAHUALCO	HACIENDA DE TECAJETE	HACIENDA DE ARCOS	DESCRIPCIÓN
Círculos			
			<p>Los motivos circulares son los que más se dibujaron y grabaron. Van desde círculos simples a círculos con elementos al interior y al exterior. Pueden representar al sol, que en la cosmovisión prehispánica es el dios dador de vida y su culto se relacionaba a ciclos agrícolas. Entre los otomíes, el sol o Padre Viejo era además el dios del fuego.⁴</p> <p>Los círculos divididos en cuatro pueden significar el universo dividido en cuatro regiones o rumbos, simbolizando el signo <i>nahui ollín</i> (cuatro movimiento). También pudiera ser la rodela de <i>Quetzalcóatl</i></p>

<p>Círculos divididos en dos</p> 			<p>Estos motivos podrían suponer la representación de la luna en sus diferentes fases, aunque la luna se presenta también en forma de U.</p>
<p>Círculos llamados "universo"</p> 			<p>Ángel Ma. Garibay identificó estos glifos con la representación del universo, láctea por medio de franjas oblicuas y perpendiculares, y una estrella que pudiera ser Venus, dibujada como un círculo, aunque a veces se presenta una media luna.</p>
<p>Círculos con puntos y estrellas al interior</p> 			<p>Con seguridad estos motivos representan formas celestes, indicadas por puntos y estrellas.</p>
<p>Círculos con V invertida al interior</p> 			<p>Estos glifos, en forma de V invertida en su interior, con una especie de anillo que lo rodea y rayas o pequeños círculos a sus lados, representan a <i>Quetzalcóatl</i>, como dios del viento, y es uno de los atributos de esta deidad con su tocado cónico o</p>

³ No fue posible hacer un registro detallado en la Hacienda de Arcos, debido a la presencia de una pequeña laguna que atraviesa la arquería.

⁴ Ver, por ejemplo, las obras de Pedro Carrasco o Jacques Galinier.

⁵ Ángel Ma. Garibay K. "Glifos en los arcos de Otumba", en: Figuras y episodios de la Historia de México. El Padre Tembleque. Octaviano Valdés, Editorial Jus, no. 98, 2ª. edición. México, 1961, p. 180.

⁶ Ángel Ma. Garibay K. "Glifos en los arcos...", p. 182.

<p>Círculos con forma de “cara” al interior</p> 		<p>Estos motivos denominados “caras” parecen indicar los ojos y la boca de una persona. Se representan con algunas variaciones. Pueden indicar la representación del señor de la región de los muertos, <i>Mictlantecuhtli</i>, o bien, el signo <i>miquiztli</i>, la muerte, del <i>Tonalpohualli</i></p>
<p>Escudos</p>		
		<p>Los <i>chimallis</i> o escudos se dibujan como círculos con cruces al interior y un punto al centro, con extensiones a base de líneas, y en algunos casos con puntas indicando flechas. Este motivo representa la guerra, sobre todo si están indicadas las flechas atravesadas.</p>
<p>Volutas</p>		
		<p>Las volutas se presentan solas o al interior de círculos. Pueden indicar la luna, aunque Ángel Ma. Garibay señala que este signo se halla en la ropa de las diosas madres, quizá en asociación a la madre-luna.</p>
<p>Círculos y triángulos</p>		
		<p>Es otra representación del tocado o gorro cónico de <i>Quetzalcóatl</i>.</p>

Flechas			
			Quizá estos motivos, al igual que los escudos, estén relacionados con la guerra.
Juego de pelota			
			Es interesante la presencia de dos juegos de pelota en la arquería de la Hacienda de Tecajete. Es posible que los grupos indígenas del siglo XVI de esta región hayan dibujado estos motivos indicando que en tiempos pasados se realizaba esta práctica ritual.
Casa			
			Dos de estos motivos se localizan en la arquería de Tecajete, y es notable que uno muestre la leyenda OTOSA CALI en su parte superior, <i>calli</i> significa casa en náhuatl. Los dibujos parecen representar más bien templos, con una escalinata frontal y un techo sostenido por columnas, con claros rasgos indígenas.
Líneas y curvas			
			Son muchas las líneas y curvas, algunas formando figuras identificables, como brazos, manos y piernas. Joaquín Galarza supone que la mano (o mano de justicia) es símbolo de San Cristóbal. Quizá en algunos casos se indican letras.

⁹ Joaquín Galarza. Estudios de escritura indígena tradicional azteca-náhuatl. AGN; CEMCA. Col. Manuscritos Indígenas Tradicionales. México, 1979, p. 154-155.

Pez		
		<p>El pez es también un motivo único en la arquería de Tecajete. En la vecina Epazoyucan, la población tenía que tributar a los mexicas cuarenta peces y cuarenta ranas cada ochenta días, por lo que es posible que antiguamente en la región abundaran este tipo de animales acuáticos. Joaquín Galarza propone que el pez indica vigilia o ayuno.</p>
Bandera		
		<p>De nuevo otro motivo único en esta arquería, el <i>cenpantli</i> o bandera representa el número veinte, que era la base del sistema numeral entre los grupos de filiación nahua. Este elemento se encuentra representado, sobre todo, en los códices <i>La Matrícula de Tributos</i> y el <i>Códice Mendoza</i>, indicando las cantidades que los pueblos sojuzgados debían tributar a Tenochtitlan.</p> <p>Cempoala viene de la palabra náhuatl "<i>Cempoalli</i>", es decir, veinte o la cuenta completa de los dedos. Con el final <i>lan</i>, variante de <i>tlan</i>, significa "cerca de la cuenta o de los veintes", por lo que seguramente este glifo hace referencia al lugar.</p> <p>La <i>Relación de Cempoala</i> señala que los pobladores de la región adoraban a varios ídolos, entre ellos a Huitzilopochtli, Quetzalcóatl y Tezcatlipoca, y que hacían sus ceremonias cada veinte días.</p>

Su interpretación

Ángel Ma. Garibay identificó a los glifos como una forma de marca o sello del artesano: “los signos sobre los arcos de Otumba son marcas de los picapedreros, para distinguir su trabajo del de los demás artesanos.

La razón para hacerlo puede ser la necesidad de saber de qué región, o de qué persona proviene la realización del labrado”.¹⁴

Es así que según Garibay, los glifos representan los nombres de los artesanos o de los pueblos de los que procedían.

Él también deja ver que los glifos tienen un simbolismo puramente prehispánico, por lo que habría que explorar este aspecto para lograr una interpretación adecuada de los mismos.

Con esta idea, Víctor Ballesteros,¹⁵ repite lo dicho por Garibay, acerca de que los glifos pueden significar los nombres de las comunidades, las cuadrillas de los trabajadores o los nombres propios de cada uno de ellos.

Realmente no tenemos bases para afirmar que los glifos indiquen la firma o

los nombres de los trabajadores o las comunidades.

Con reservas podemos decir que quizá esta interpretación se aplique sólo a algunos de los glifos, por ejemplo, escudos que indican la idea de guerra, de aquí el apellido Guerra (suponiendo que realmente existiera tal apellido).

En este sentido, se ha propuesto también a manera de hipótesis que algunos glifos muestren la manera en que se comprobaba la cantidad de trabajo que cada persona o comunidad tenía que aportar para la construcción del acueducto.¹⁶

Es claro que algunos de los glifos representan signos astronómicos, como los identificados como universos, soles y lunas.

Muchos de ellos, como señalamos, muestran elementos prehispánicos como flechas, juegos de pelota, gorros cónicos, *chimallis* o escudos, casas y bandera, que indican que los trabajadores que construyeron el acueducto mantenían en aquellos tempranos momentos del Virreinato su propia ideología y cosmovisión indígena.

¹⁴ Ángel Ma. Garibay K. “Glifos en los arcos...”, p. 172.

¹⁵ Víctor M. Ballesteros G. “Síntesis Histórica” en Zempoala. Monografías del Estado de Hidalgo 1. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hiram Bravo Barrientos (coord.). Dirección de Investigación Científica y Tecnológica. Pachuca, Hgo., 1990, p. 30, y Víctor M. Ballesteros G. La pintura de la relación de Zempoala de 1580. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Patrimonio Cultural Hidalguense. Pachuca, Hgo., 2005, p.26..

¹⁶ Arturo Vergara Hernández, comunicación personal.

Es interesante anotar que no encontramos elementos cristianos, como cruces o iglesias,¹⁷ aunque Joaquín Galarza llega a identificar algunos dibujos con símbolos de esta religión

En efecto, el hecho de que se hayan dibujado y expresamente colocado estos elementos en la arquería nos habla de que sus autores tuvieron la intención de perpetuar su memoria, reforzar su identidad y su concepción ideológica y cosmológica, en un periodo en el que necesitaban hacerlo frente a la imposición de una nueva religión.

Debemos mencionar que los motivos grabados en la arquería de la Hacienda de Arcos presentan una hechura muy simple y poco trabajada en relación a los glifos de los Arcos de Tepeyahualco y de la Hacienda de Tecajete, que son más complejos y elaborados.

El único documento con el que contamos es el que presenta Alain Musset proveniente del Archivo General de Indias en Sevilla, España, titulado “Información hecha por

Don. Luis de Velasco Virrey de Nueva España, sobre lo tocante al agua que se lleva al pueblo de Otumba”, fechado en 1562, cuando todavía no concluían los trabajos de construcción del acueducto.

Este documento menciona que se emplearon entre 300 y 400 indios que aplicaron técnicas de construcción indígena y prehispánica,¹⁸ además, los problemas que tuvieron que pasar los pobladores de Otumba para llevar agua a su pueblo.

Al parecer, los indios que participaron en la construcción del acueducto pertenecían únicamente a la región de Otumba; “se puede pensar que la mayoría de los hombres sanos participaba en esta tarea”.¹⁹ Estos datos hablan de la importancia de la mano de obra indígena en la construcción de esta magna obra.

La *Relación de Cempoala*, escrita en el año de 1580, es una de las fuentes más tempranas que mencionan el acueducto.

*“Congregáronse, por estar juntos a la doctrina y por causa del agua, que antes no la tenían sino (en) jagüeyes. Trujeron esta dicha agua (de) una legua de donde están congregados, de pie de un cerro q(ue) llaman Tlecaxtitlan, que quiere decir “cerro hecho a manera de brasero” porque, en la cumbre del dicho cerro, está un llano hecho como brasero. Trujeron el agua por unos arcos de calicanto hasta un med(i)o de la congregación, en una fuente en m(edi)o de la plaza de los cuatro dichos pueblos, y corre por todas las calles”.*²⁰

¹⁷ Estos elementos cristianos están extensamente representados en pintura rupestre del estado de Hidalgo.

²⁰ “Relación de Cempoala...”, p. 74.

“Por desgracia, muchos de los glifos presentan un alto grado de deterioro, aunado a la presencia de grafitis, por lo que está en nuestras manos proteger y conservar estos símbolos del pasado y el monumento histórico que los resguarda.

BIBLIOGRAFÍA

Ballesteros G., Víctor M. “Síntesis Histórica”, en *Zempoala. Monografías del Estado de Hidalgo 1*. Universidad Autónoma de Hidalgo, Hiram Bravo Barrientos (coord.), Dirección de Investigación Científica y Tecnológica. Pachuca, Hgo., 1990.

Ballesteros García, Víctor Manuel. *La pintura de la relación de Zempoala de 1580*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Patrimonio Cultural Hidalguense. Pachuca, Hgo., 2005.

Galarza, Joaquín. *Estudios de escritura indígena tradicional azteca-náhuatl*. AGN; CEMCA. Col. Manuscritos Indígenas Tradicionales. México, 1979.

Garibay K., Ángel Ma. “Glifos en los arcos de Otumba”, en: *Figuras y episodios de la Historia de México*. El Padre Tembleque. Octaviano Valdés, Editorial Jus, No. 98, 2ª. edición, México, 1961.

González de Cossío, Francisco (prólogo). *El Libro de las Tasaciones de la Nueva España. Siglo XVI*. Archivo General de la Nación, México, 1952.

Lorenzo Monterrubio, Antonio, Carmen Lorenzo Monterrubio, Arturo Vergara Hernández. *Catálogo del Patrimonio Cultural del Estado de Hidalgo. Región 1. Tomo 2*. Consejo Estatal para la Cultura y las Artes de Hidalgo. México, 1998.

Macazaga Ordoño, César. *Nombres geográficos de México*. Editorial Innovación, S. A. México, 1979.

Musset, Alain. “El acueducto de Zempoala. Las respuestas de fray Francisco de Tembleque”, en: *Historias 19*. Dirección de Estudios Históricos, INAH, México, 1988.



²⁰ “Relación de Cempoala...”, p. 74.

La Hidráulica detrás del Padre Tembleque

Por José Antonio Bonilla Porras

La historia nos ha enseñado que el agua es parte esencial en el surgimiento y el desarrollo de una civilización.

Cada cultura, en cada rincón del mundo, ha visto su nacimiento cerca de ella, en cuanto que cada vez que falta, los asentamientos humanos atraviesan grandes dificultades hasta el punto de disolverse en algunos casos.

En la medida en que los pueblos crecen, la temática del agua adquiere un tono controversial, pues cada vez hay menos. ¿Hay menos agua? La pregunta puede resultar un poco capciosa.

Veámosla de la siguiente manera: ¿cómo escasea un recurso que, claramente, es renovable? Sin lugar a la menor duda, el agua participa en un ciclo natural interminable y es una certeza, casi axiomática, que no va a dejar de haber agua. Lo que sucede es que cada vez hay más consumidores para una misma cantidad de agua.

Recordemos que el paso de los siglos ha traído avances médicos, tecnologías innumerables e industrias masivas. Eso trae como consecuencia un incremento significativo en el consumo de agua que cada vez ha adquirido los más variados usos: desde el personal y sanitario, hasta el de medio para eliminar desechos

químicos. De esta manera, una localidad que crece se encuentra siempre ante el reto de encontrar más agua para satisfacer, sus también crecientes, necesidades. Sin embargo, puede ocurrir que la fuente más próxima no se encuentre en las cercanías del centro de consumo. Es más, esto es un problema muy común y, para nada, nuevo. Por ello, los ingenieros de todos los tiempos, han tenido que poner a prueba su creatividad ideando las maneras más convenientes para la conducción de dicho líquido. Así nacieron los acueductos, mismos que encontramos en un sinnúmero de lugares. Pero, ¿qué es un acueducto? Podemos definirlo como una estructura que tiene como finalidad la conducción del agua desde una fuente, previamente localizada, hasta el centro de consumo final.

En nuestros días, los acueductos se constituyen por conductos de sofisticados materiales, así como de poderosos sistemas de bombeo que en conjunto transportan caudales que nos resultaría casi imposible imaginar. Escuchamos también sobre la complejidad de las plantas de tratamiento que son necesarias para garantizar que al abrir la llave, el agua que consumimos sea potable. Pero está por demás, decir que

estos lujos son exclusivos de nuestros tiempos. Una travesía por la historia nos conduciría a una gran cantidad de acueductos que tan sólo contaban con la acción de una fuerza más antigua que la historia misma: la gravedad.

Podemos hallar, en diferentes latitudes, millares de ejemplos de soluciones de infinita creatividad en lo que se refiere a la conducción del agua, sin embargo, explorar cada una, nos llevaría casi tantos siglos como el tiempo que éstas han existido. Y es que nos encontraríamos ante un reto titánico al intentar entender la visión que cada pueblo ha tenido de una disciplina que hasta el momento no hemos mencionado: la Hidráulica. Es por ello, que creo pertinente explorar sólo aquélla que ha dado origen a este texto, ya que entender su funcionamiento ha resultado en, prácticamente, una aventura.

Entender el monumental Acueducto del Padre Tembleque ha sido una tarea de lo más apasionante. Quizás, por ser yo mismo aspirante a ingeniero hidráulico será que mi opinión es un tanto tendenciosa, pero recordemos que se trata de la primera obra hidráulica del tipo en este suelo: una propuesta fantástica al problema del abastecimiento de agua de la primera mitad del siglo XVI. Analizar el

flujo a lo largo de más de 40 kilómetros sería una locura. Hablar en un texto sobre ello, sería peor. Por esto mismo, quisiera compartir lo que he observado en una sección relativamente corta (350 metros, aproximadamente, que es muy poco si se compara con la longitud total del monumento) pero de gran significancia, por lo menos en el plano de la Hidráulica.

Fundamentos básicos de la Hidráulica

Para entender, de la forma más óptima, el funcionamiento de este acueducto, es preciso aclarar primero algunas nociones básicas sobre ingeniería hidráulica. Empecemos, pues, por definir a la misma. La ingeniería hidráulica es una rama de la ingeniería civil que estudia las propiedades mecánicas de los fluidos y resuelve los problemas relacionados con ellos. Se trata de una disciplina muy extensa y muy antigua que trata el diseño, construcción, operación, ampliación y mantenimiento de obras de abastecimiento de agua potable, alcantarillado y drenaje, almacenamiento, riego, control de inundaciones, generación de energía eléctrica (en conjunto con los conocimientos y técnicas de la ingeniería del mismo nombre), entre muchas otras.

Aclarado lo anterior, veamos de manera general los siguientes conceptos que

además, mencionaremos con mucha frecuencia más adelante.

Presión y carga de presión

La presión es una fuerza aplicada por unidad de área. La definición quizás suene pedante y, excesivamente, técnica, pero se puede explicar mediante un ejemplo muy sencillo.

Pensemos en el clásico lago cuya superficie se congela durante el invierno. Debe resultar evidente que caminar sobre la superficie congelada puede ser una tarea muy peligrosa, ya que corremos el riesgo de que se rompa y caer al agua helada. No obstante, ante una extrema necesidad de cruzar al otro lado, podemos optar por una opción interesante para reducir el riesgo: en vez de cruzar caminando, podemos echarnos pecho tierra y deslizarnos a través de la superficie. ¿Cómo puede eso resultar menos absurdo que cruzar caminando o corriendo? Sucede que al pasar caminando, todo nuestro peso estaría concentrado en un área muy pequeña, correspondiente a la de las suelas de las botas. De la segunda manera, nuestro peso se distribuye en un área mayor, que corresponde a la de nuestro cuerpo tendido. En el ejemplo, nuestro peso es la fuerza que se está aplicando sobre la superficie del lago, sin embargo, la

presión sobre ella es menor en el segundo caso ya que hay una distribución más uniforme de la fuerza, comparada con el primer caso donde prácticamente es puntual.

Así pues, cuando hablamos de la presión atmosférica, ésta se refiere al peso de la atmósfera dividido entre la superficie terrestre (o alguna porción de ella) que es el área sobre la cual está actuando. Dado que la presión atmosférica es variable de acuerdo con el sitio donde nos encontramos, suele considerarse como punto de referencia y medirse la presión a partir de ella. A esta presión se le conoce como relativa y más específicamente como manométrica si está por arriba de la atmosférica y vacuométrica si se encuentra por debajo. La suma de la presión atmosférica y la relativa se denomina presión absoluta.

La presión sanguínea es un ejemplo de presión manométrica, pues se trata una presión medida a partir de la atmosférica. Es común que los médicos fallen a la hora de explicarnos por qué la presión que ellos nos toman se encuentra en una unidad de longitud y no en una unidad de fuerza sobre una unidad de área. Lo que en realidad se registra en un hospital no es la presión como tal, sino lo que se conoce como carga de presión.

La carga de presión se puede entender como la altura de la columna de fluido en cuyo fondo se ejerce una presión en específico. Veámoslo de la siguiente manera: la presión en el interior de una alberca varía en función de la profundidad a la que se mida, es decir, que a mayor profundidad mayor presión. La carga de presión en el fondo de dicha alberca corresponde directamente a la profundidad de éste con respecto de la superficie libre del agua. Se trata de una medida que se registra en unidades de longitud, tal como es el caso de la presión sanguínea, que por lo regular, se mide en milímetros de mercurio (mmHg). Esto significa que dicha presión correspondería a la del fondo de una columna de mercurio (que es bastante más denso que el agua) de altura equivalente al valor registrado por un baumanómetro.

Lo anterior puede resultar confuso en cuanto que hablamos de una columna de líquido cuya sección transversal desconocemos. ¿Existe la misma presión en el fondo de una alberca de una profundidad definida que en el fondo de un tubo lleno de agua de la misma profundidad? El sentido común puede conducirnos a una respuesta un tanto obvia: la presión en el fondo de la alberca debe ser forzosamente mayor porque la

cantidad de agua también lo es. Esto es absolutamente incorrecto. La presión al fondo de ambos contenedores (alberca y tubo) será exactamente la misma. Esto se debe a que la presión en un fluido en reposo depende exclusivamente de su densidad (característica intensiva de la materia) y de la profundidad, por lo que las características geométricas de la sección transversal de la columna líquida son absolutamente despreciables en este tipo de análisis.

Hidrostática e Hidrodinámica

La Hidrostática es la parte de la Hidráulica que estudia a los fluidos en reposo. Esto tiene más ciencia y más utilidad de lo que a simple vista pareciera. Un fluido en reposo produce un empuje sobre las paredes del recipiente que lo contiene. Para cambiar de ejemplo, pensemos en una presa. Se trata de un muro que tiene que soportar la fuerza que el líquido aguas arriba del mismo ejerce de manera constante. Estaría prácticamente de más aclarar la importancia de considerar dicho efecto en el diseño de la presa. Ejemplos menos extremos contemplarían el diseño de un tanque, un tinaco, una cisterna o un cárcamo.

La Hidrodinámica, por su parte, estudia a los fluidos en movimiento como pueden

ser los flujos en una tubería o en un canal. La importancia de este campo quizás resulte más obvio a quien no está entrenado en física o ingeniería pues está muy relacionado con aspectos de la vida cotidiana como el abastecimiento de agua, el drenaje, la generación de energía o hasta el transporte.

Gasto o Caudal

Habiendo establecido lo que es la hidrodinámica, hablemos entonces de lo que es un flujo. Por flujo podemos entender el movimiento de un fluido a través de un medio, siendo éste provocado por presión o por gravedad. De esta manera, podemos caer en el concepto de gasto, es decir, la cantidad de un líquido (o gas) que pasa por unidad de tiempo y se puede cuantificar de acuerdo con la unidad que resulte más conveniente: litros por segundo, litros por minuto, metros cúbicos por segundo, por hora, o hasta por día. Gasto y caudal son sinónimos, pero es común que los ingenieros mexicanos utilicen con más frecuencia el primero.

Aforo de corrientes

Un aforo es la determinación del gasto en un conducto a superficie libre, como bien podría ser un río. Existen diversos métodos, pero solo hablaremos de aquél que fue utilizado en el Acueducto de

Tembleque. Se trata del método de sección velocidad, que consiste en la determinación de la velocidad del fluido en un punto y, con apoyo en las características geométricas de la sección transversal del conducto en ese punto, se puede determinar el gasto, mediante una ecuación muy simple, que consiste en el producto del área por la velocidad registrada. Dicho método puede complicarse tanto como las condiciones del entorno lo sean: no es lo mismo aforar el canal que corre por encima de alguna de las arquerías, que aforar alguna sección del Río Grijalva.

Ecuaciones (principios) fundamentales

Antes de iniciar con esta parte, me es muy importante aclarar que no dedicaré tiempo a deducciones de fórmulas y ecuaciones que requieren de avanzados conocimientos de matemáticas y física, por lo que sólo me limitaré a mencionarlas por su importancia como base para el análisis de un sistema hidráulico. Son tres las ecuaciones fundamentales que se utilizan en ingeniería hidráulica:

1. *Ecuación de continuidad.*- Parte del principio de conservación de la masa, es decir, lo que sale es igual a diferencia de lo que entra menos lo que se acumula, de manera que

1. si no hay acumulación, lo que entra es igual a lo que sale. Para un fluido incompresible (como es el caso del agua), la ecuación de continuidad plantea que, para un estado estacionario, el gasto en un conducto se mantiene. Tratándose de un fluido incompresible, como es el caso del agua, podemos expresar este principio mediante la fórmula:

$$Q = A \times V = \textit{constante}$$

En la expresión anterior el gasto queda determinado por la letra “Q” y se calcula multiplicando el área, “A”, de la sección transversal del conducto por la velocidad, “V”, que lleva el flujo. Este producto permanecerá constante siempre (cuando menos, tratándose del agua en el acueducto del que hablamos), lo cual significa que de un punto al otro, si el área disminuye, la velocidad debe aumentar y viceversa. Sea como sea, si las condiciones del sistema que se analiza permanecen inalteradas en el tiempo, el resultado de dicha multiplicación (es decir, el gasto) deberá ser el mismo siempre.

2. *Ecuación de la energía.*- Se desprende del principio de conservación de la energía. Todos

hemos escuchado una célebre frase que dice “la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”, y de la misma manera que para el principio de continuidad, el resultado de la suma de las energías asociadas al flujo permanecerá constante. Nótese que, con frecuencia, hablamos de pérdidas de energía en sistemas hidráulicos. Lo que en realidad ocurre no es una pérdida como tal, sino la transformación de un tipo de energía en otra. En ingeniería hidráulica, usualmente denotamos a la energía de una sección mediante la letra “H”, y la calculamos con la siguiente:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + h_f = \textit{constante}$$

En la expresión anterior se distinguen varios términos: el primero, “z”, se conoce como carga de posición y está asociado a lo que se conoce como energía potencial. Podemos entender esta energía mediante un ejemplo sencillo: pensemos en un resorte que se estira y se mantiene así. Dicho resorte tendría una cierta cantidad de energía almacenada, que sería la responsable de que al soltarlo, éste regresara a su configuración original. En otras palabras, y dicho de manera muy técnica, la energía potencial mide la

capacidad de una partícula para realizar un trabajo en función de su posición.

El segundo término, “ p/γ ”, se conoce como carga de presión y se refiere al mismo concepto del cual hemos hablado ya anteriormente. Este término cuantifica la presión que lleva el flujo.

El tercer término, “ $v^2/2g$ ”, recibe el nombre de carga de velocidad y se asocia a lo que llamamos energía cinética, y es la que lleva un cuerpo debido a su propio movimiento, o en este caso, la que lleva el fluido.

Finalmente, el último término, “ h_f ”, sintetiza todas las pérdidas de energía que se dan como consecuencia de diversos factores: la fricción entre el conducto y el fluido, los cambios de dirección, bifurcaciones u otras condiciones de carácter local, como válvulas y compuertas.

1. *Ecuación de impulso y cantidad de movimiento.*- Esta ecuación se obtiene a partir de las conclusiones de Newton sobre el movimiento de los cuerpos, cuyo estudio constituye una de las ramas fundamentales del conocimiento de la naturaleza, la Mecánica. La obtención de esta expresión requiere de definiciones complicadas, en las cuales no

tiene caso profundizar, pero basta con decir que su utilización permite calcular las acciones dinámicas (fuerzas) que ejerce un flujo sobre el conducto en que viaja, así como las reacciones de éste ante las condiciones en que se encuentra.

Tuberías y canales

En los sistemas hidráulicos que conocemos, lo más común, es que el agua fluya debido a una de dos razones: presión o gravedad. En el primer caso, el agua siempre se moverá de donde hay más a donde hay menos presión. Podemos ejemplificar lo anterior: aplicar presión en el extremo cerrado de un tubo de pasta de dientes, provocará que ésta salga por el extremo que se encuentra abierto. En un conducto a presión, que por lo regular, es un tubo cerrado, el fluido se encuentra bajo la aplicación de una presión similar a la del ejemplo, y por consiguiente, se mueve hacia donde hay menos presión.

El segundo caso es mucho más complejo de analizar y, por el momento, tan sólo mencionaré las generalidades. Un flujo por gravedad es el que encontramos, por ejemplo, en un río o en un canal de riego. Se conocen como flujos a superficie libre, ya que la presión atmosférica actúa sobre ellos y, al realizar un análisis de energía

como el que haríamos con la ecuación previamente mencionada, la carga de presión correspondería a la asociada al fondo del conducto.

La altura que se mide desde el punto más bajo de un canal hasta la superficie libre del agua se conoce como tirante, y se trata de una característica fundamental para el estudio de un flujo de este tipo.

En la práctica son comunes los canales abiertos tanto como los cerrados. Esto podría generar confusión, sobre todo si acabamos de hablar de conductos a presión en el párrafo precedente.

El tramo de Guadalupe Arcos

En mi experiencia, puedo decir que pocas personas han escuchado hablar sobre el Acueducto de Tembleque, sin embargo, quienes sí lo conocen (cuando menos de nombre) lo asocian inmediatamente a la maravillosa Arquería Monumental de Tepeyahualco, que consta de un puente de casi un kilómetro de largo y más de 60 arcos en su estructura.

No es de extrañar, sin embargo, no corresponde al tramo que he estudiado. Con honestidad he de decir que la arquería en las cercanías de la Hacienda de Guadalupe Arcos no tiene el mismo impacto visual, y es lógico que las personas no la conozcan. Se trata de un puente de 14 arcos (muchos menos que

Un tubo, trabajará como conducto a presión si va lleno, mientras que lo hará como canal en el caso contrario.

Los túneles del drenaje profundo son un gran ejemplo de un conducto cerrado que opera como un canal.

Existe una cantidad importante de conceptos relativos al estudio del movimiento de fluidos que, de ser necesario, mencionaré más adelante para explicar con más detalle lo que he observado en mi acercamiento al Acueducto de Tembleque.

en la Arquería Monumental, ciertamente), pero lo que verdaderamente llama la atención es la hidráulica que hay detrás de ella, más que la belleza arquitectónica, que no es para nada despreciable.

Aunque se trata de un tramo, en verdad, corto, resulta de mucho interés por incluir ambos tipos de conductos: a presión y a superficie libre. Inicia en un aljibe de dimensiones importantes, que alimenta una tubería de barro formada por módulos cónicos que “encajan” unos con otros.

Después de atravesar una línea de conducción a presión unos 120 metros, el agua da un giro en dirección ascendente hasta que, casi 4 metros más arriba, descarga a un canal que corre por la

parte superior de una bella arquería que libra una barranca considerable. En el extremo aguas abajo del puente, el agua vuelve a ingresar a una tubería de barro, esta vez descendente y continúa por debajo del nivel del terreno hasta una pequeña estructura que hemos identificado como una caja rompedora de presión. Después, el agua sigue su curso, pero para entonces habremos detenido el análisis: bastante hay que decir ya sobre lo que ocurre entre el aljibe y la caja.

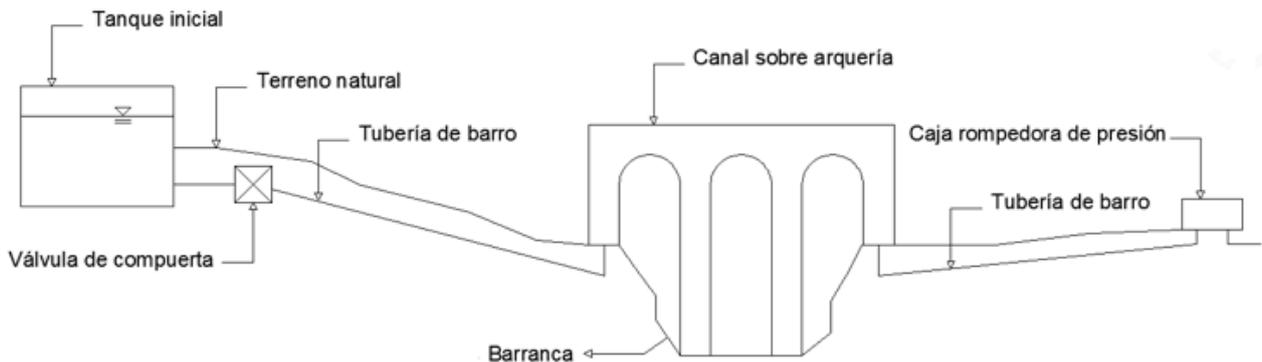


Figura 1. Esquema del tramo

Cálculo del gasto

Hasta el momento, no existe ningún dato oficial sobre cuál es el gasto con el que verdaderamente operaba el Acueducto de Tembleque. Algunas fuentes hacen alusión a fórmulas básicas para el flujo en canales y estiman valores que, cuando se razonan, dibujan un escenario muy lejano a la realidad. Por ello, me pareció que el primer gran acercamiento al funcionamiento hidráulico de este acueducto sería la determinación de un gasto de operación. La idea inicial consistía en llenar el aljibe y abrir la válvula de compuerta a la entrada del tubo de barro, pero eso habría supuesto la utilización de una gran cantidad de agua potable. Así que se llegó a la

conclusión de que se debía construir un muro divisorio en el interior del tanque, ya que la presión del sistema únicamente dependería de la carga (altura de la columna de agua) sobre la tubería y no del volumen (como normalmente se piensa), y así se hizo. La empresa resultó todo un éxito y arrojó datos muy interesantes.

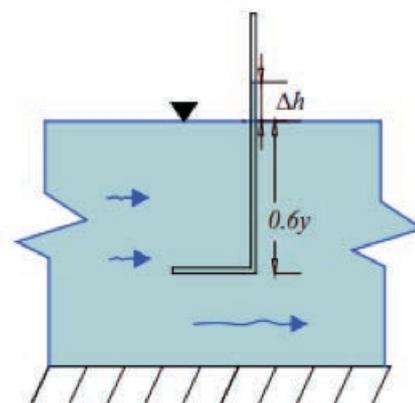


Figura 2. Funcionamiento esquemático del tubo de Pitot

La pregunta ahora sería, ¿cómo se determina un gasto? La solución fue simple. Mediante la utilización de un instrumento muy sencillo, conocido como tubo de Pitot, se empleó el método conocido como la relación sección – velocidad. El tubo de Pitot es un pequeño tubo doblado, cuyo extremo abierto inferior se coloca en el interior del líquido en movimiento (preferentemente a un 60% de la profundidad del flujo) mientras que el otro extremo funciona como un tubo piezométrico, es decir, un tubo capaz de registrar la energía del flujo (carga de presión + carga de velocidad).

Dicha energía se ve reflejada en la altura que alcanza el agua en el interior del tubo de Pitot que, al estar en movimiento, alcanza una altura superior a la de la superficie libre del agua en el canal.

La diferencia de altura entre la superficie del agua en el canal y la altura de la columna de agua en el interior del tubo, se denomina Δh (según se ve en la figura 2) y corresponde a la carga de velocidad.

Ahora bien, mediante una expresión muy simple (que corresponde al despeje algebraico de la velocidad en la expresión que define a la carga de velocidad) y donde g es la aceleración gravitatoria (considerando un valor de 9.81 m/s^2), se obtiene la velocidad del flujo, misma que

es fundamental para este método de aforo:

$$v = \sqrt{2g\Delta h}$$

La precisión de los resultados depende del número de secciones que se aforen. Las condiciones de este canal no permiten hacer mucho, por lo que se tomaron dos mediciones: una en cada extremo del canal. Se obtuvieron Δh de 1.1 y 0.7 centímetros, respectivamente. Empleando la expresión anterior y convirtiendo las lecturas a metros (dividiendo entre 100), los resultados son los siguientes:

$$v_{\text{inicio}} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.011} = 0.4646 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{final}} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.007} = 0.3706 \text{ m/s}$$

El método de aforo antes mencionado requiere únicamente de la aplicación de la ecuación de continuidad (recordemos que tan solo consiste en multiplicar la velocidad por el área de la sección para obtener el gasto que pasa en el conducto), por lo que fue necesario registrar el tirante en cada sección, y dado que el canal tiene una geometría rectangular también registramos el ancho de la plantilla, que es de 19 cm y permanece constante a todo lo largo, de principio a fin. Los tirantes registrados al inicio y final fueron de 14 y 17 centímetros. Por ser un rectángulo, el

área se calcula multiplicando el ancho de la plantilla del canal por el tirante. Los gastos son entonces,

Flujo en el canal

Se ha comentado antes que el estudio de los flujos a superficie libre presenta varias complicaciones. El objetivo de hacer un análisis de lo que ocurre a lo largo del canal que corre por la parte superior de la arquería es el de determinar características que permitan el estudio posterior de otros tramos del acueducto. Es pertinente mencionar que los materiales y técnicas con que se construyó el Acueducto de Tembleque no se parecen en nada a los conocimientos con los que hoy se diseña un sistema de suministro de agua. Por esta razón, es una tarea prácticamente imposible encontrar en la literatura especializada parámetros característicos de conductos como este canal en particular (o peor aún, como la tubería de barro). Vale la pena, entonces, comentar los rasgos generales de este canal.

Se trata de un pequeño canal de 170 metros de largo que tiene un ancho de plantilla de 19 centímetros. Su pendiente está alrededor de 0.23%², lo que significa que por cada metro recorrido en el sentido del flujo el nivel baja 2.3 milímetros, Cabe mencionar que este

valor es un 50% menor del que se acepta como pendiente media de todo el acueducto, mismo que de haberse utilizado para los cálculos realizados en este tramo, habría arrojado resultados equivocados.

En la determinación del gasto se utilizaron dos secciones con tirantes diferentes. ¿Tirantes diferentes? En efecto, a lo largo de los 170 metros de canal, el tirante tuvo una variación de 3 centímetros, la cual, a imple vista podría parecer despreciable. La observación de este fenómeno requiere de los métodos que existen para estudiar lo que se conoce como flujo gradualmente variado.

Entendámoslo de la siguiente manera. Un objeto que cae al vacío (no en el vacío, pues eso significaría algo distinto) va ganando velocidad por efecto de la aceleración gravitatoria, de tal forma que si midiéramos que tan rápido viaja en un determinado momento, veríamos que su velocidad es mayor que en un instante anterior. Sin embargo, en la medida en que el objeto gana velocidad, el aire opone una mayor resistencia al movimiento, lo que en otras palabras significa que hay una mayor fuerza de fricción. Cuando esta fuerza de fricción iguala al peso del objeto, éste deja de acelerarse y solamente cae a una velocidad constante, también llamada

terminal. Trasladando el ejemplo al agua que viaja por gravedad en un canal, ésta se acelera hasta que la fricción provocada por el fondo y las paredes del conducto iguala a su peso y solo le permite viajar a velocidad constante.

En lo que ocurre esto, la velocidad del agua va cambiando, y según el principio de continuidad, si la velocidad cambia, el área también lo hace. Si la geometría del canal se fija, esto significa que cuando el área cambia, el tirante cambia.

En el canal se observa un aumento del tirante, que es consecuencia de una descarga ahogada al final del canal y que provoca que el nivel del agua se estabilice en un nivel superior al del tirante que se observa en un inicio. Entonces, el hecho de que el tirante aumente implica que el área también lo hace y, por tanto, la velocidad disminuye: se tiene un flujo más lento al final del canal que al principio y qué tanto se frena dependerá de que tanta fricción ejerza el conducto sobre el flujo.

Existen algunos métodos para calcular un perfil de flujo que se utilizan con el objeto de revisar o diseñar una obra hidráulica. En este caso, me vi en la necesidad de utilizarlo al revés: tenía conocimiento de la variación de los tirantes, pero no del coeficiente de rugosidad (parámetro que

cuantifica las pérdidas de energía por fricción). De esta manera, apliqué un par de estos métodos haciendo variar dicho coeficiente, hasta que los tirantes calculados coincidieran con los tirantes medidos. En la ecuación de Manning, que es una expresión utilizada para el flujo uniforme (que es cuando el agua viaja a velocidad y constante y, por lo tanto, el tirante no varía) este coeficiente está representado por la letra n . Veamos la expresión:

$$Q = \frac{AR^{2/3}}{n} \sqrt{S}$$

Donde:

- Q es el gasto, en m^3/s
- A es el área hidráulica, o de la sección transversal, en m^2
- R es el radio hidráulico, que se obtiene dividiendo el área hidráulica entre el perímetro mojado, está en m
- S es la pendiente del canal
- n es el coeficiente de

rugosidad, y es el valor característico del material del cual está hecho el canal y que se obtuvo en los análisis realizados.

El valor obtenido para la “ n ” de Manning fue de 0.015567, que a simple vista no dice nada, pero que al compararlo con

otros materiales, presenta características similares a las de un canal hecho de ladrillos con mortero de cemento, piedra labrada o, tal vez un asfalto rugoso.

Flujo en la tubería

En la sección de análisis se distinguen dos tramos de conducción a presión. El primero, que va del aljibe al inicio de la arquería y el segundo, que va del final de la arquería a la caja rompedora de presión, mismos que se distinguen en el esquema de la figura 1. Los tubos que componen ambas líneas se fabrican

manualmente por artesanos y es lógico que, aunque presenten características similares, no sean iguales.

Es más, a riesgo de exagerar, me atrevería a decir que son completamente diferentes uno de otro, lo que se traduce en un análisis sumamente complicado si se quisieran considerar las características particulares de cada uno. Por ello, es que se tomó una muestra aleatoria de cinco tubos y se obtuvieron dimensiones promedio, mismas que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones de una muestra aleatoria de cinco tubos de barro

Tubo	Longitud (m)	Diámetro menor (m)	Diámetro mayor (m)	Espesor (cm)
1	0.640	0.167	0.203	1.675
2	0.674	0.168	0.210	1.830
3	0.640	0.162	0.210	2.140
4	0.650	0.171	0.213	1.565
5	0.638	0.161	0.212	2.270
Promedio	0.648	0.166	0.210	1.896

La aplicación de las ecuaciones se hizo bajo la consideración de que todos los tubos son iguales. La intención de esto es que tenemos que estimar, de alguna manera, las pérdidas de energía que sufrirá el flujo a consecuencia de diversas condiciones locales. Un flujo puede perder energía por dos razones principales: por fricción y por accesorio. El primer caso es bastante claro, sin embargo, el segundo tal vez requiera de una mayor profundización. Las pérdidas de energía por accesorio son pérdidas de tipo local, asociadas a alguna alteración en el conducto, como son ampliaciones, reducciones, bifurcaciones, cambios de dirección y válvulas, entre muchas otras. Vale la pena mencionar que, para conductos a presión, estas pérdidas se ven reflejadas en la presión del flujo, y no en la velocidad como generalmente se cree. Recordemos que, según el principio de continuidad, si el gasto y el área son constantes, la velocidad no se ve alterada.

Si trazamos un corte transversal de la configuración de los tubos en operación, veríamos un esquema como el de la figura 3.

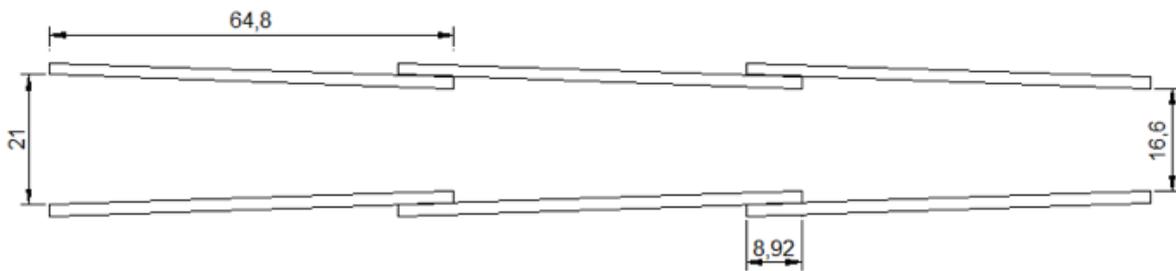


Figura 3. Vista en corte de los tubos colocados en serie, cotas en cm

Vemos entonces que el flujo estará sujeto a constantes reducciones graduales y a ampliaciones bruscas. Las primeras por efecto de que el tubo reduce su diámetro en el sentido del flujo y, la segunda, por efecto del empalme de las piezas. Asimismo, falta mencionar que se consideraron pérdidas de energía por entrada y salida del sistema y cambios de dirección de 90° en las columnas de la arquería.

La literatura proporciona un sinnúmero de coeficientes de pérdidas experimentales asociados a cada uno de los accesorios mencionados, mismos que se utilizaron en la aplicación de la ecuación de la energía.

Al igual que para el caso del análisis del canal, aquí se hizo un uso interesante de dicha ecuación. En la práctica se presentan, usualmente, problemas de revisión (en los que se busca calcular el gasto) o de diseño (en los cuales se busca dimensionar algún elemento) y las características de los materiales son proporcionadas por el fabricante (aunque cualquier libro de Hidráulica incluye características obtenidas experimentalmente para los materiales más comunes que, además, arrojan muy buenos resultados).

El inconveniente de este análisis es que contamos con gasto y dimensiones pero no con la rugosidad del barro de las líneas de conducción y dadas sus características, en la literatura es imposible hallar algo remotamente similar.

Por otra parte, ¿quién, en estos tiempos, utiliza barro en los sistemas de suministro de agua potable? La respuesta es simple: nadie. Así pues, la aplicación de las ecuaciones de la hidráulica tuvo por objetivo el descubrir los misteriosos atributos de estos tubos.

De un análisis muy engorroso se concluyó que la rugosidad de estos tubos, representada mediante la letra ϵ es de 0.3302 milímetros, que equivaldría a decir que es la altura promedio de todas las irregularidades y asperezas que conforman la superficie interior del tubo que es con la cual el agua entra en contacto.

Una discusión con expertos me hace concluir que, en verdad, es un material muy rugoso, pero el resultado es consistente con lo que ocurre en la realidad. Esta rugosidad es comparable a la de un tubo de concreto con acabado, más o menos, liso.

Las pérdidas por fricción son prueba de la resistencia al flujo que existe en los conductos.

Naturalmente, un conducto más liso permitirá al agua fluir más “fácilmente” y dar como resultado que pase un mayor gasto, si las condiciones iniciales permanecen constantes.

Uno de los análisis que se hizo fue el de simular (teóricamente) el funcionamiento de los tubos si éstos fueran de materiales diferentes de manera que podemos hacer una conclusión importante: dado un nivel fijo en el tanque, un material menos rugoso permitirá el paso de un mayor gasto, mientras que si el gasto es

constante, el tanque requerirá de una menor carga, es decir, un nivel más bajo.

Lo anterior se hizo con la intención, únicamente, de comparar el funcionamiento de la tubería en diferentes condiciones. No existe (ni existirá) proyecto alguno que intente alterar la operación del Acueducto, sino por el contrario, se busca mantener sus condiciones originales, a través de una restauración que busca resultados auténticos. La figura 4 muestra una gráfica en la que se muestra el comportamiento de la conducción si ésta fuera de diferentes materiales. De ella se desprenden algunos comentarios que podrían resultar interesantes.

Si nos remitimos al estudio del canal que corre por la arquería, faltó comentar anteriormente que éste tiene una capacidad de conducción de hasta 40 litros por segundo, si estuviera el agua a punto de desbordar. Sin embargo, vemos en la gráfica anterior que aún si el aljibe estuviera completamente lleno (es decir, que el agua alcanzara un nivel de 2.30 metros, que es la altura máxima en el interior del tanque) la resistencia al flujo impediría que se alcanzara este gasto. Vemos que la rugosidad del barro es tal que, si se llenara el aljibe, el gasto que se podría medir en el canal sería de poco menos de 16 litros por segundo.

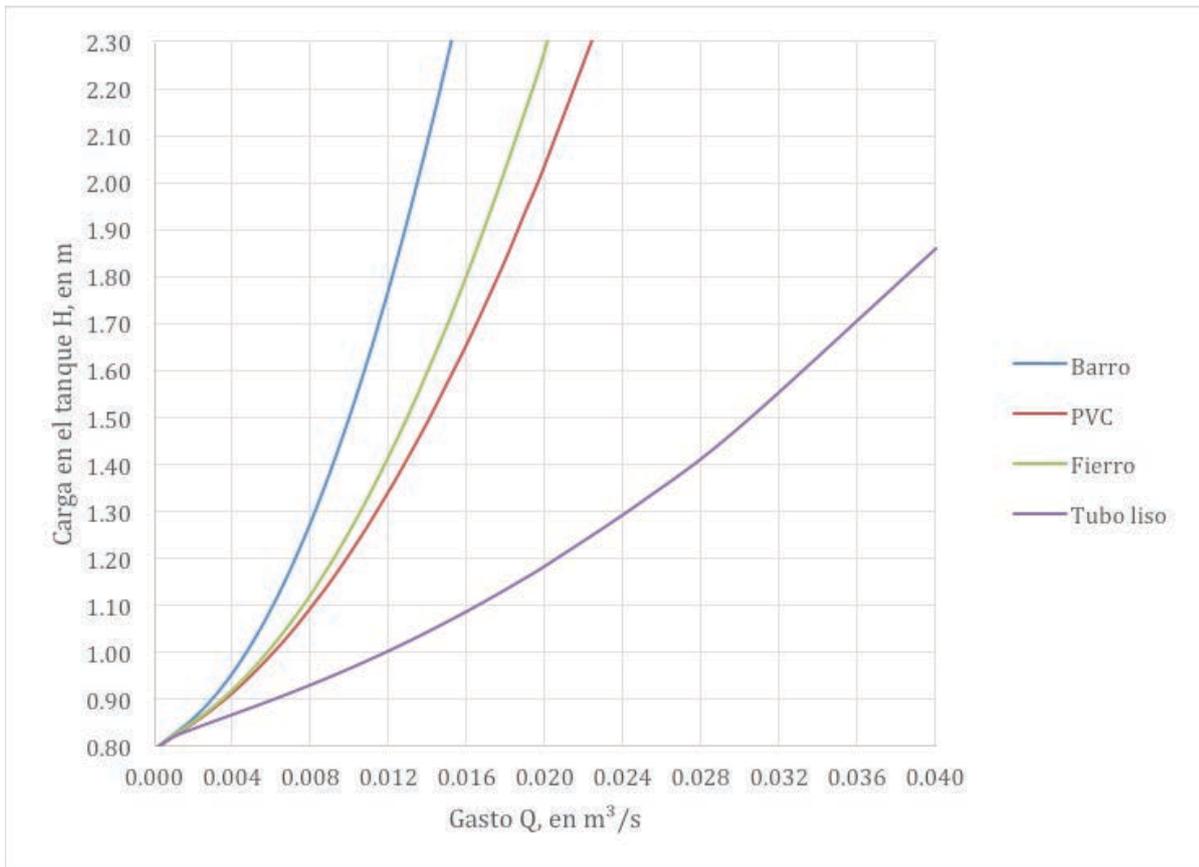


Figura 4. Variación del gasto en función de la carga en el tanque para tubería de diferentes materiales

Un material cuya rugosidad es varias veces menor a la del barro, como es el PVC, daría un gasto de hasta 22 litros por segundo. Difícilmente encontraremos materiales en la práctica que sean tan lisos, por lo que se concluye que nunca se alcanza la capacidad máxima del canal. La figura 4 también incluye una curva para un tubo idealizado totalmente liso en el que teóricamente no existirían pérdidas de energía por fricción (aunque si por accesorio, recordemos que el fluido atraviesa una válvula y un codo a 90°), y que solo requeriría una carga en el tanque de 1.85 metros para llenar el canal aguas abajo.

Finalmente, se desprende otra conclusión más relacionada con el aspecto histórico de la obra. Con el objeto de poder hacer mediciones precisas, se forzó el nivel del agua en el aljibe hasta una altura de 1.80 metros, pues de otra manera, el registro en el tubo de Pitot habría sido una tarea imposible, ya que los tirantes en el canal habrían sido cosa poco más que despreciable. Pero si observamos con calma las marcas de agua en el interior de dicho aljibe, veremos que éstas alcanzan una altura aproximada de metro y medio. La gráfica que obtuve para la figura 4, es muy reveladora porque si conocemos la carga real en el tanque,

entonces sabemos el gasto que pasaba por la arquería en condiciones normales de operación. Si leemos en la gráfica esta situación, veremos que para 1.50 metros de carga, el gasto es de 0.010 m³/s, lo que es lo mismo que 10 litros por segundo. Entonces, de acuerdo con la evidencia física y las ecuaciones fundamentales de la Hidráulica, a partir de este tramo, el Acueducto de Tembleque transportaba 10 litros de agua cada segundo, lo que significa que llegaban a Otumba, 864 metros cúbicos de agua diarios que resultan 864,000 litros diariamente. Me atrevo a decir que ésta es la primera vez que se determina este dato, más allá de estimaciones y especulaciones que los historiadores han hecho al respecto.

De los datos obtenidos para el primer tramo de la línea de conducción de barro (aguas arriba de la arquería) se elaboraron cálculos para el segundo tramo (entre a arquería y la caja rompedora de presión) con el objeto de corroborar los resultados. Afortunadamente, los resultados presentaron bajos porcentajes de error, con lo que también se logró caracterizar a dicha tubería de manera satisfactoria.

En lo que respecta a la tubería de barro, hay una última cosa que me gustaría comentar y que resulta de una

observación que alguna vez me hizo el Ing. Mateo Linaza. Sucede que en el extremo aguas abajo de la arquería, cuando el agua retoma su conducción a presión, en la parte baja (al menos durante el periodo de restauración, cuando el codo bajo la columna de piedra estaba abierto a la atmósfera) el agua salía con mucha “fuerza” y hacía un ruido casi inefable. Los restauradores, contrariados, no sabían cómo un flujo tan armónico y tan calmado en el canal, se tornaba en un atroz golpe al bajar por la tubería. Antes de verlo, me imaginé muchas cosas y traté de darle una explicación que pareciera lo más coherente a sus ojos. Sin embargo, al verlo en operación, respiré con alivio al ver que se trataba del fenómeno más simple de todos: presión. La descarga en el canal es un orificio de fondo que se ahoga completamente, de manera que la tubería descendente se comporta como si fuera un popote totalmente lleno. De esta manera, en la parte baja, la presión del agua corresponde a la de más de tres metros columna de agua (carga de presión) que nada tienen que ver con los 17 centímetros de tirante en el canal. Problema resuelto.

Un material cuya rugosidad es varias veces menor a la del barro, como es el PVC, daría un gasto de hasta 22 litros por

segundo. Difícilmente encontraremos materiales en la práctica que sean tan lisos, por lo que se concluye que nunca se alcanza la capacidad máxima del canal. La figura 4 también incluye una curva para un tubo idealizado totalmente liso en el que teóricamente no existirían pérdidas de energía por fricción (aunque si por accesorio, recordemos que el fluido atraviesa una válvula y un codo a 90°), y que solo requeriría una carga en el tanque de 1.85 metros para llenar el canal aguas abajo.

Finalmente, se desprende otra conclusión más relacionada con el aspecto histórico de la obra. Con el objeto de poder hacer mediciones precisas, se forzó el nivel del agua en el aljibe hasta una altura de 1.80 metros, pues de otra manera, el registro en el tubo de Pitot habría sido una tarea imposible, ya que los tirantes en el canal habrían sido cosa poco más que despreciable. Pero si observamos con calma las marcas de agua en el interior de dicho aljibe, veremos que éstas alcanzan una altura aproximada de metro y medio. La gráfica que obtuve para la figura 4, es muy reveladora porque si conocemos la carga real en el tanque, entonces sabemos el gasto que pasaba por la arquería en condiciones normales de operación. Si leemos en la gráfica esta situación, veremos que para 1.50 metros

de carga, el gasto es de 0.010 m³/s, lo que es lo mismo que 10 litros por segundo. Entonces, de acuerdo con la evidencia física y las ecuaciones fundamentales de la Hidráulica, a partir de este tramo, el Acueducto de Tembleque transportaba 10 litros de agua cada segundo, lo que significa que llegaban a Otumba, 864 metros cúbicos de agua diarios que resultan 864,000 litros diariamente. Me atrevo a decir que ésta es la primera vez que se determina este dato, más allá de estimaciones y especulaciones que los historiadores han hecho al respecto.

De los datos obtenidos para el primer tramo de la línea de conducción de barro (aguas arriba de la arquería) se elaboraron cálculos para el segundo tramo (entre a arquería y la caja rompedora de presión) con el objeto de corroborar los resultados. Afortunadamente, los resultados presentaron bajos porcentajes de error, con lo que también se logró caracterizar a dicha tubería de manera satisfactoria.

En lo que respecta a la tubería de barro, hay una última cosa que me gustaría comentar y que resulta de una observación que alguna vez me hizo el Ing. Mateo Linaza. Sucede que en el extremo aguas abajo de la arquería, cuando el agua retoma su conducción a

presión, en la parte baja (al menos durante el periodo de restauración, cuando el codo bajo la columna de piedra estaba abierto a la atmósfera) el agua salía con mucha “fuerza” y hacía un ruido casi inefable.

Los restauradores, contrariados, no sabían cómo un flujo tan armónico y tan calmado en el canal, se tornaba en un atroz golpe al bajar por la tubería.

Antes de verlo, me imaginé muchas cosas y traté de darle una explicación que pareciera lo más coherente a sus ojos.

Sin embargo, al verlo en operación, respiré con alivio al ver que se trataba del fenómeno más simple de todos: presión. La descarga en el canal es un orificio de fondo que se ahoga completamente, de manera que la tubería descendente se comporta como si fuera un popote totalmente lleno. De esta manera, en la parte baja, la presión del agua corresponde a la de más de tres metros columna de agua (carga de presión) que nada tienen que ver con los 17 centímetros de tirante en el canal. Problema resuelto.

Conclusiones

Explicar el funcionamiento hidráulico de una obra como el Acueducto Tembleque con herramientas actuales no es nada fácil, sobre todo si tomamos en cuenta que los investigadores no han encontrado datos que simplifiquen la tarea.

Creo que lo que presento aquí es el primer acercamiento al problema hidráulico que resuelve y es muy importante que no quede ahí, pues aún nos falta descubrir los misterios de más de 42 kilómetros de apantles, túneles y tubos.

Por lo pronto, ya no partiremos de cero, pues ya hemos conseguido caracterizar a los materiales que los componen, así como estimar el

volumen de agua que transportaban estas estructuras en sus mejores tiempos.

En un plano académico, quisiera que el desarrollo de este trabajo aporte un ejemplo real de la Hidráulica que nos enseñan en las escuelas de Ingeniería y espero, haber atraído no solo la atención de expertos en la materia, sino de cualquier persona que se interese por nuestra historia y, ya sea por gusto o por accidente, haya leído este texto.

En un plano histórico, espero haber contribuido (aunque sea muy poco) a develar lo que se esconde detrás de este maravilloso acueducto, que es un “pedacito” de nuestra identidad.

Referencias

Libros

Sotelo Ávila, Gilberto. *Hidráulica general. Fundamentos, Volumen 1*. Editorial Limusa. México, 2011.

Sotelo Ávila, Gilberto. *Hidráulica de Canales*. Primera edición. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 2002.

Acueducto Tembleque. Obra hidráulica del siglo XVI. Patronato Acueducto Tembleque, A. C. México, 2011.

Tesis

Bonilla Porras, José Antonio. *Revisión del funcionamiento hidráulico del Acueducto Tembleque*. Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 2013.





Detalle del mural dedicado al Padre Tembleque.
 Fuente: Acervo del Patronato Acueducto Tembleque, AC
 Foto: Dra. Graciela Mota

