

01162

//



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**Recuperación de la capacidad de conducción
en tuberías a presión**

TESIS

Que para obtener el grado de:

***MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)***

PRESENTA:

Sergio Ramos Tapia

Director: Dr. Rafael B. Carmona

Junio 2002



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

Al avanzar el tiempo de operación, los sistemas para abastecimiento de agua envejecen y se reduce la confiabilidad de su operación. En particular, equipos hidromecánicos y tuberías se deterioran o cambian sus condiciones de operación. Las tuberías se ven afectadas por procesos que reducen su capacidad estructural, como la corrosión y el crecimiento lento de fisuras y, también, por procesos que reducen su capacidad de conducción, entre los que se encuentran la acumulación de aire en el interior y el desarrollo de películas de diferentes materiales, adheridas a la pared interior.

La conservación de la limpieza de la pared interior de las tuberías debe entenderse como una acción encaminada a preservar la integridad física de los tubos, pues reduce riesgos de corrosión, y a conservar la capacidad de conducción, al evitar el incremento de la rugosidad. En esta tesis se hace una revisión de metodologías para limpieza interior de tuberías, se destacan sus ventajas y desventajas para aplicación en acueductos y se analizan requerimientos para uso en tuberías existentes y las especificaciones para nuevos proyectos.

La aportación más importante de este trabajo es la presentación de resultados de medidas en campo que muestran claramente los beneficios alcanzados en la recuperación de la capacidad de conducción por limpieza interior de tuberías, datos levantados en los acueductos Río Colorado – Tijuana y Chapala – Guadalajara.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Dedicatoria

El mayor enemigo del hombre actual parece ser no la bomba atómica, sino la ignorancia. No me refiero a la de los analfabetos, quienes más bien, por no saber leer, quedan inmunes a cierto tipo de propaganda y, por consiguiente, mejor capacitados para pensar y sentir en forma autónoma; aludo a la ignorancia de quien hemos estudiado y creemos saber.

Enzo Levi

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agradecimientos

Una vez más, no me canso de agradecer con todo corazón a mis padres y hermanos por el apoyo y la confianza que me han depositado en mí, que sin ellos, nunca hubiera sido posible realizar este trabajo.

Agradezco a mi Peque, que siempre ha estado ahí aguantándome y dándome todo su apoyo y amor en los momentos más difíciles.

Le agradezco a Rafael por la dirección de este trabajo, que además de ser una excelente persona ha sido siempre un buen amigo, de igual forma a Alejandro y Eduardo por ayudarme en todo momento en mi estancia en el instituto.

Finalmente, les agradezco a mis amigos del instituto José Arturo, Ascención, José Angel, Luis, Arturo, Oscar y Carlos, por todos esos momentos juntos que siempre recordaré.

Muchísimas gracias a todos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Índice

Resumen	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Introducción	v
Capítulo 1. Antecedentes	1
1.1 Marco de referencia	1
1.2 Acueducto Río Colorado - Tijuana	2
1.3 Acueducto Chapala - Guadalajara	5
1.4 Estudios de la calidad del agua y del material incrustado	7
1.4.1 Análisis en el acueducto Río Colorado - Tijuana	7
1.4.2 Análisis en el acueducto Chapala - Guadalajara	8
Capítulo 2. Dispositivos de limpieza	9
2.1 Dispositivos de limpieza de tuberías	9
2.1.1 Dispositivos tipo bala	9
2.1.1.1 Espuma de poliuretano	10
2.1.1.2 Limpiadores tipo mandril	15
2.1.1.3 Esferas	16
2.1.2 Limpieza de tuberías con chorro a presión	17
2.1.3 Limpieza mecánica	19
2.1.3.1 Limpiador mecánico retráctil utilizado en el ARCT	19
2.1.3.2 Limpiador mecánico rotatorio utilizado en el ACHG	22
Capítulo 3. Condiciones para limpieza con balas y su aplicación en dos acueductos	27
3.1 Conceptos básicos para el uso adecuado de dispositivos tipo bala	27
3.2 Corridas del dispositivo tipo bala en el ARCT	30
3.2.1 Análisis del dispositivo tipo bala en el ARCT	35
3.3 Corridas del dispositivo tipo bala en el ACHG	37
3.3.1 Análisis del dispositivo tipo bala en el ACHG	42
Capítulo 4. Recuperación de la capacidad de conducción en los acueductos Río Colorado – Tijuana y Chapala - Guadalajara	44
4.1 Capacidad de conducción	44
4.2 Reducción de la capacidad de conducción	45
4.2.1 Acueducto Río Colorado - Tijuana	45
4.2.2 Acueducto Chapala - Guadalajara	48
4.3 Recuperación de la capacidad de conducción	52
4.3.1 Acueducto Río Colorado - Tijuana	52
4.3.2 Acueducto Chapala - Guadalajara	53
4.4 Análisis económico de corridas de limpieza en el ACHG	60
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	63
Bibliografía	65



Introducción

Varios acueductos del país han presentado reducción en la capacidad de conducción de sus tuberías por efectos de aumento en pérdidas de carga por fricción, en parte atribuida al cambio de la rugosidad interna de los tubos. Se han identificado como posibles causas del incremento de la rugosidad, a la corrosión y a los depósitos orgánicos e inorgánicos adheridos en el interior de las tuberías, teniendo su origen en las características físico-químicas y biológicas del agua que transportan. Además, se ha podido observar que la rugosidad equivalente aumenta con el tiempo, ocasionando la pérdida de capacidad de conducción.

Este proceso de reducción es paulatino, por lo que pasa desapercibido por los organismos operadores hasta que sus efectos se manifiestan en un déficit en el volumen de agua entregado, aumento en el consumo de energía o saturación y derrame de agua en tanques.

Una posible razón de que no detecten el cambio los organismos operadores es generada por la operación de los sistemas en distintas épocas de servicio. Es decir, cuando se construyen los acueductos comienzan por operar a gastos parciales, no teniendo la necesidad de trabajar a gastos cercanos a los de diseño, dado que no se tiene la demanda de la población o se carece de la infraestructura necesaria ya que muchos acueductos se construyen por etapas. Por lo tanto, a medida que pasa el tiempo, se incrementa la demanda de la población y por consiguiente las exigencias en la operación del acueducto. Así, al momento de requerir operación a capacidad total, la rugosidad en los tubos ha crecido, con la consecuente disminución de la capacidad de conducción.

En este trabajo se muestra la posibilidad de recuperar la capacidad de conducción en acueductos mediante la limpieza de tuberías y se presenta información de la recuperación obtenida en dos acueductos de México. Asimismo, se presentan recomendaciones para el uso adecuado de los dispositivos de limpieza.

En el capítulo 1 se describe la problemática existente en las tuberías, resaltando la pérdida de capacidad de conducción en los acueductos Río Colorado – Tijuana y Chapala – Guadalajara. Además, se presentan resultados de estudios para establecer el origen de los mecanismos de adherencias en ambos acueductos.

El segundo capítulo presenta algunos dispositivos de limpieza para tuberías, donde se describen sus características más importantes, así como ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Las condiciones para limpieza de tuberías con balas y su aplicación en los acueductos, es motivo del tercer capítulo.

El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos con las corridas de balas de limpieza, así como la recuperación de capacidad de conducción para cada acueducto. Además, se propone un análisis de factibilidad económica para comparar costos de corridas de limpieza con costos asociados a no llevar a cabo esas corridas.

Finalmente, en el capítulo 5 se plantean las conclusiones y recomendaciones finales de este trabajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Marco de referencia

En la actualidad, gran parte del agua que se consume en las ciudades del país es conducida de sitios lejanos a través de tuberías a presión. Estas tuberías y otros elementos como equipos de bombeo, válvulas, torres de oscilación y tanques en conjunto son conocidos como *acueductos*. El buen funcionamiento del sistema depende mucho de la línea de conducción, por lo que, es uno de los elementos más importantes en la confiabilidad de la operación de los acueductos. Las conducciones pueden estar formadas con tubería prefabricada o colada en sitio, y de distintos materiales como asbesto-cemento, concreto presforzado, acero, hierro dúctil, PVC y polietileno de distintas densidades.

Por otra parte, hoy en día los acueductos de nuestro país presentan problemas en las líneas de conducción que reducen su confiabilidad como sistemas de abastecimiento de agua potable. Los problemas más importantes no están asociados a errores de operación, más bien son consecuencia de: reducción de la capacidad de conducción, corrosión del alambre de presfuerzo en tuberías de concreto, deterioro acelerado del recubrimiento anticorrosivo de la pared interior y externa de las tuberías de acero, rotura de tubería por deficiente calidad en los materiales y problemas asociados con el manejo transporte e instalación de tuberías. Los problemas se han agrupado en fallas de transporte y de contención, con causas y efectos como los mostrados en el diagrama siguiente (figura 1.1):

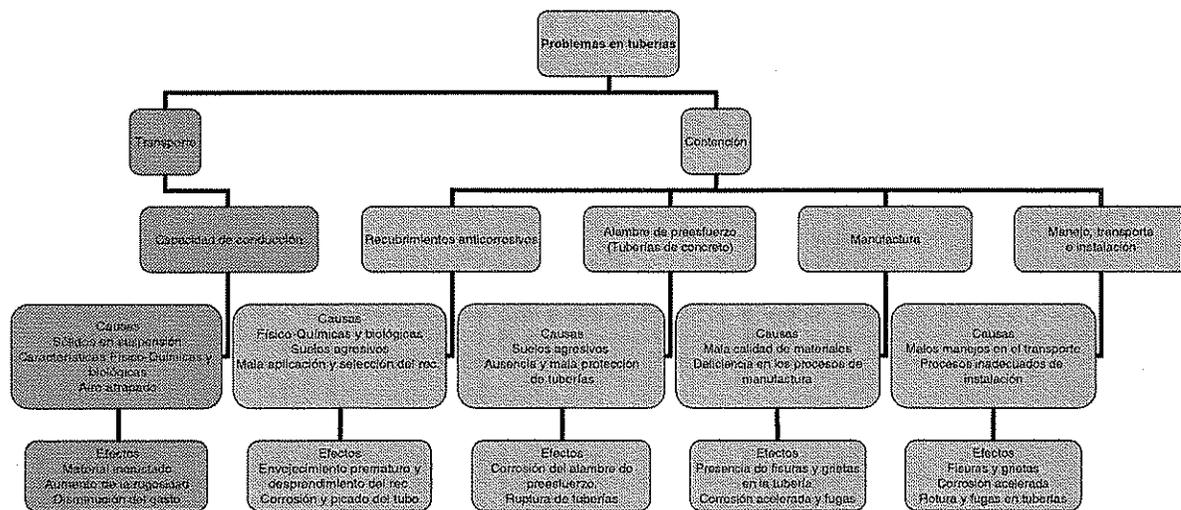


Figura 1.1 Problemas en tuberías

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

La problemática de transporte se enfoca a la pérdida de capacidad de conducción debida a los depósitos de material fino homogéneamente distribuidos en la pared interior de las tuberías, y a la presencia de sólidos en suspensión y de aire atrapado, este último de importante influencia, como se han mostrado con mediciones realizadas en campo (Sánchez A, et al; 2000). Estos efectos en conjunto crean alta resistencia al flujo y por consiguiente, reducen la capacidad de conducción del acueducto.

La pérdida de capacidad de conducción ha sido medida y documentada a lo largo del tiempo de operación de varios acueductos y se ha corroborado con la inspección directa al interior de la tubería, donde se ha observado la presencia de depósitos incrustados (Ramos S, 1998. Carmona R, et al, 1996).

Tan importantes como los problemas de capacidad de conducción son los problemas derivados de fallas en la contención producto de deterioro en los recubrimientos anticorrosivos en tuberías de acero, corrosión del alambre de preesfuerzo, manufactura y transporte e instalación que derivan en picaduras, fisuras o fallas mayores. Aunque todas las causas son muy importantes, este trabajo sólo trata el problema de reducción de capacidad de conducción por adherencias en la pared interna del tubo.

Por otra parte, es importante mencionar que en los sistemas a bombeo, la reducción de capacidad de conducción no sólo se traduce en un incremento de energía requerida por los equipos, sino además se refleja en un deterioro acelerado de las bombas al hacerlas operar fuera de sus condiciones de diseño. Este mismo efecto se tiene en la integridad física de las tuberías, dado que las incrustaciones aceleran el deterioro de los recubrimientos anticorrosivos, dañando la pared interna del tubo (disminuye su vida útil).

Los acueductos donde se ha presentado la mayor reducción de la capacidad de conducción por presencia de material incrustado son los acueductos Río Colorado – Tijuana (ARCT) y Chapala – Guadalajara (ACHG).

1.2 Acueducto Río Colorado – Tijuana

El acueducto Río Colorado - Tijuana está ubicado en el estado de Baja California, entrega agua a la Ciudad de Tijuana, y tiene como fuente de abastecimiento el Río Colorado. El agua es conducida por canales a través del Valle de Mexicali hasta el cárcamo de la primera planta de bombeo. A partir de esta planta, el acueducto en tubería cerrada a presión tiene una longitud total de 112.7 km, que incluye dos túneles. El gasto de diseño es de 4 m³/s y la carga dinámica total de 1136 m es proporcionada por seis plantas de bombeo, cada una con cuatro bombas en paralelo, donde una es de respaldo.

El agua del Río Colorado es captada y conducida por un canal abierto hasta el cárcamo de succión ubicado en la planta de bombeo No. 0 (PB0). Esta planta descarga en el tanque de sumergencia de la planta de bombeo No.1 (PB1), que a su vez descarga en el tanque de sumergencia de la PB2 y así, sucesivamente, hasta que la última planta (PB5) bombea el agua

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

hacia la torre de oscilación 5 (TO5) desde donde es conducida por gravedad, pasando por los túneles 2 y 3 hasta descargar libremente en el arroyo "El Carrizo" que la conduce a la presa de este mismo nombre. De "El Carrizo" el agua es conducida por gravedad hacia la planta potabilizadora "El Florido", ya muy cerca de la Ciudad de Tijuana. Aunque este punto constituye el sitio de entrega en bloque del acueducto, todavía desde la planta potabilizadora el agua es conducida hacia el tanque Aguaje de la Tuna y, finalmente, distribuida a la Ciudad de Tijuana (ver figura 1.2).

El Acueducto Río Colorado - Tijuana ha presentado problemas en sus líneas de conducción que reducen su confiabilidad como sistema de abastecimiento de agua a la ciudad de Tijuana, problema evidenciado por el alto crecimiento poblacional e industrial que en los últimos años se ha manifestado en esa ciudad, ocasionando serios problemas por falta de agua potable.

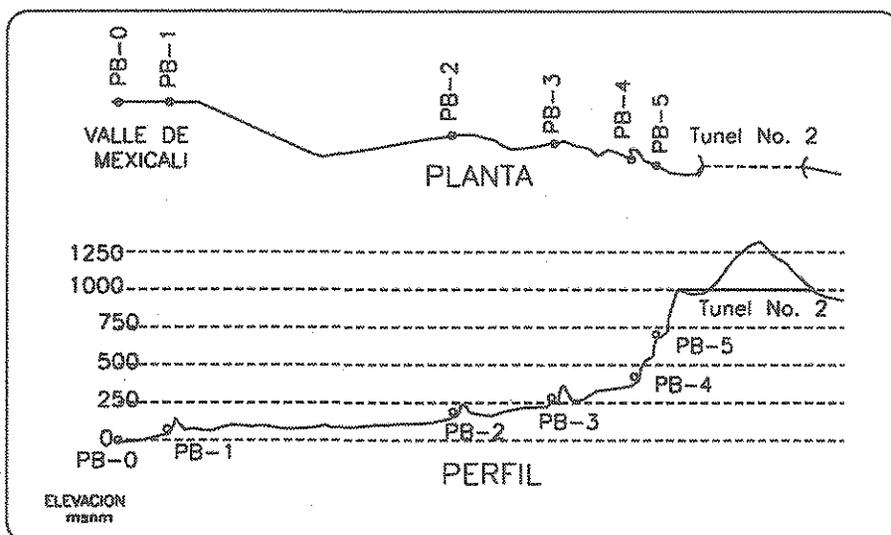


Figura 1.2. Esquema de la zona a bombeo del ARCT

Entre los problemas más importantes en las tuberías de ese acueducto, se encuentran la capacidad de conducción, la corrosión del alambre de preesfuerzo en tuberías de concreto y el deterioro acelerado de recubrimientos anticorrosivos.

En este acueducto se han realizado mediciones de capacidad de conducción desde 1987 hasta la fecha, y gracias a inspecciones de campo se pudo observar material limo-arcilloso en la pared interior de la tubería. En las fotografías 1.1 y 1.2, se observa el material incrustado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 1.1. Material incrustado en el interior de las tuberías del acueducto



Fotografía 1.2. Espesor de la incrustación de 2 a 6 mm.

1.3 Acueducto Chapala – Guadalajara

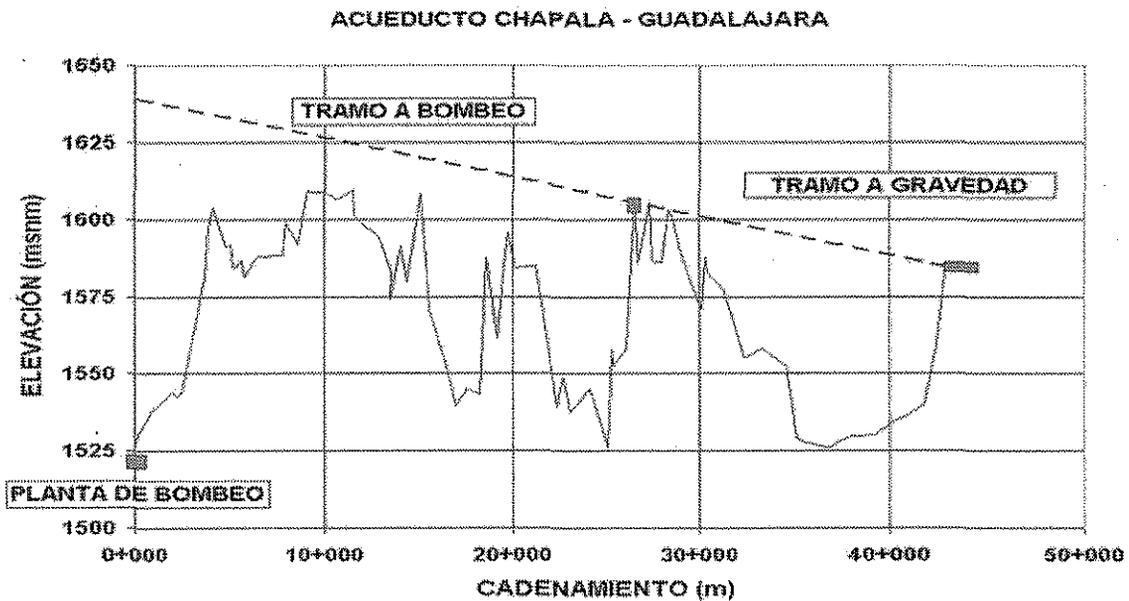
El acueducto Chapala – Guadalajara fue diseñado para entregar un caudal de 7.5 m³/s a la Ciudad de Guadalajara, Estado de Jalisco, siendo su fuente de abastecimiento el lago de Chapala. Para tal efecto, el acueducto cuenta con una planta de bombeo (PB) donde se tienen instaladas 5 bombas verticales (más una de respaldo) con gasto y carga de proyecto de 1.5 m³/s y 138 m, respectivamente.

La conducción tiene un longitud total de 42 km en tubería de concreto presforzado de 2.1 m de diámetro. Los primeros 26 km de tubería forman el tramo por bombeo que entrega el agua a un tanque de cambio de régimen (TCR) a partir del cual el agua escurre por gravedad hasta el tanque del cerro del cuatro (TE) en la parte sur de la ciudad (ver figura 1.3).

Una válvula de émbolo de paso anular, inmediatamente después del cabezal de descarga de las bombas, y un par de válvulas de mariposa a la llegada del tanque de cerro del cuatro permiten organizar la operación del acueducto según el número de equipos que se encuentran en funcionamiento en la planta de bombeo.

En el mes de mayo de 1990, se puso en servicio el tramo por bombeo (PB-TCR) vertiendo el agua bombeada del TCR hacia el canal el Guayabo para conectar con el sistema de abastecimiento Ocotlán-Guadalajara. Desde septiembre de ese mismo año, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, ha realizado mediciones de gasto y gradiente hidráulico a lo largo de la conducción durante la operación con 1, 2, 3, 4 y 5 bombas.

Al igual que en el acueducto Río Colorado, se tiene documentado la evolución temporal del factor de fricción y por consiguiente la capacidad de conducción. Inspecciones de campo permitieron conocer la presencia de material adherido a las paredes, ver fotografías 1.3 y 1.4 (Carmona R, et al, 1996).

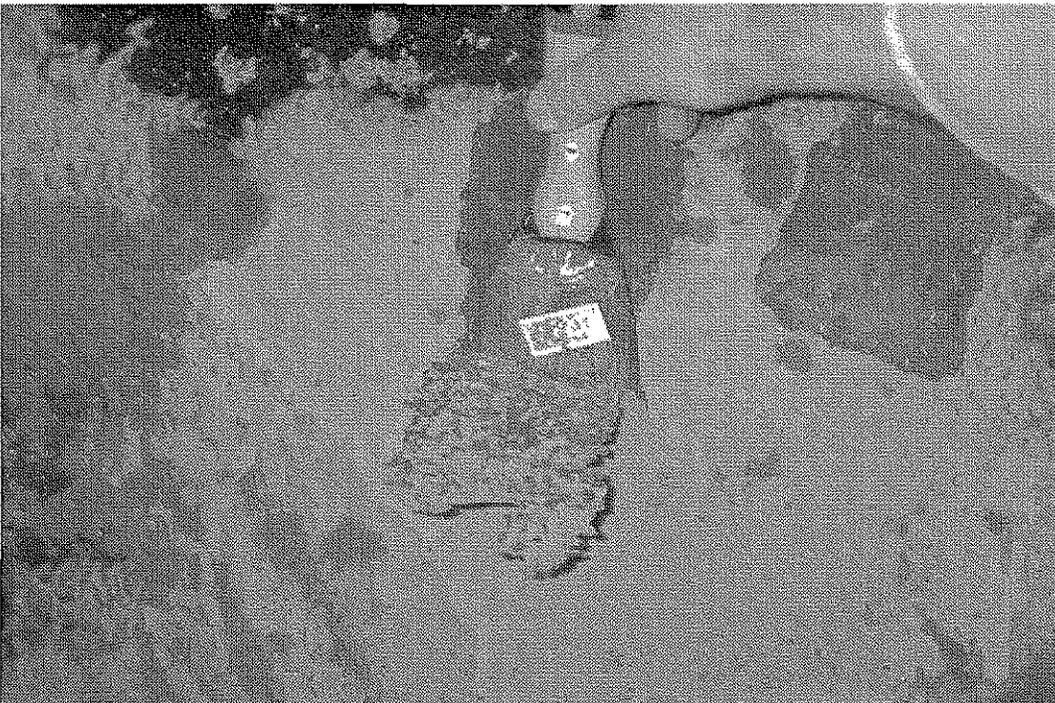


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 1.3. Esquema de la zona a bombeo y gravedad de ACHG



Fotografía 1.3. Tubérculos adheridos a la pared del tubo



Fotografía 1.4. Aspecto de la incrustación en el tubo (6 mm de espesor)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.4 Estudios de la calidad del agua y del material incrustado

También se han hecho estudios para investigar mecanismos que propicien la adherencia de los materiales sobre la pared interior de la tubería, lo que permite conocer la naturaleza de la incrustación. Los estudios y análisis se enfocaron, principalmente, a las características del agua y depósitos incrustados.

1.4.1 Análisis en el acueducto Río Colorado - Tijuana

En 1995 personal del acueducto tomó muestras de agua en diferentes épocas del año en el canal de la planta de bombeo (Ramos S., 1998). De los análisis se observó lo siguiente:

El agua que recibe el canal de la PB tiene un contenido mineral alto, los parámetros más afectados son: cloruros, sulfatos, dureza, alcalinidad total, turbiedad y gran cantidad de sólidos totales. Además se presentó el Índice de Langelier (I_L) basado en el pH y pH de saturación de la muestra. Este cálculo indica la tendencia del agua a ser corrosiva o incrustante por ejemplo:

- Si $I_L > 0$, agua con tendencia incrustante
- Si $I_L < 0$, agua con tendencia corrosiva

Los valores de este parámetro resultaron para todas las mediciones positivos, lo que indicó la tendencia incrustante. Existen otros parámetros como la dureza total y la alcalinidad que pueden producir incrustaciones debido a los iones de calcio y magnesio.

Existe otro parámetro que ayuda a conocer la tendencia del agua, este es el llamado Índice de Ryznar, que al igual que el anterior está basado en el pH y pH de saturación del agua con los siguientes calificativos (Velitchko G., et al, 1992):

- $4 \leq I_R \leq 5$, muy incrustante
- $5 < I_R \leq 6$, moderadamente incrustante
- $6 < I_R \leq 7$, poco incrustante o corrosiva
- $7 < I_R \leq 7.5$, corrosiva
- $7.5 < I_R \leq 9$, francamente corrosiva
- $9 < I_R$, muy corrosiva

Según Custodio (1976 y 1983) no es posible dar reglas precisas para decidir si un agua es o no incrustante, ya que la composición bioquímica también es importante. Existen otros parámetros como bacterias y microorganismos que pueden desarrollarse favoreciendo los mecanismos de adherencia.

Adicionalmente, en 1996 la Comisión Federal de Electricidad hizo pruebas de mecánica de suelos a una muestra de material adherido a la tubería. Los resultados mostraron que se trata de una arcilla limosa de baja plasticidad (Cl/CH), con arena fina, color café, límite líquido de 49 %, límite plástico de 22%, y densidad de sólidos de 2.62. Con base en sus límites de consistencia y análisis granulométrico combinado se determinó su actividad desde el punto de vista geotécnico; éste resultó de 2.7, lo que indica que la fracción fina de la muestra está constituida por minerales

de arcilla activos con fuerzas de atracción electrostáticas altas, lo cual podría explicar su adherencia a la pared interior del tubo.

Victorica (1997), realizó otros estudios en el acueducto, los resultados mostraron que el material depositado y la corrosión encontrada en las tuberías se deben a una acción conjunta de procesos químicos y bioquímicos que inciden en el proceso de corrosión y material adherido.

Desde el punto de vista químico, la determinación del índice de Langelier no basta para determinar la corrosividad o incrustabilidad, sino que se deben tomar en cuenta todos los factores que contribuyen a los procesos.

Victorica propuso evitar los problemas de incrustaciones con un recubrimiento interior con base en resina epóxica para las tuberías y someter el agua influente a proceso de clarificación y cloración, acciones que a la fecha no han sido llevados a cabo, después de 6 años.

1.4.2 Análisis en el acueducto Chapala – Guadalajara

En julio de 1997 Victorica realizó estudios al agua y al material incrustado en el interior de los tubos, con los resultados siguientes:

La formación de los depósitos de material tiene origen en la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua que ingresa al acueducto. La formación de los depósitos inicia con la adherencia de bacterias y algas, mismas que al irse aglutinando van formando una biopelícula con características pegajosas que favorecen la adherencia de las partículas suspendidas en el agua, como arcillas y materia orgánica que utilizan tales microorganismos como sustrato; este proceso continúa produciendo el engrosamiento de la biopelícula.

Dado que el inicio de la formación de los depósitos son algas y bacterias, se recomendó separar o inactivar estos microorganismos antes de que ingresen al acueducto. El mecanismo estaría formado por procesos de predesinfección-filtración-posdesinfección o coagulación-sedimentación-desinfección, para los cuales se deberían realizar pruebas de tratabilidad.

De lo anterior, se observa que es necesario realizar análisis y trabajos para evitar que se formen estas incrustaciones; sin embargo, los organismos operadores hasta el momento en ambos acueductos no han realizado ninguna tarea para evitarlo, anteponiendo los costos de los trabajos.

Para el acueducto Chapala-Guadalajara el costo estimado para la construcción de una planta nueva con capacidad de potabilizar $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ es de \$ 432,000,000.00 con un costo de operación y mantenimiento de \$ 38, 880, 000.00/año, mientras que para el acueducto Río Colorado-Tijuana el costo aproximado para tratar $4 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua es \$ 202,126,703.00 para la construcción de un sistema de pretratamiento y \$ 10,561,046.00/año para la operación y mantenimiento.

En resumen, mientras que no sea resuelto el problema de origen, será necesario realizar labores de limpieza periódica de tuberías para recuperar la capacidad de conducción en estos acueductos.

Capítulo 2. Dispositivos de limpieza

Dentro de la rehabilitación de tuberías, la limpieza desempeña un papel muy importante, ya que contribuye a preservar las dos funciones principales para las cuales son diseñadas las tuberías: la capacidad de *transportar* y la de *contener* el volumen de agua deseado en un sistema de abastecimiento. En la función de *transportar*, la limpieza tiene dos objetivos fundamentales: *restituir* y *conservar* la capacidad de conducción, tema central de este trabajo de tesis. La función de *contener* el fluido, se ve favorecida por la limpieza al preservar la *integridad física del tubo*. En este capítulo se presentan los procedimientos más adecuados para llevar a cabo la limpieza interior de tuberías.

2.1 Dispositivos de limpieza de tuberías

La capacidad de conducción de una tubería debe garantizar el *transporte* del gasto ó del *volumen* de agua demandado, lo que obliga a evitar el incremento de la rugosidad por la presencia de material incrustado en el tubo.

Para efectuar limpieza existen diversos dispositivos, todos de naturaleza muy particular, entre los que se encuentran:

- Tipo bala
- Chorro a presión
- Mecánicos

2.1.1 Dispositivos tipo bala

Con el fin de evitar la formación de depósitos de material sólido dentro de la tubería o para retirarlos, se han probado con éxito el uso de dispositivos tipo bala (también llamados pigs o diablos) que permiten limpiar la tubería estando en servicio.

Actualmente, dentro existen 3, tipos de balas:

- Espuma de poliuretano
- Mandriles
- Esferas

2.1.1.1 Espuma de poliuretano

Estos son dispositivos con forma de bala, tienen base cóncava y son fabricados con espuma de poliuretano de alta densidad, según sea necesario (2 lb/pe^3 , 5 lb/pe^3 y 8 lb/pe^3). Además, presentan una cubierta plástica, también de poliuretano, que puede tener accesorios, como cepillos de alambre de acero, para incrementar su efecto abrasivo (Ramos S., 1998). Ver fotografía 2.1.

Las balas se mueven a través de las tuberías junto con el flujo mientras van limpiando, sin interrumpir totalmente la operación del sistema. Cuando a la bala se le aplica presión hidráulica en su base posterior (cóncava) se expande provocando una acción de sellado y raspado en la pared interior de la tubería, lo que elimina las protuberancias y retira el material adherido mientras va avanzando. Aunque no logre limpiar por completo la superficie, si disminuye la rugosidad de la adherencia significativamente.



Fotografía 2.1. Dispositivo tipo bala (espuma de poliuretano)

Tienen diámetro ligeramente mayor que el de la tubería para incrementar el arrastre por fricción entre la superficie exterior de la bala y la pared interior de la tubería. Además, son de una longitud aproximada de dos veces el diámetro, a fin de reducir la posibilidad de que vuelquen dentro del tubo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una característica importante en la clasificación de las balas, es la dureza de su material que se mide con la escala del durómetro A, empleada para medir la dureza de plásticos parecidos al caucho. Por ejemplo, según Harper (1975), una dureza que varía entre 30 y 40 corresponde a una liga de hule, entre 50 y 60 a una llanta de automóvil y de 70, a tacón de zapato. Las balas típicas presentan en su cubierta de base una dureza de 90 A, la cual proporciona una superficie selladora trasera para las fuerzas propulsoras del agua transportada. Un esquema de la escala del durómetro es presentado en la figura 2.1.

TESIS CON
FALLA LE ORIGEN

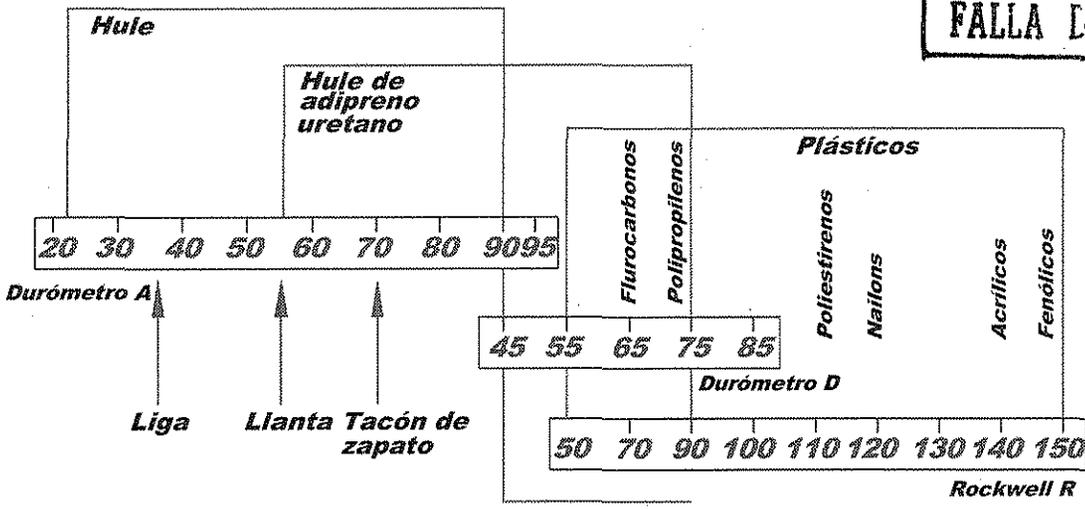


Figura 2.1. Durezas para diversos polímeros

Las capas externas de algunas balas tienen espirales de poliuretano con dureza de 90, según la escala anterior. Las espirales añaden resistencia y, en comparación con la espuma sola, dan una mayor acción barredora y raspadora. Se pueden empotrar cepillos a las espirales de poliuretano con alambres de acero inoxidable o al carbón, plástico, buriles, lijas etc. También estas pueden ser cuchillas de metal o plástico, todo dependerá del tipo de depósito por remover.

El movimiento limpiador de las balas comienza en el arrastre por fricción, proporcionado por su mayor diámetro respecto al del tubo. La mayor parte del sedimento incrustado que ha sido raspado es empujado delante de la bala, conforme ésta avanza a través de la tubería. Una parte del sedimento puede quedar detrás de la bala, el cual podrá ser limpiado por la corrida de una segunda bala o por el mismo flujo que circula dentro de la tubería (figura 2.2). Es importante resaltar que debe existir un sello para crear una diferencia de presión que haga que la bala se mueva, pero el sello no es total y permite el flujo de chorros a muy alta velocidad a través de un espacio anular muy reducido.

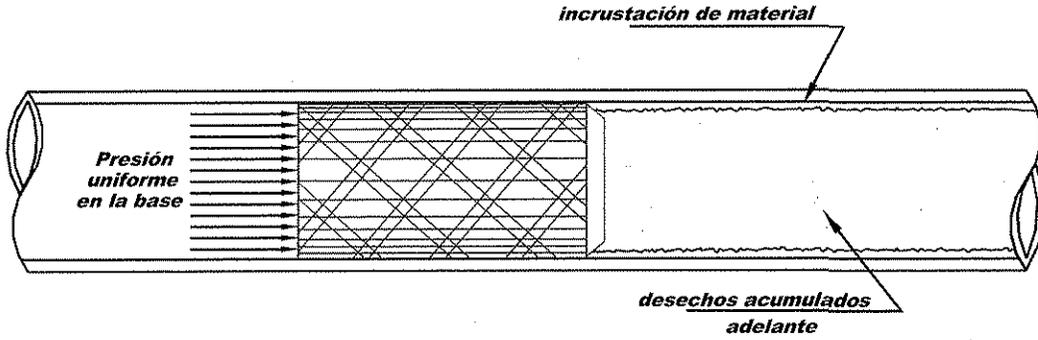
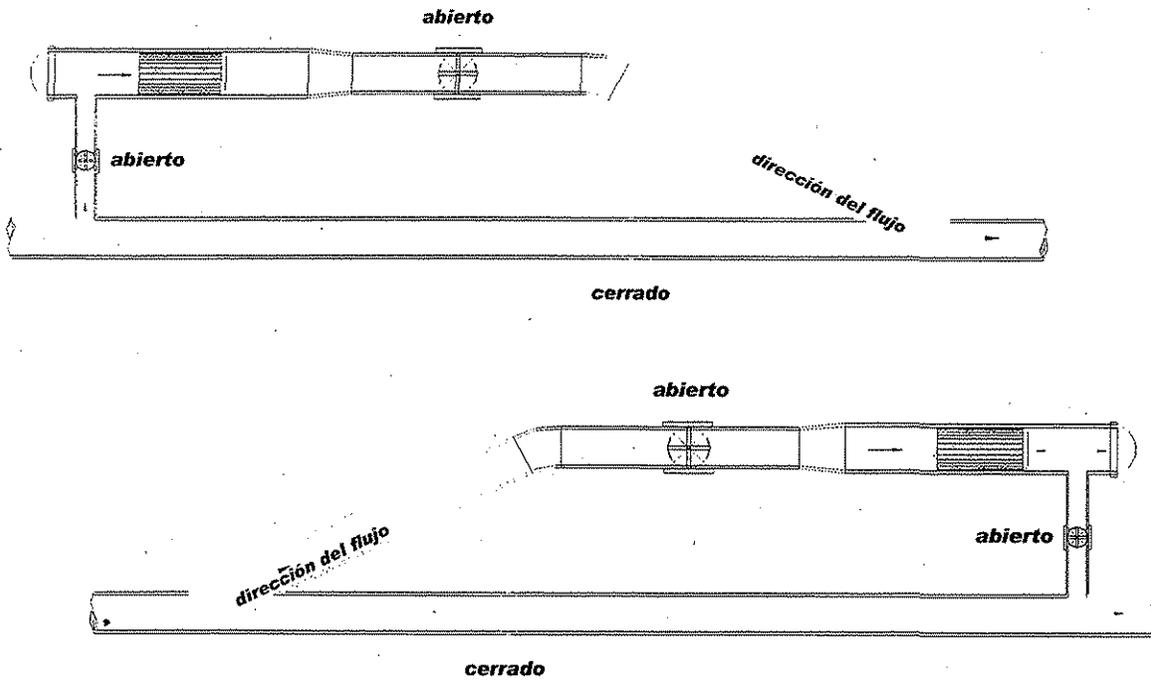


Figura 2.2. Bala realizando limpieza en el interior del tubo

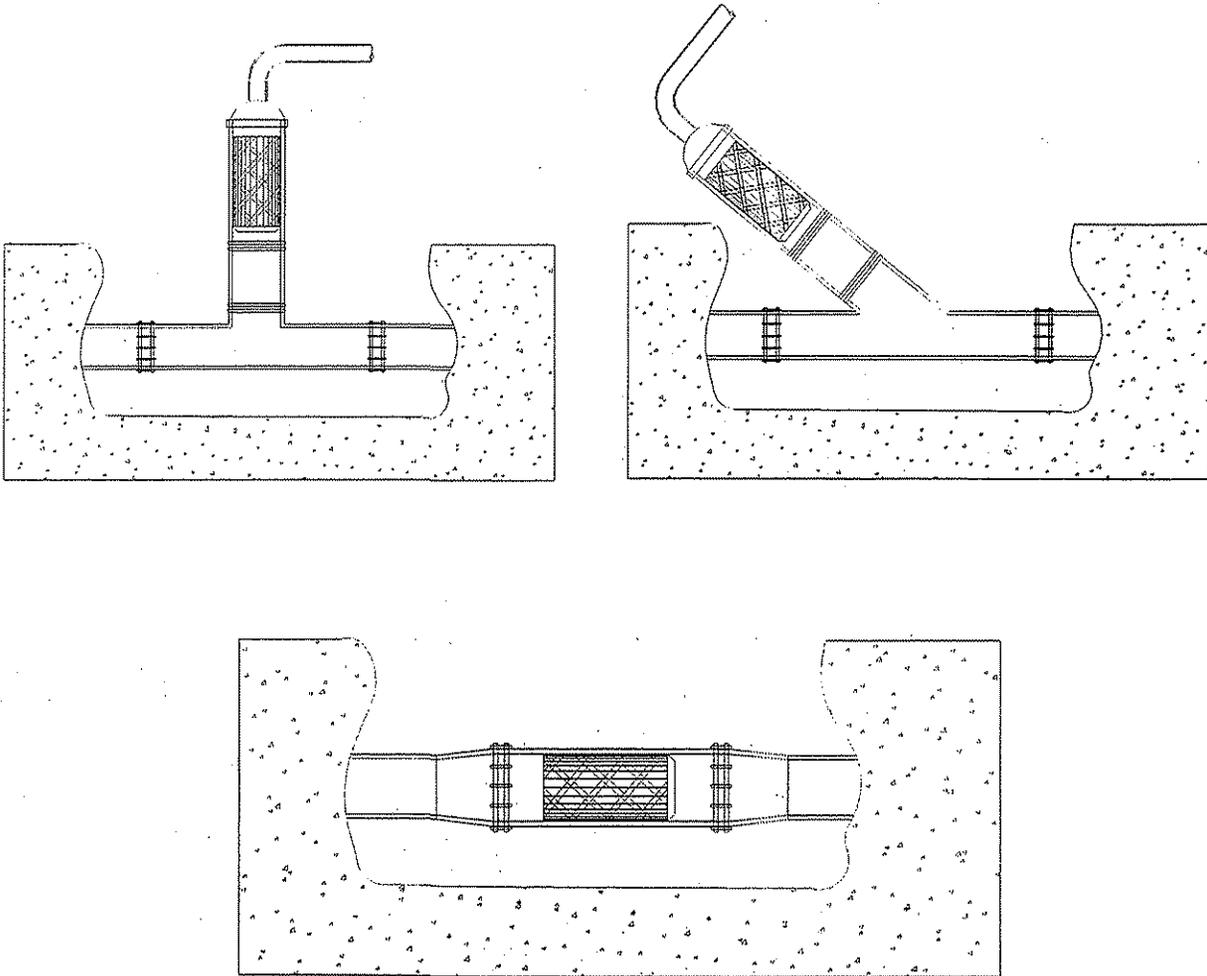
Según el catálogo de Aqua – pigs (1995), para que las balas sean colocadas dentro del sistema que van a limpiar, se emplean esclusas que se adaptan a la tubería. Para retirarlos se emplea otra esclusa de descarga especial como se observa en las figuras 2.3 y 2.4.



Figuras 2.3. Esquema tipo para esclusas lanzadora y receptora

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

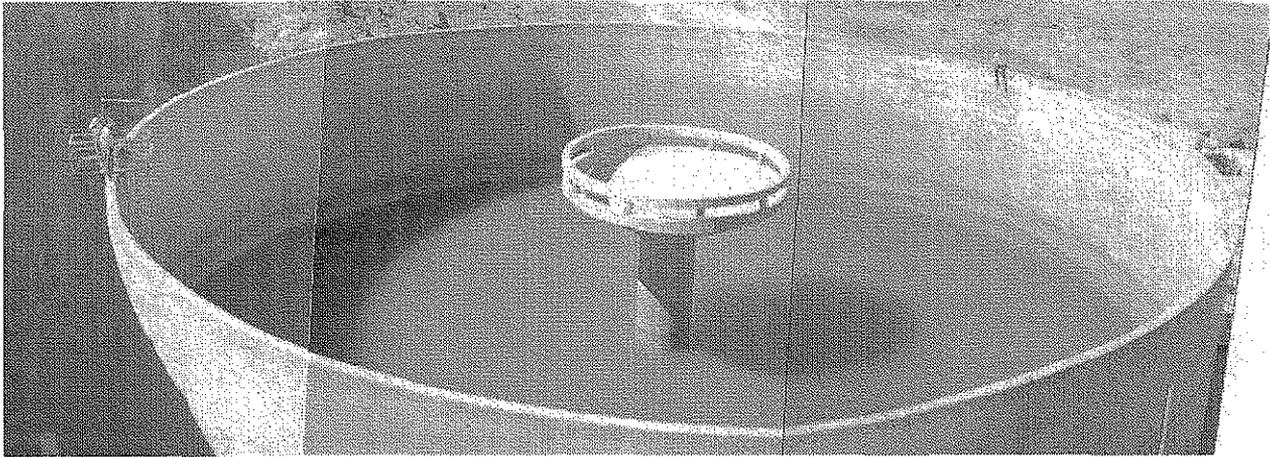
La esclusa de entrada puede ser de varios tipos:



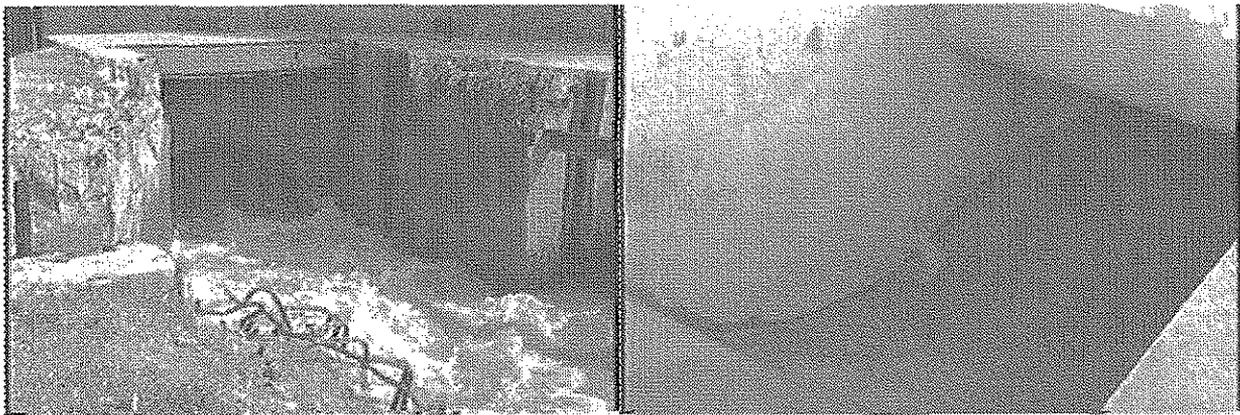
Figuras 2.4. Otros tipos de esclusas de entrada para adaptarse en diferentes condiciones

Otra forma de introducir o recibir las balas de limpieza, es mediante el uso de estructuras abiertas existentes en el sistema, como tanques de sumergencia, cajas de enlace, tanques de cambio de régimen, etc. En las fotografías 2.2, 2.3 y 2.4 se observan ejemplos de estas estructuras.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 2.2. Tanque de sumergencia como estructura receptora de balas, en el ARCT.



Fotografías 2.3. Caja de enlace en el ACHG. (estructura receptora)

Fotografía 2.4. Tanque de Cambio de Régimen en el ACHG (estructura lanzadora)

Con el fin de monitorear el avance de las balas a través de la línea, se utiliza un sistema rastreador, con base en un radio transmisor instalado en el interior de la bala, una antena rastreadora y un receptor (fotografía 2.5). Las señales electrónicas de baja frecuencia del transmisor indican su localización. Si una bala ha encontrado un obstáculo inesperado en la tubería y no llega al sitio deseado, su localización puede ser conocida caminando junto a la tubería con la antena rastreadora y el receptor hasta que sean captadas las señales del transmisor. Esta situación es muy poco probable ya que las fuerzas que se generan sobre la bala son muy grandes y antes de atorarse, se rompen. Por ejemplo, la fuerza generada por metro columna de agua (mca) de presión dentro de una tubería de 54 in de diámetro es 1477 kg (acueducto Río Colorado-Tijuana), mientras que para una tubería de 84 in de diámetro es 3575 kg (acueducto Chapala-Guadalajara).

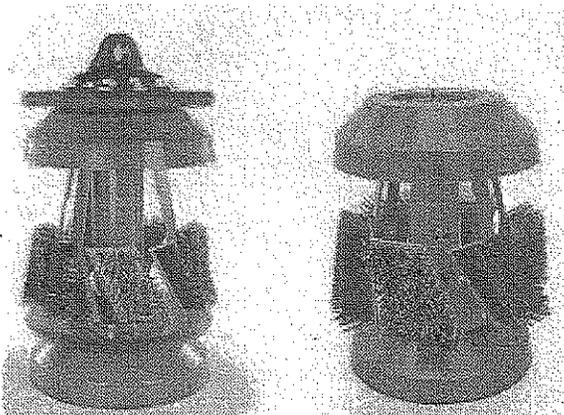
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 2.5. Transmisor utilizado para localizar el dispositivo

2.1.1.2 Limpiadores tipo mandril

Este tipo de dispositivo, al igual que el anterior, se introduce en la tubería con el mismo principio de propulsión que la bala. Los limpiadores de este tipo tienen cuerpo cilíndrico sólido que puede ser de diferentes materiales (acero, aluminio o polímero) y están equipados con copas o discos para producir el sellado y crear una diferencial de presión que lo haga avanzar dentro de la tubería; asimismo están provistos con cepillos de alambre para limpieza. Tanto los cepillos como las copas y los discos sufren desgaste y pueden ser sustituidos por nuevos para realizar otras corridas de limpieza. La nariz del mandril cuenta con orificios donde se descargan chorros a presión que hacen que los sedimentos permanezcan delante de la tubería (Girard Industries, sitio web. Alcerreca H., 1998).



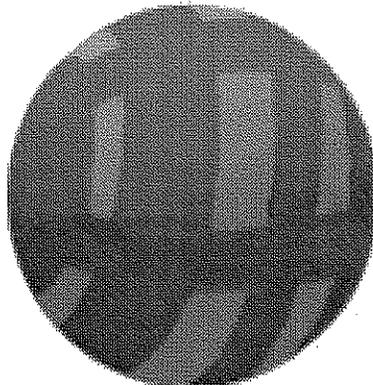
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fotografía 2.6. Mandriles de limpieza

2.1.1.3 Esferas

En general las esferas son comúnmente usadas para remover algún tipo de líquido o depósito en tuberías de gas o agua, separar líquidos en la industria petroquímica, remover aire atrapado antes de realizar pruebas hidrostáticas de tubos y para limpieza (Girard Industries, sitio web. Alcerreca H., 1998). Existen diferentes tipos:

- **Esferas solubles:** Utilizadas en la industria petrolera para introducir a la tubería algún tipo de sustancia, como puede ser un inhibidor que evite la formación de depósitos o para removerlos (limpieza química). Su composición física dependerá de la clase y tipo de depósito a remover (parafinas, ceras, etc). Esta técnica podría ser empleada en los acueductos, a través del cárcamo de bombeo o tanques para introducir algún tipo de sustancia inhibidora de actividad bioquímica que ayude a evitar la formación de depósitos.
- **Esferas inflables:** Se usan con el fin de separar líquidos o para remover incrustaciones suaves. Estas son elaboradas con diferentes plásticos como poliuretanos, neoprenos, etc. Se inflan con agua o con otras sustancias, pero nunca con aire por su alta compresibilidad. El tamaño recomendado para la esfera es de 1 ó 2 % mayor que el diámetro de tubería. Su cubierta es reparable y fácilmente se acopla a diferentes diámetros en tuberías; si el diámetro es muy pequeño se deberán usar esferas sólidas.
- **Esferas de espuma:** Al igual que los dispositivos tipo bala son usadas para limpieza, sólo cambian su geometría a esférica. Para limpieza se incorporan cepillos de diferentes materiales para incrementar el efecto abrasivo sobre la superficie del tubo. Otro uso importante es para purgar aire en conductos (usados para pruebas hidrostáticas). Tiene la desventaja de perder el efecto de sellado en ramales y bifurcaciones por su corta superficie longitudinal, pero tienen la ventaja de dar vuelta con facilidad en codos con curvaturas pronunciadas sin atorarse, además son más económicas que los dispositivos tipo bala (ver fotografía 2.7).



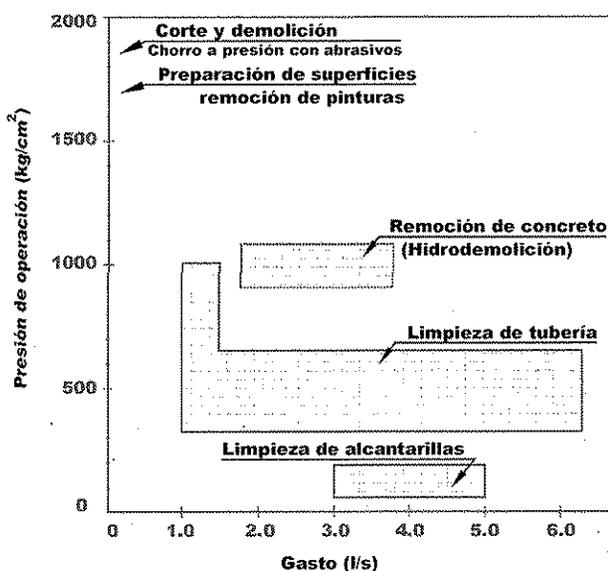
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fotografía 2.7. Esfera

2.1.2 Limpieza de tuberías con chorro a presión

Esta tecnología del chorro a presión utiliza agua o aire y ha sido usada en casi todos los campos de la industria moderna, como en limpieza, corte y demolición. Como método de limpieza de superficies en tuberías está calificado como uno de los mejores por su eficacia para eliminar incrustaciones, herrumbre, escorias y pinturas viejas, según sea el caso, y por el grado de limpieza alcanzado. En la figura 2.5 se muestra un recuadro con los intervalos de presión y gasto que se han reportado para llevar a cabo diferentes trabajos de limpieza (Momber A., et al, 1998).

Incluso puede usarse para retirar recubrimientos existentes y preparar la tubería para ser rehabilitada con un nuevo recubrimiento.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.5. Usos del chorro de agua a presión

En la figura anterior, se puede apreciar que para limpiar tuberías, es suficiente una presión de 500 kg/cm² y un gasto de 1 a 6 l/s.

La eficiencia para remover, por ejemplo, un recubrimiento bituminoso de 8 mm a 12 mm de espesor es de 45 m²/h. Así mismo, para una tubería de 580 mm de diámetro su rendimiento aproximado diario será de 1 a 1.5 km, más sin embargo la eficiencia estará en función del tipo, espesor y dureza del recubrimiento o incrustación.

Por otra parte, esta técnica de limpieza ha sido usada para dar un perfil de anclaje o terminado de superficie adecuado, durante el proceso de aplicación de nuevos recubrimientos en tuberías de acero.

De acuerdo con diversas normas, existen diferentes grados de limpieza a saber (Manual de diseño y agua potable, alcantarillado y saneamiento, CNA, 1994):

Metal blanco, este grado de limpieza se aplica cuando se requiere una excelente preparación de la superficie. Es considerada como la limpieza ideal del acero, remueve completamente toda la herrumbre y escoria, deja una superficie de color gris ligero, uniforme y sin manchas.

Cercano a metal blanco, este tipo de limpieza remueve completamente toda la herrumbre y la escoria, dejando una superficie de color gris ligero, uniforme pero con ligeras sombras, o coloraciones causadas por la herrumbre o por la pintura que se encontraba en la superficie. Estas sombras no deben ser mayores que el 5% de cada unidad de área de superficie.

Grado comercial, esta limpieza remueve óxido, escoria, aceite, pintura y otras sustancias extrañas, dejando una superficie de color gris oscuro que no se requiere que sea uniforme, con ligeras sombras o coloraciones las cuales no deben ser mayores que el 33% de cada unidad de área de superficie.

Grado ráfaga. Este grado de limpieza remueve las escamaciones sueltas, productos de óxido y residuos de pintura sueltos. La superficie debe quedar libre de grasa, polvo o de cualquier sustancia extraña o suelta. Las escamaciones, óxidos o pinturas fuertemente adheridas pueden observarse sobre la superficie y para cerciorarse de su adherencia puede utilizarse una espátula sin filo.

Esta limpieza incrementa su efecto abrasivo mediante la adición de partículas, que golpean la superficie a muy alta velocidad provocando un efecto de picado, desconchado y desgaste por rozamiento, es decir se remueve junto con los contaminantes.

Los dos tipos de abrasivos más frecuentemente utilizados para limpieza son: metálicos y arena sílica. Algunas consideraciones para elegir el tipo de abrasivo son:

- Tipo de material a ser limpiado
- Forma de la estructura
- Condición original de la superficie
- Naturaleza de los residuos a ser removidos
- Tipo de acabado de la superficie

El sistema utilizado para limpieza con abrasivo en chorro de aire incluye: un compresor, el recipiente a presión, válvula de control del abrasivo, manguera de hule, separadores de humedad y boquillas.

Al llevar a cabo estos trabajos se debe tratar de emplear la técnica adecuada para obtener los mejores resultados:

- Regular la cantidad de abrasivo de modo tal que siempre haya suficiente para una limpieza con rapidez
- Mantener la boquilla lo suficientemente cerca de la superficie a limpiar
- Mover la boquilla en forma uniforme de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha sobre áreas pequeñas hasta dejarla completamente limpia

- Terminado el sopleteo, se debe retirar el polvo de la superficie con aire limpio, usando el mismo equipo, pero sin abrasivo.

Este tipo de método tiene la desventaja de ser muy caro, además el uso de arena resulta peligroso para el personal por su rápida velocidad de desintegración al impacto, produce un exceso de polvo que al ser respirado en forma continua, desencadena una enfermedad llamada silicosis, el equipo de seguridad es de vital importancia, ya que el trabajador está expuesto a muchos riesgos. Además, el enorme desperdicio de abrasivo hace imprescindible el uso de sistemas de recuperación a través de un equipo de vacío. Todos los depósitos, producto de la limpieza deben removerse completamente.

2.1.3 Limpieza mecánica de tuberías

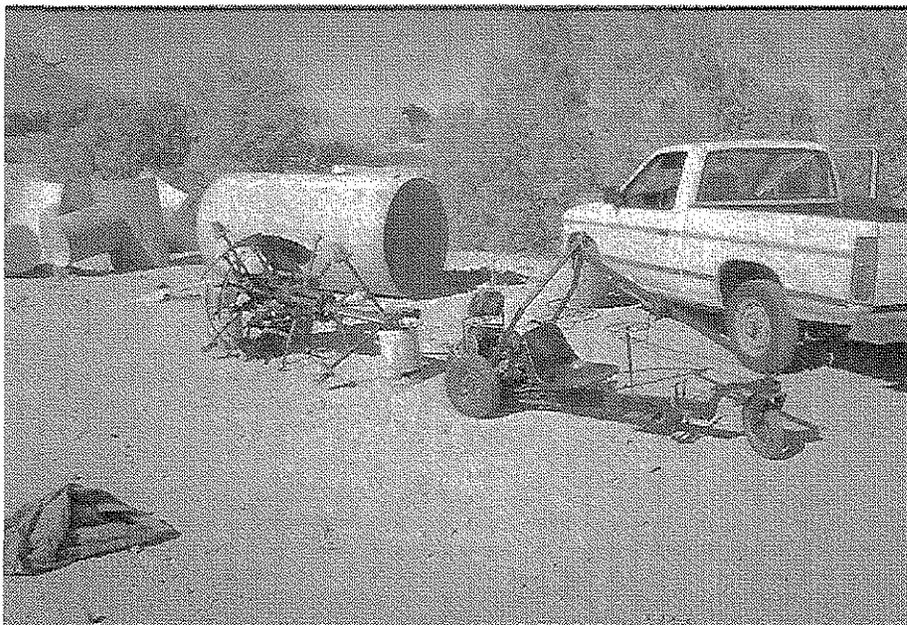
Estos dispositivos son de diseño y trabajo específico. Los factores principales que se toman en cuenta son: diámetro y material de la tubería, el tipo de incrustación, consistencia y dureza, finalmente, el grado de limpieza a desarrollar.

Los dispositivos mecánicos, se introducen en la tubería vacía y proporcionan la limpieza mediante cuchillas o navajas que van adosadas al cuerpo de la máquina. Para ejemplificar mejor el uso del dispositivo se muestran las experiencias en los acueductos Río Colorado Tijuana y Chapala - Guadalajara.

2.1.3.1 Limpiador mecánico retráctil utilizado en el ARCT

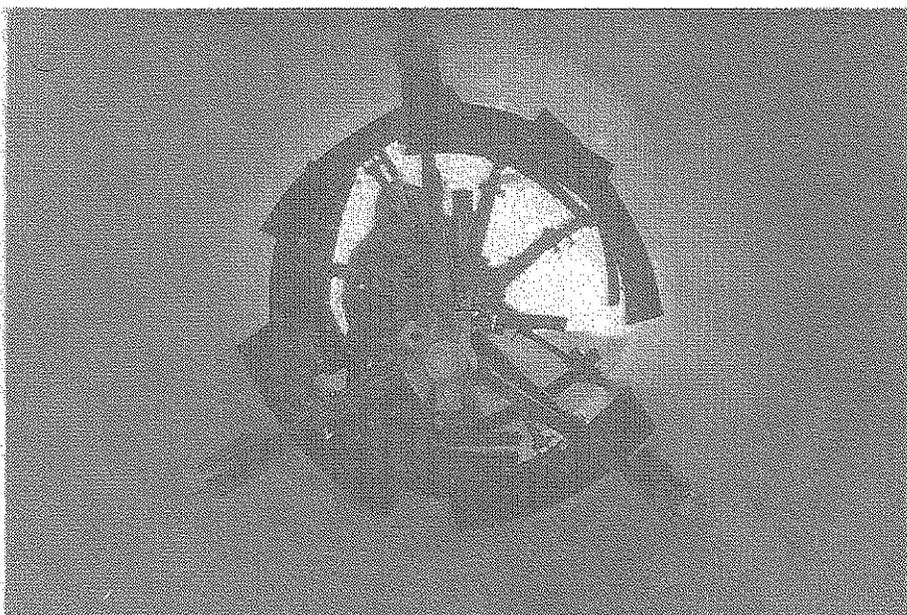
Este tipo de dispositivo fue especialmente construido para limpiar las tuberías de 48" del acueducto Río Colorado – Tijuana. La eficiencia depende del grado de adherencia del material a la pared del tubo, pero siempre alisa la superficie disminuyendo la rugosidad.

Este dispositivo se introduce dentro de la tubería vacía, apoyando sus cuchillas de acero retráctiles sobre la pared de la tubería. Las cuchillas van montadas en el cuerpo del dispositivo que al ser arrastrado por un tractor, permite la limpieza. El tractor utilizado tiene motor eléctrico, con suspensión formada por tres llantas, una delantera y dos traseras. Además tiene una cuarta rueda pequeña, en la parte superior, que se ajusta en el interior del lomo del tubo para proporcionar mayor tracción a las ruedas, evitando que patinen en la superficie mojada en caso de estarlo. Asimismo tiene un malacate que conecta el dispositivo al tractor como se observa en la fotografía 2.8.



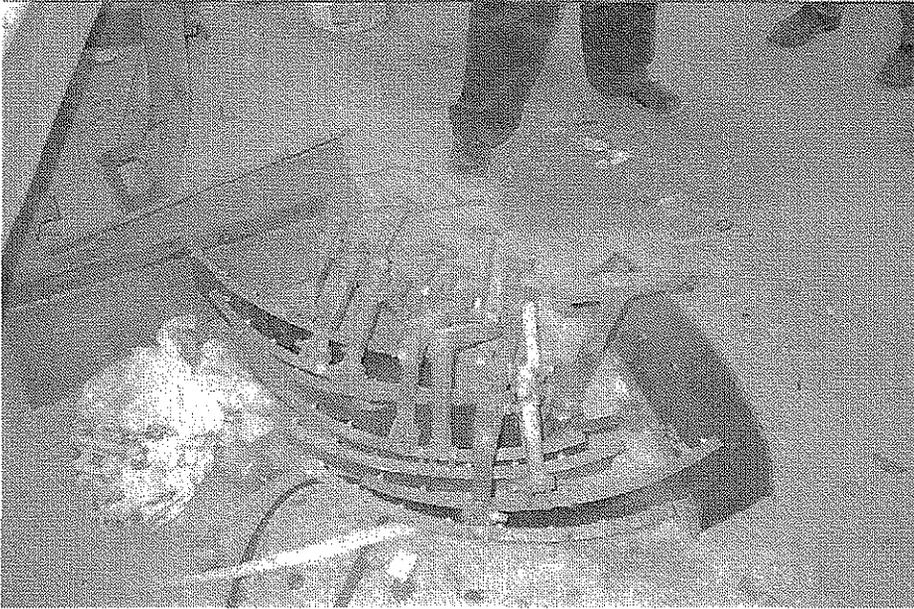
Fotografía 2.8. Dispositivo mecánico retráctil usado en el ARCT

Las cuchillas de acero se ajustan en el interior de la tubería y cuando se encuentra un obstáculo, se retraen permitiendo el paso del dispositivo. Una vez librado el dispositivo, regresa a su ajuste original. En la fotografía 2.9 se observa el ajuste del dispositivo, mientras que en la fotografía 2.10 se observan las láminas de acero del mismo.



Fotografía 2.9. Dispositivo siendo ajustado en la tubería del acueducto

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



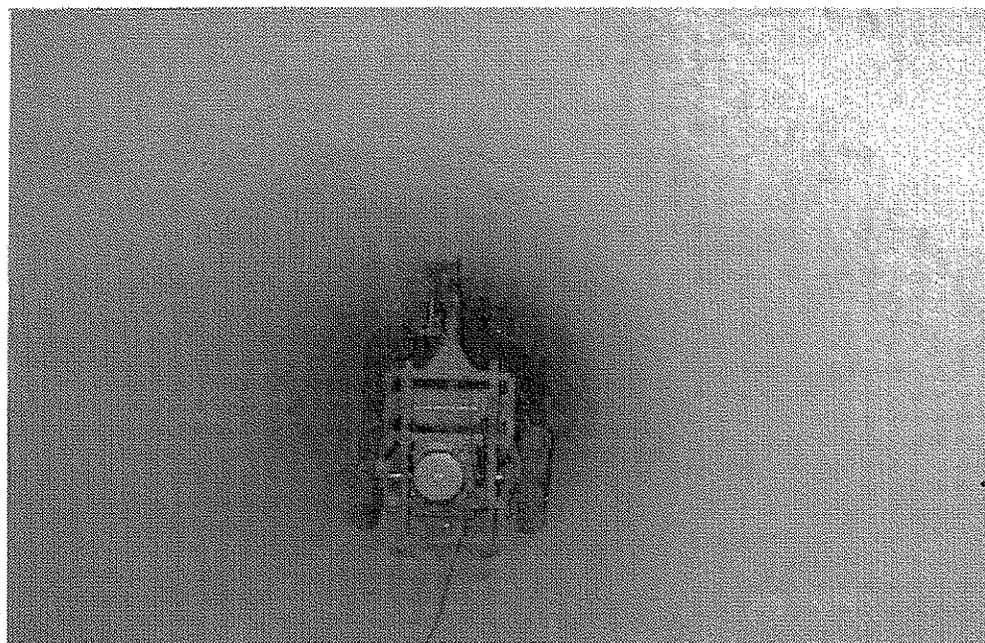
Fotografía 2.10. Cuchillas de acero del dispositivo

La operación del dispositivo necesita por lo menos dos personas, una que maneje el tractor y otra que realice maniobras de ajuste de las láminas de acero. Durante las maniobras se encontraron obstáculos como cordones de soldadura en uniones, codos, cambios bruscos de dirección etc.

La limpieza se realizó por tramos cortos sobre la línea a cada 100 m aproximadamente. La maniobra consistió en anclar fuertemente el tractor dentro de la tubería con ayuda de la cuarta rueda a 100 m de distancia del dispositivo limpiador. En la fotografía 2.11 se observa el tractor antes de realizar labores de limpieza. Después se acciona el malacate localizado en el tractor y el dispositivo avanza limpiando las paredes. Estas maniobras de limpieza pueden ser realizadas estando secas o mojadas las pedes del tubo. El material producto de la limpieza fue desalojado por medio de ventanas a cada 50 m sobre la línea. Cabe señalar que el dispositivo fue capaz de trabajar con espejos de aguas de hasta 30 cm.

El rendimiento máximo del dispositivo para el tipo de incrustación presentado en el acueducto Río Colorado - Tijuana fue de 1000 m diarios, pero se vio afectado por el tipo de adherencia que se encontró en el camino. Por ejemplo en tramos donde el recubrimiento interior estaba corroído el material se adhirió más, bajando los rendimientos hasta 500 m diarios.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 2.11. Introducción del dispositivo antes de realizar la limpieza

2.1.3.2 Limpiador mecánico rotatorio utilizado en el ACHG

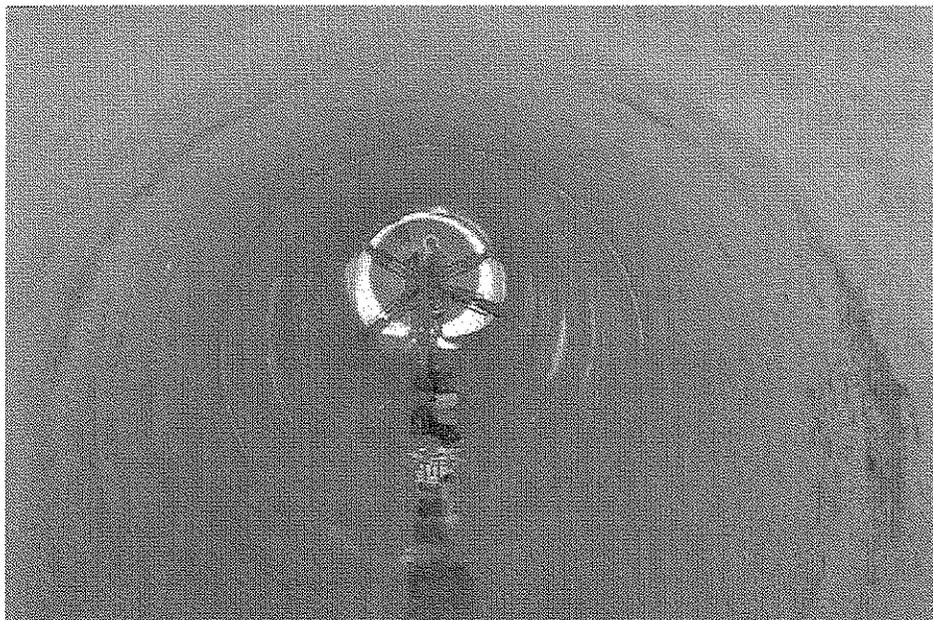
Este dispositivo se diseñó para limpiar las adherencias del acueducto Chapala – Guadalajara en tubería de concreto de 2.1 m de diámetro. Las incrustaciones producían alta resistencia al flujo y reducción importante en la capacidad de conducción.

El equipo de limpieza estaba montado sobre un carro autopropulsado con motores eléctricos, instalado sobre cuatro llantas dos adelante y dos atrás, las cuales se apoyan en la tubería. En el centro del carro se tiene un eje sobre el cual giran tres brazos separados; 120° sobre el mismo plano transversal al tubo. En el extremo de cada brazo tiene un juego de cuchillas que giran con un motor independiente. El dispositivo está equipado con un tablero de control para su operación. En la fotografía 2.12 se aprecia una vista del limpiador mecánico.

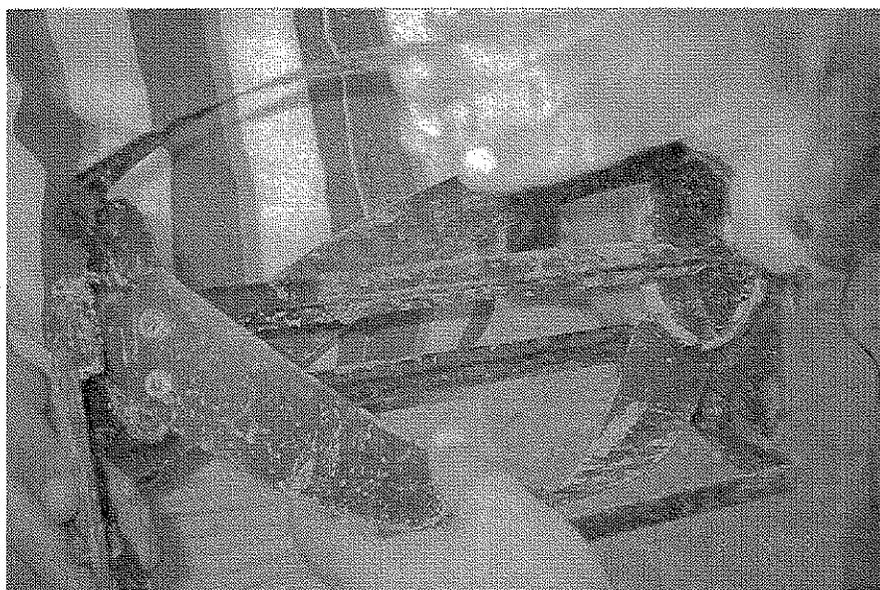
En la operación normal del limpiador, el eje central, donde están montados los tres brazos con sus respectivas cuchillas (fotografía 2.13), gira haciendo pasar las cuchillas sobre la pared interior del tubo desprendiendo la película adherida. El carro tiene un avance controlado y la velocidad de giro del eje central, donde están montados los tres brazos con las cuchillas, puede aumentarse o disminuirse conforme a los requerimientos de limpieza.

A pesar de que el equipo de limpieza retiró adherencias de la superficie interior del tubo, su avance fue lento y dejó franjas helicoidales sin limpiar, como se observa en fotografía 2.14. Además, se observó la ruptura de las cuchillas por fatiga, teniendo que sustituirlas frecuentemente.

El dispositivo pudo retirar aproximadamente un 70% de la incrustación, pero se deberá mejorar la mecánica de limpieza para incrementar su eficiencia.

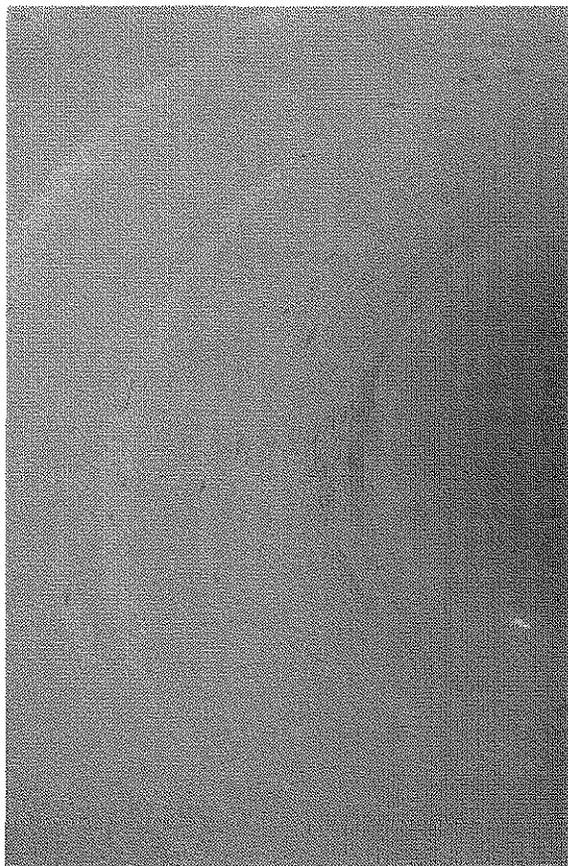


Fotografía 2.12. Vista del limpiador mecánico durante la prueba de limpieza



Fotografía 2.13. Cuchillas del limpiador mecánico

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fotografía 2.14. Limpiador mecánico, se observa una limpieza irregular

A continuación, se muestra la tabla 2.1, sobre ventajas y desventajas de cada uno de estos dispositivos.

TABLA 2.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DISPOSITIVOS DE LIMPIEZA

Tipo de dispositivo	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo Bala - Espuma de poliuretano 	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere el vaciado de la tubería • Permite dar vueltas en codos con curvaturas cortas • Poca probabilidad de perder su sellado en bifurcaciones o piezas especiales por su larga sección longitudinal • Evacua aire • No interrumpe totalmente la operación del sistema • Recomendables para hacer corridas por primera vez, aún en tuberías no diseñadas para este propósito 	<ul style="list-style-type: none"> • Si la superficie longitudinal de contacto no es suficientemente, perderá el sello y tenderá a atorarse • En tamaños grandes se fabrican sobre pedido • Costos importantes • Son importados • Requiere de piezas especiales para lanzamiento y recuperación
<ul style="list-style-type: none"> - Mandriles 	<ul style="list-style-type: none"> • Su diseño permite realizar largas corridas • El mandril es reutilizable, muchas corridas • Puede hacer acciones de limpieza y sellado • Los cepillos y copas son fácilmente reemplazables • Diseñados para limpieza pesada (alto efecto abrasivo) • Evacua aire • No interrumpe totalmente la operación del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> • El costo inicial es grande, además de su mantenimiento (cepillos, copas o discos) • No son muy flexibles incrementando la posibilidad de atorarse dentro de la tubería • Necesita bifurcaciones y piezas especiales para sus corridas • En tamaños grandes estos se fabrican sobre pedido • Para diámetros pequeños no son recomendables • Se atorán en bifurcaciones convencionales o codos, requiere de maniobras complicadas y ayudas para pasar obstáculos como válvulas. • No tienen mucha superficie de contacto (efecto limpiador) • Las maniobras de introducción del mandril son complicadas
<ul style="list-style-type: none"> - Esferas 	<ul style="list-style-type: none"> • Son más económicas que las balas y mandriles • Fácil introducción y manejo • Permite dar vueltas en codos con radios cortos • Evacua aire 	<ul style="list-style-type: none"> • Se atorán al perder su sellado por su corta sección longitudinal en bifurcaciones o piezas especiales que no fueron diseñadas para ese propósito
<ul style="list-style-type: none"> • Chorro a presión 	<ul style="list-style-type: none"> • Es el mejor método para preparar superficies que van a ser recubiertas nuevamente o simplemente para un grado de limpieza requerido • La velocidad de los trabajos es mayor con respecto a los métodos mecánicos y manuales 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso • Peligroso para el trabajador • Suspense la operación del sistema por lapsos prolongados • Requiere el vaciado de la tubería y libranzas y tiempos suficientes para la ejecución de la limpieza
<ul style="list-style-type: none"> • Mecánicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Es económico con respecto a los métodos tipo bala y chorro a presión • Si el tiempo de limpieza no es restricción, el método es muy recomendable 	<ul style="list-style-type: none"> • Suspense la operación del sistema y requiere el vaciado de línea • La limpieza es tardada (se necesitan libranzas grandes) • Limpieza perimetral no homogénea • Diseño y construcción sólo bajo ciertas características de adherencia, dureza, diámetro y tipo de tubería. • Falta mejorar la eficiencia del dispositivo mecánico

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Las balas de espuma de poliuretano, aunque pueden llegar a atorarse, son las más recomendadas por expertos para realizar corridas de limpieza por primera vez; su flexibilidad y larga superficie longitudinal las hacen el dispositivo óptimo para esta labor. Los dispositivos tipo mandril y esfera necesitan de líneas de conducción que cumplan con requerimientos especiales, la poca flexibilidad del mandril y la corta superficie longitudinal de la esfera incrementan la posibilidad de atorarse.

Por otro lado, el chorro a presión desarrolla una buena limpieza, más los tiempos de ejecución, costos y la necesidad de parar el sistema no lo hace atractivo. Asimismo, es importante decir que este método es el mejor para llevar a cabo trabajos de limpieza a metal blanco para la aplicación de nuevos recubrimientos.

El limpiador mecánico tiene la ventaja de ser muy barato con respecto a los anteriores, pero tiene limitaciones de tiempo de ejecución y paro de la operación del sistema, además de requerir mejoras en la mecánica de limpieza.

Finalmente, tomando en cuenta que los sistemas de abastecimiento carecen de programas de limpieza y conservación y que además no disponen de tiempo suficiente para llevar a cabo limpieza sin sacar de funcionamiento al sistema, los dispositivos tipo bala de poliuretano son una buena alternativa para esta labor. Además se tienen dos buenas experiencias con este dispositivo en los acueductos Río Colorado-Tijuana y Chapala-Guadalajara, con resultados exitosos, como se muestra en los siguientes capítulos.

Capítulo 3. Condiciones para limpieza con balas y su aplicación en dos acueductos

3.1 Conceptos básicos para el uso adecuado de dispositivos tipo bala

En general, los sistemas de conducción que ahora están en operación no fueron diseñados para limpiar sus tuberías con dispositivos tipo bala, por lo que, al utilizar esos dispositivos existirá la posibilidad de que se atoren o se rompan en alguna sección. A continuación se presenta una serie de recomendaciones que servirán como guía para evitar problemas al correr dispositivos de limpieza (Girard Industries, sitio web. Alcerreca H., 1998. Fisher H., 1998)

¿Cuándo se debe correr una bala?

- Cuando sea necesario conservar o restituir la capacidad de conducción en tuberías con problemas de adherencias. Para conocer la capacidad de conducción es necesario llevar a cabo mediciones de presión y gasto sobre las líneas de conducción. Además, debe confirmarse la presencia de incrustaciones por medio de inspecciones visuales al interior de los tubos.
- Como medio de mitigación de la corrosión interna, estando ligado directamente con un buen programa de limpieza. Además de requerir inspecciones directas o mediciones indirectas al tubo (balas instrumentadas), para saber su estado general.

Al proyectar la instalación de una tubería es conveniente establecer aspectos como los siguientes:

- Indicar el propósito de un programa de corridas de bala (limpiar, evacuar aire, detectar obstrucciones, evitar corrosión, etc).
- Seleccionar el dispositivo a emplear.
- Evitar desde el procedimiento constructivo cualquier obstrucción o arreglo hidráulico o mecánico que dañe al dispositivo o impida su paso.
- La forma de introducir y de recibir el dispositivo.
- Evitar el uso de cambios de dirección con radios de curvatura pequeños.

Para correr balas en tuberías sin dispositivos de lanzamiento y rescate, se recomienda:

- Realizar una inspección, de ser posible, en toda la longitud de la tubería o disponer de una bala de espuma de poliuretano de baja densidad y sin cubierta para detectar posibles obstrucciones (balas de reconocimiento).
- Si existen muchos cambios de dirección o codos en la tubería, o presenta cambios de diámetro, se deberán emplear balas flexibles (espuma).
- Como regla general, si el radio de curvatura de un codo es menor que 3D, usar balas flexibles.
- Analizar el paso de la bala en cada uno de los posibles obstáculos.

- Sustituir válvulas (mariposa) que interfieran con el paso del dispositivo por compuertas o globos, según se requiera, y retirar cualquier obstáculo que dañe o atore el dispositivo.
- Se definen como obstáculos en tuberías a válvulas, codos o bifurcaciones; como regla general, el espaciamiento mínimo entre dos obstáculos en ruta será de 3 diámetros de la tubería.
- En ramales y piezas especiales usar barras guía para evitar que se atore el dispositivo o que reconozca por una trayectoria no deseada.
- En la tabla siguiente, se muestran algunas reglas de la práctica para proponer los radios de curvatura mínimos en codos según el diámetro de la tubería, ver tabla 3.1.

Tubería	Radio del codo
(in)	R (diámetro)
2-5	10d
6-13	5d
14- ∞	3d



Tabla 3.1

- El diseño de esclusas lanzadoras debe ser multifuncional (diferentes tipos de balas y diámetros).
- El tamaño de las esclusas debe ser 1.5 veces más larga que el dispositivo de limpieza que se va emplear y, además, tendrá una reducción del diámetro en el fondo que servirá para efectuar el sello del dispositivo con la tubería.
- Las balas de poliuretano podrán trabajar en tuberías con reducciones de diámetro hasta de un 20 % con respecto al diámetro original.
- La velocidad de avance de las balas es, aproximadamente, de un 90% de la velocidad media del flujo que la impulsa, la cual deberá permanecer constante. Si la velocidad es grande la eficiencia de la limpieza podrá ser baja, además, si la bala llegara a chocar con un obstáculo, podría dañarse significativamente o causar fuertes daños a la estructura con la que chocó.
- Para balas de espuma de poliuretano y esferas, el espaciamiento entre esclusas no deberá ser mayor que 40 km. Para mandriles no deberá ser mayor que 140 km

Selección de balas de limpieza

Los puntos más importantes en la selección de las balas de limpieza son:

- Establecer metas y objetivos de un programa de corridas
- Identificar el tipo de incrustación y sus características, como dureza y espesor, además de la longitud de tubería
- Compatibilidad entre el material de la bala y el fluido de la tubería

- Conocer las líneas de conducción (diseño y trazo), de ser posible realizar una visita de reconocimiento al interior de la tubería
- Factores económicos, de calidad y tiempo de entrega
- Manejo, transporte y colocación de la bala
- Otro factor importante es la experiencia para esta labor

¿Cómo realizar corridas de balas?

El procedimiento para limpieza con balas debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Un programa de pasos de limpieza. Primero debe utilizarse una bala flexible, sin cubierta, capaz de reducir su área transversal en un tercio, a fin de evitar posibles obstrucciones conforme se va abriendo paso por la tubería. Las siguientes corridas deben incluir balas más rígidas y de mayor diámetro. Es importante que el ingeniero valore el progreso alcanzado a través de mediciones de carga y gasto después de cada corrida, para ajustar el programa de trabajo. El objetivo es retirar el sedimento que se ha acumulado sin dañar las paredes de la tubería.
- La función de una bala de limpieza es doble, primero raspar los depósitos de la pared del tubo y, segundo, sacarlos del interior de la tubería.
- En los casos donde el depósito sea demasiado grueso o duro, se utilizará el método progresivo para poder eliminar las incrustaciones en corridas sucesivas, incrementado el diámetro de la bala. Esto además permitirá retirar todo, o casi todo, el material desprendido por la limpieza.
- En caso de que una bala llegara a atorarse, incrementar la presión del flujo tanto como lo permita la resistencia de la tubería, con una maniobra sumamente lenta para evitar cualquier efecto transitorio.
- Establecer un límite para el número de corridas, reduciendo así la posibilidad de daño a la tubería si éste pudiera darse.
- El último paso de la limpieza sugiere el lanzamiento de una bala cilíndrica, sin punta, para retirar cualquier resto del sedimento suelto acumulado en la tubería.
- Después de cada corrida mantener el flujo a toda su capacidad para limpiar los restos de sedimento y para prevenir que las partículas más pesadas se depositen en la tubería.
- Establecer un programa de disposición del material desprendido en la tubería producto de la limpieza.
- Las operaciones para retirar las balas de la tubería deben estar bien definidas, y se debe disponer de vehículos adecuados para izar y mover las balas, como grúas y montacargas. Debido al peso y consistencia de las balas ya usadas, jalarlas y levantarlas es una operación complicada.

Para que un programa de limpieza tenga éxito deberá realizarse con las herramientas y procedimientos adecuados, y reconocer que cada línea de conducción es única, con características muy particulares; los puntos anteriores deben considerarse únicamente como una guía.

A continuación se presentan los puntos relevantes de las corridas de limpieza en las líneas de conducción de los acueductos Río Colorado - Tijuana y Chapala - Guadalajara.

3.2 Corridas del dispositivo tipo bala en el ARCT

El 23 de junio de 1997 se realizó la primera corrida con dispositivo tipo bala en el ARCT. El tramo seleccionado para limpieza fue la línea paralela número dos del tramo torre de oscilación uno (TO1) al tanque de sumergencia de la planta dos (TS2), dado que era un tramo con pérdidas por fricción muy altas y crítico para la capacidad de conducción de todo el acueducto. Este tramo tiene una longitud aproximada de 18,700 m con un diámetro de 48 pulgadas, en acero. En la figura 3.1, se muestra un esquema del acueducto en su tramo a bombeo.

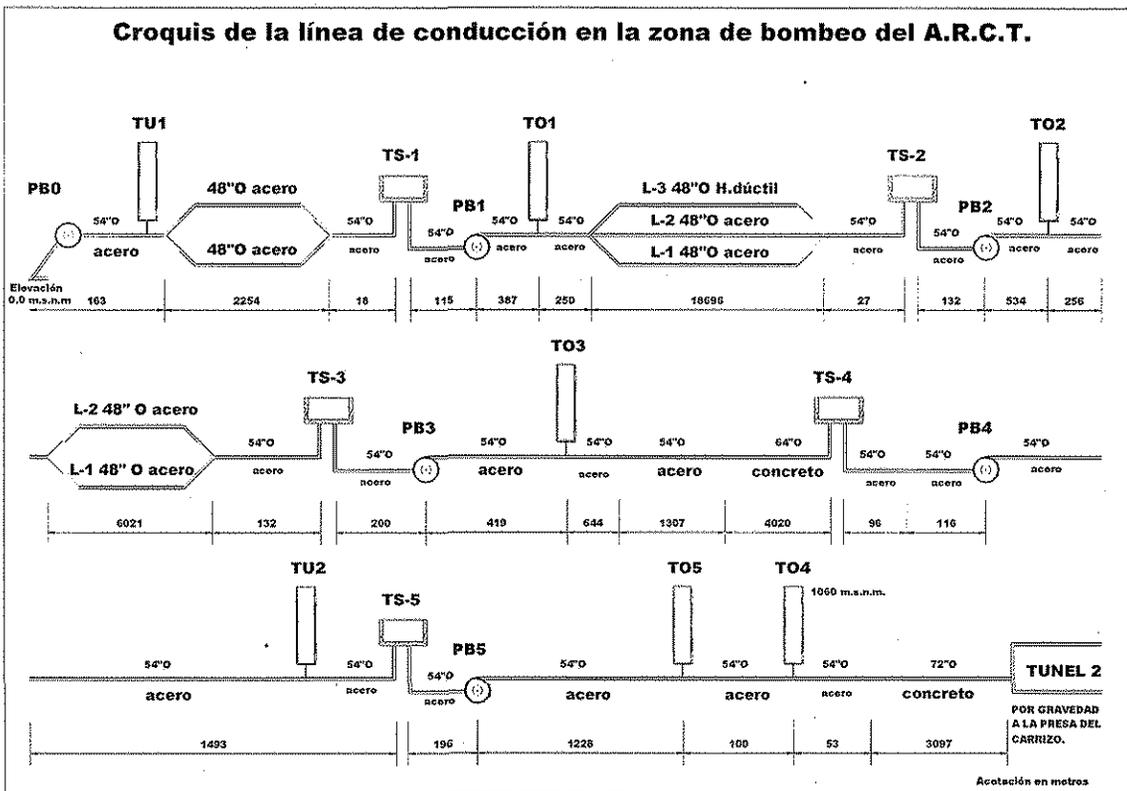
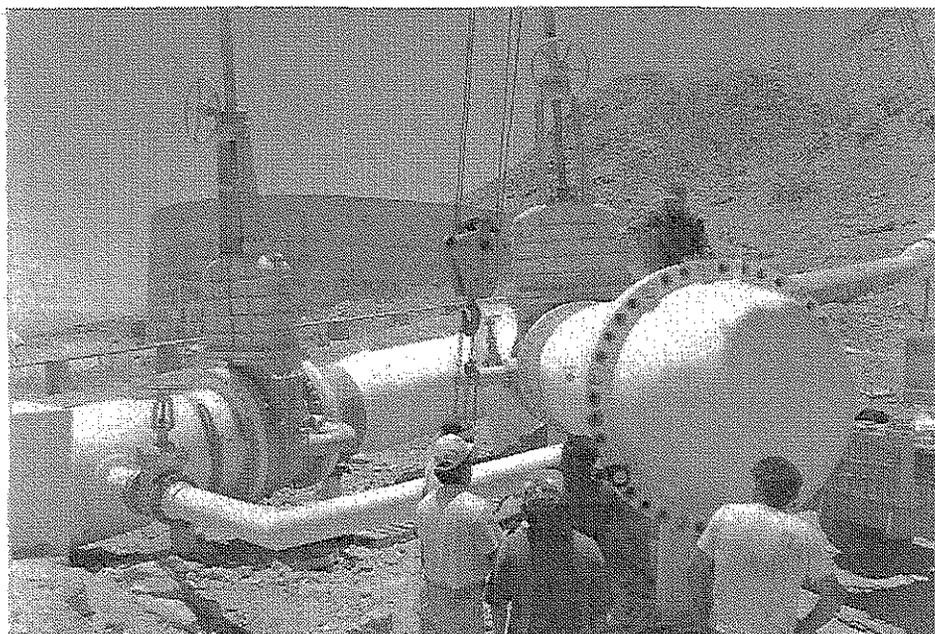


Figura 3.1. Esquema del tramo a bombeo del ARCT

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Durante las maniobras de limpieza, se corrieron dos balas de baja densidad, las cuales fueron introducidas al sistema por medio de una esclusa tipo "Y" (ver fotografía 3.1), ubicada en la rampa de ascenso a la TO1. La esclusa cuenta con una cámara para alojar la bala y una tapa semiesférica con un vástago interior para empujarla hasta el fondo de la cámara y evitar que pateé a la hora de su lanzamiento.



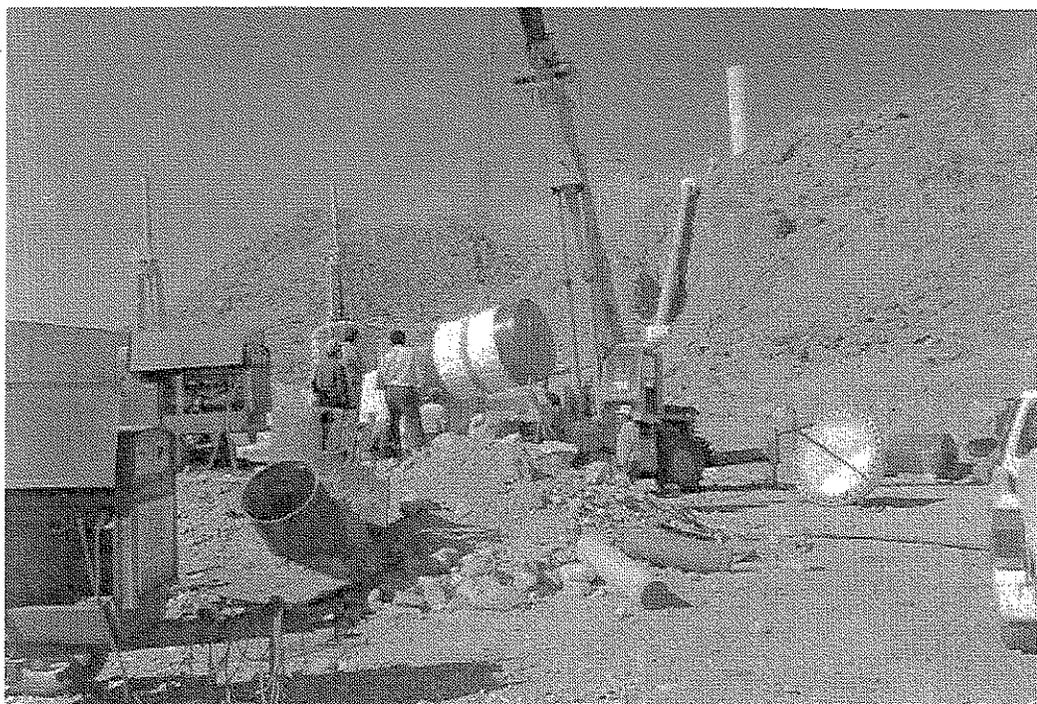
Fotografía 3.1. Aspecto de esclusa lanzadora en el ascenso ala TO1 del ARCT.

Por otra parte, la esclusa está provista de dos válvulas de compuerta, la primera montada sobre la línea principal y la segunda sobre el final de la cámara receptora. Tiene también una conexión, con válvula de seccionamiento para presurizar la cámara y lograr el lanzamiento.

Durante la maniobra de lanzamiento, se mantuvo un solo equipo de bombeo en la PB1 y las maniobras se desarrollaron de la forma siguiente:

- a) Al inicio estaban cerradas las válvulas de la cámara y del by-pass, sólo se mantenía abierta la válvula de la línea principal
- b) Se removió la tapa semiesférica de la esclusa y se procedió a insertar la bala con ayuda de una grúa (ver fotografía 3.2)
- c) Una vez insertada la bala, se colocó la tapa y se empezó a abrir el by-pass con el objetivo de presurizar la cámara. Como estructura complementaria, se tuvo una válvula expulsora de aire en la parte superior para evacuar el aire en la cámara.
- d) Finalmente, se abrió la válvula de compuerta de la esclusa y se cerró gradualmente la válvula de compuerta de la línea principal hasta que se creó una diferencia de presión suficiente para hacer salir a la bala de la esclusa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

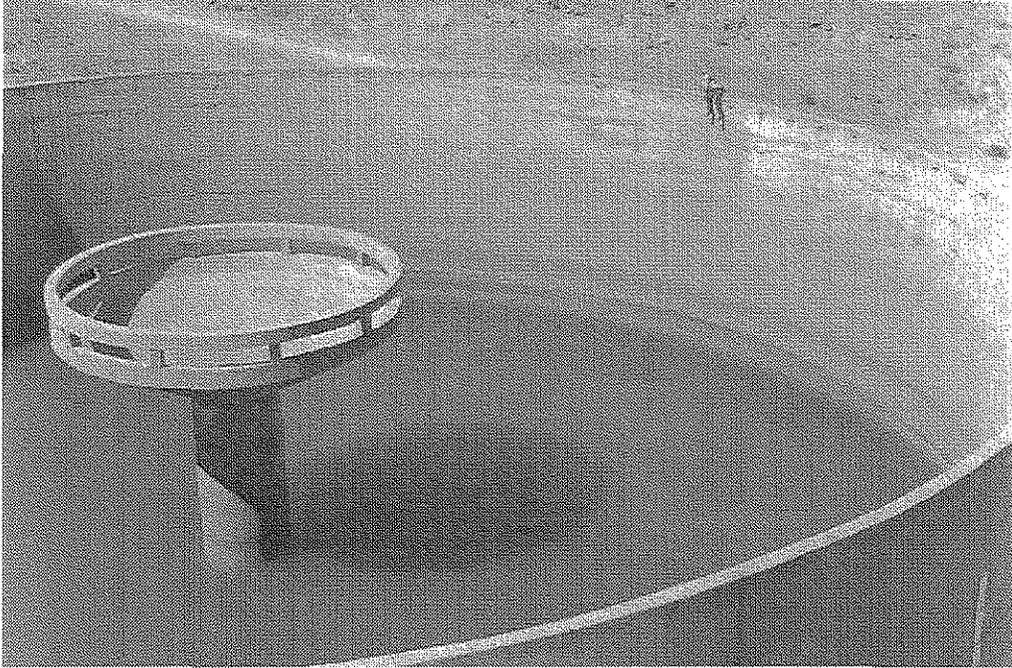


Fotografía 3.2. Maniobra de colocación de la bala en la esclusa con ayuda de la grúa

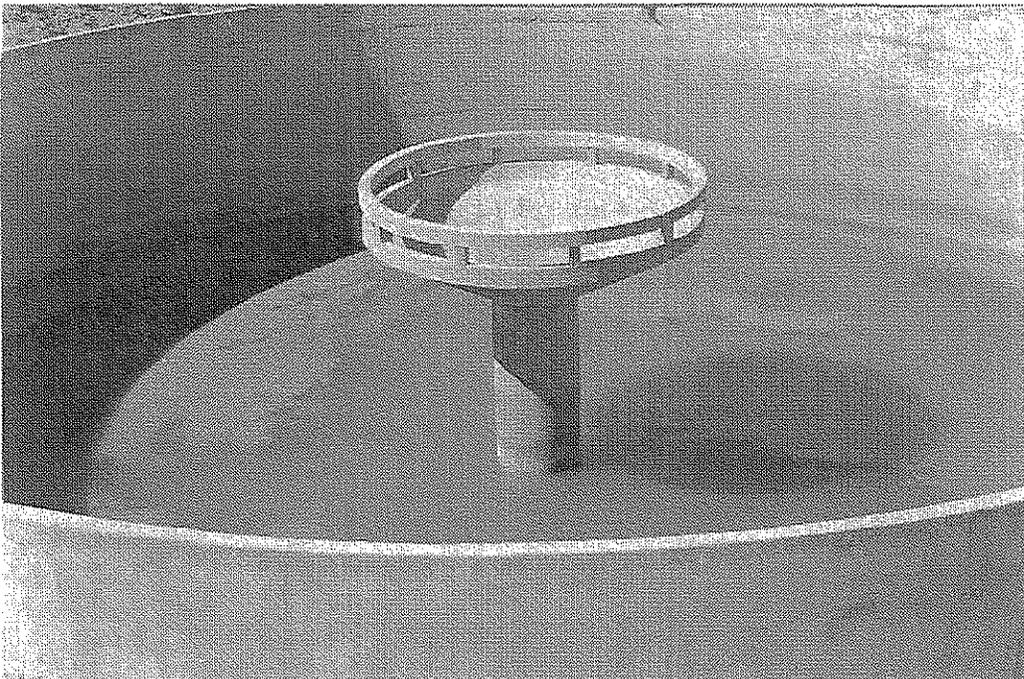
El recorrido de cada bala hasta el TS2 duró aproximadamente 5 horas, con una velocidad cercana a 1 m/s. Para detectar la posición de las balas en su recorrido se insertó un transmisor de radio en cada uno.

En la siguiente secuencia de fotografías se muestra la llegada de la segunda bala al TS2. Se observa cómo se incrementa la turbiedad del agua en el interior del tanque, producto de la limpieza cuando más se acerca la bala al tanque.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

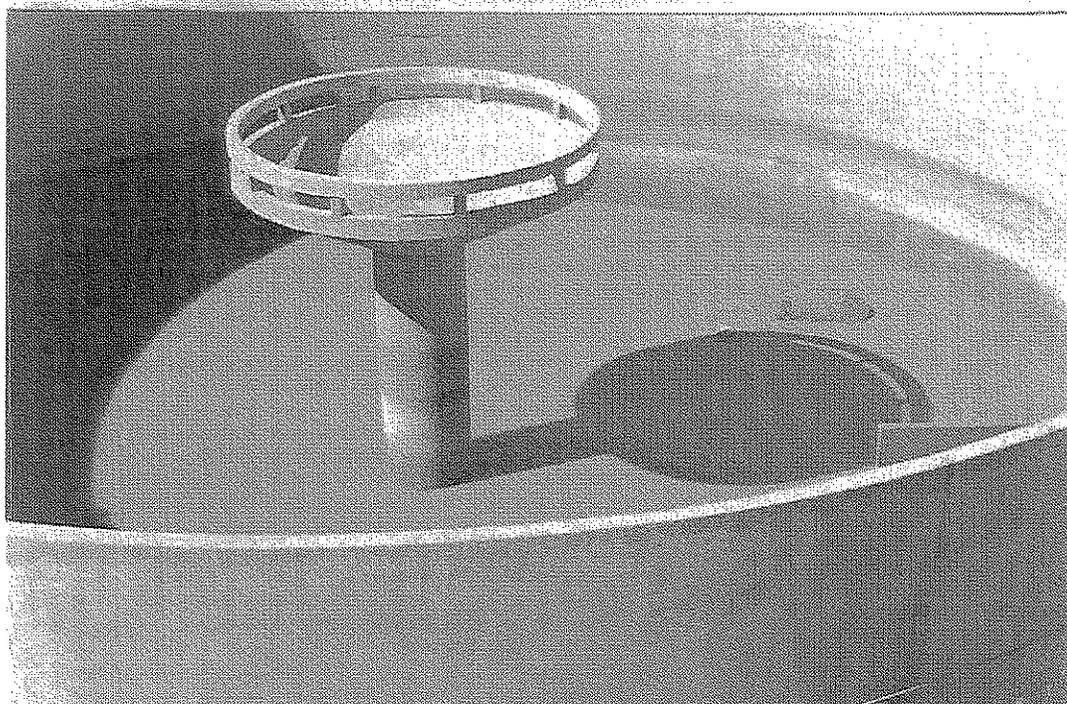


Fotografía 3.3-a. En espera de la llegada del la bala TS2 (agua clara)



Fotografía 3.3-b. Manchas de material en el interior del TS2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 3.3-c. Llegada de la bala al TS2, el agua esta completamente turbia.

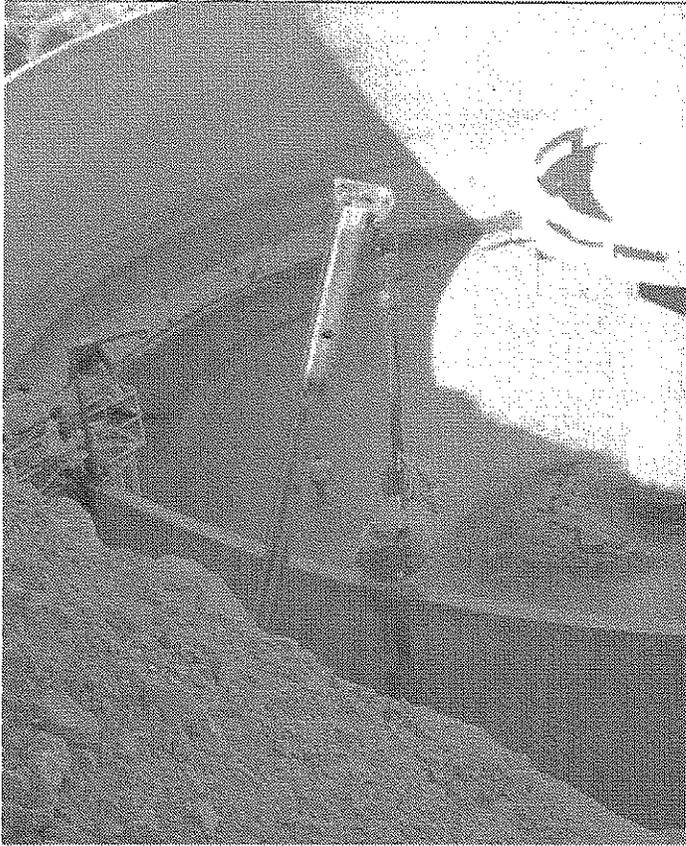
Una vez que llegó la segunda bala al TS2, se iniciaron las maniobras para sacarla con ayuda de una grúa. En la fotografía 3.4 se observa la grúa extrayendo parte de una de las balas. Las balas llegaron en muy mal estado por lo que tuvieron que ser extraídas por partes con la ayuda de la grúa.

Adicionalmente, se intentó mandar otra bala con mayor densidad y menor longitud. En principio la bala quedó atorada en la cámara de lanzamiento, por lo que, se incrementó la presión y velocidad del flujo mediante el arranque de más equipos de bombeo en PB1. La bala salió de la cámara, pero reconoció hacia la TO1, debido al fenómeno transitorio generado por el arranque de los equipos.

Al término de la limpieza se realizaron mediciones en el tramo con la operación de dos equipos de bombeo en PB1, manteniendo abiertas las líneas en paralelo 2 y 3. Asimismo, se aforó el gasto de la línea dos en la llegada al TS2 con tubo Pitot.

El gasto aforado después de la limpieza fue de $1.36 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representó un incremento considerable dado que antes era de $1.03 \text{ m}^3/\text{s}$ por esta línea. En el capítulo cuatro se detallará la recuperación de la capacidad de conducción, además de presentar datos sobre factor de fricción " f " en la fórmula de Darcy – Weisbach.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fotografía 3.4. Maniobras para sacar la bala del TS2

3.2.1 Análisis del dispositivo tipo bala en el ARCT

Es importante señalar que la corrida de la bala en el acueducto fue la primera experiencia a nivel nacional que se tuvo para realizar limpieza interior en tuberías de grandes acueductos. El propósito, además de eliminar los depósitos incrustados en la tubería, era probar esta nueva tecnología en sistemas para abastecimiento de agua, ya que esta técnica, a pesar de usarse ampliamente en los Estados Unidos, en México sólo se había utilizado en la industria petrolera (PEMEX).

En general, la prueba se desarrolló de manera aceptable dada las condiciones como fue realizada (falta de experiencia en el uso del dispositivo). A continuación, se mencionarán aquellos puntos relevantes que tendrán como objetivo reducir problemas en procedimientos y maniobras de ejecución antes y durante el lanzamiento de la bala.

1. El proveedor de las balas y el contratista responsable de las corridas no fueron los mismos. El contratista aceptó realizar los trabajos sin comprometerse a los resultados ya que ellos no habían elegido el tipo de bala a utilizar. Este tipo de acciones deben ser evitadas ya que se pierde responsabilidad en el proceso, limitando los resultados.

2. Durante lanzamientos de las balas, algunas de ellas eran más cortas, lo que ocasionó que se atorarán en la cámara, pues al momento de ser lanzada, su longitud no alcanzó a establecer el sello suficiente en la sección cámara – línea de conducción, para así poder avanzar. Una de las recomendaciones importantes de este capítulo es que las cámaras o esclusas lanzadoras deben tener capacidad multifuncional para poder efectuar lanzamientos de balas de diferentes tipos, longitudes y diámetros, o bien revisar cuidadosamente las especificaciones de las cámaras, ya que cada una especifica los tipos de bala que puede utilizar.
3. El incremento de gasto para desatorar la bala del dispositivo de lanzamiento produjo flujo hacia el interior del tanque de oscilación, por lo que la bala reconoció hacia el interior del tanque. Para evitar este tipo de problemas es necesario comparar las posibilidades de colocar el dispositivo de lanzamiento aguas abajo de tanques de oscilación con la de obstaculizar parcialmente las derivaciones o bifurcaciones hacia tanques o torres, mediante la instalación de barras de acero soldadas en ellas.
4. Después de una corrida, es importante medir el beneficio obtenido mediante la instrumentación de presión y gasto en la línea y, con ello, determinar la recuperación de capacidad de conducción. Durante la limpieza con estos dispositivos en el acueducto se midió la presión y gasto en la tubería antes de la limpieza y hasta el final de todas las corridas, pero, desafortunadamente, no entre corridas lo cual es recomendable.
5. Las balas llegaron al final de su recorrido muy dañadas, por ejemplo, una se partió a la mitad, lo que sugiere que los trabajos de inspección al interior de la tubería no se llevaron a cabo adecuadamente, pues es difícil pensar que se dañaron por efecto de limpieza (la incrustación era un limo arcilloso sumamente blando).
6. Los desechos, producto de la limpieza, fueron desalojados por un drenaje de fondo en el tanque de sumergencia hacia el desierto, esto fue posible ya que no hubo afectaciones que lo impidieran. En lugares donde no se disponga de esta posibilidad, el problema de eliminación de desechos se convierte en una tarea muy importante, pues son varios cientos de metros cúbicos de material producto de la limpieza.

3.3 Corridas del dispositivo tipo bala en el ACHG

Los trabajos de limpieza de la tubería en el acueducto Chapala – Guadalajara, se realizaron en el tramo del tanque de cambio de régimen (TCR) a la caja de enlace (CE), permitiendo limpiar 20.4 km, de los cuales 16.2 km son del tramo entre TCR y el tanque cerro del cuatro (TE) y 4.2 km son del acueducto Cerro del Cuatro que comienza en el TE y termina en la CE (ver figura 3.2). La tubería es de concreto de 2.1 m de diámetro para ambos tramos.

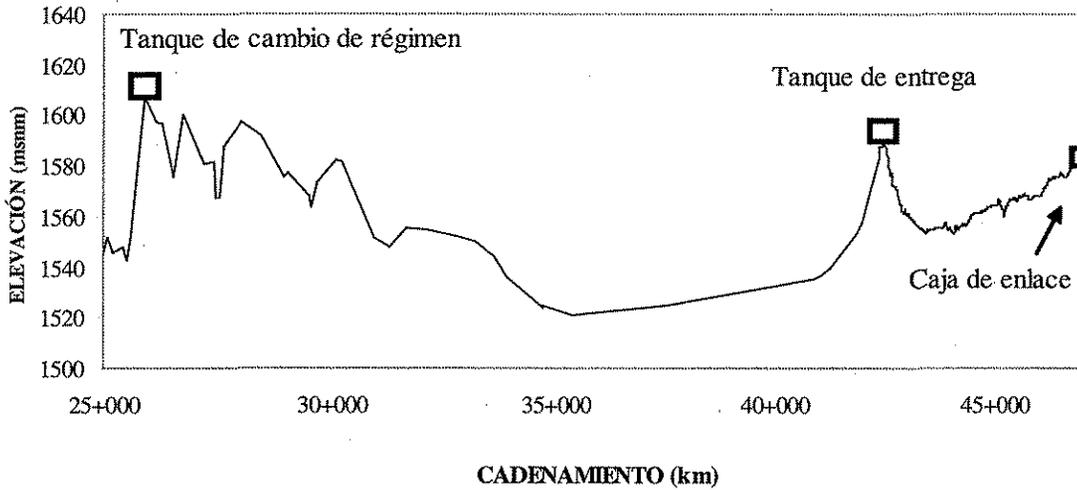


Figura 3.2. Perfil del TCR a la CE.

Es importante mencionar que la unión de los dos tramos se hace en el tanque del Cerro del Cuatro, mediante un by-pass, que permite la operación continua del sistema sin que el agua pase por el tanque de entrega (ver figura 3.3).

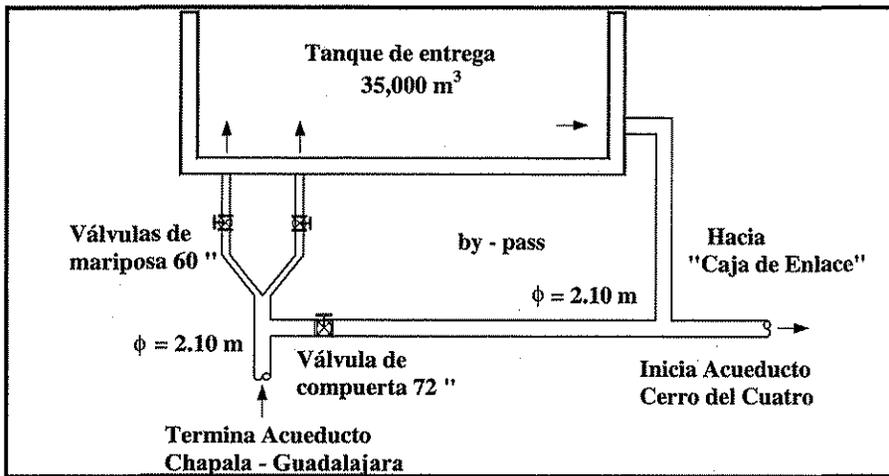
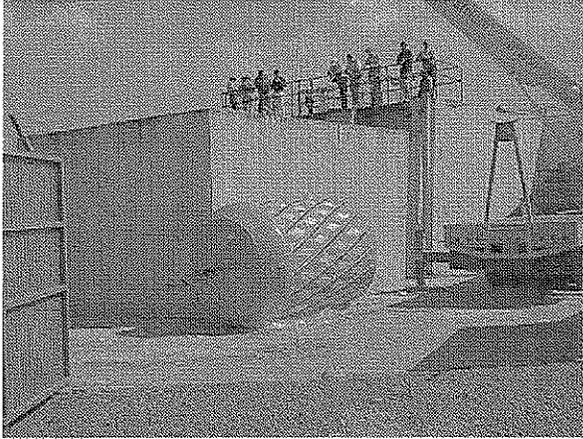


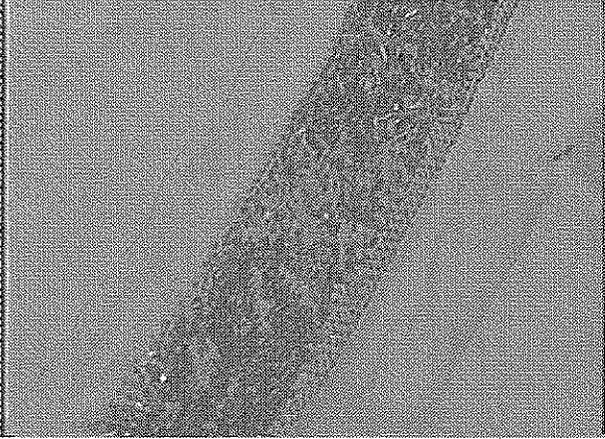
Figura 3.3. Esquema del by-pass en el tanque de entrega

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En estos tramos se realizaron 4 corridas con dispositivos tipo bala. Las primeras dos corridas se realizaron los días 18 y 20 de noviembre de 2000, y las dos últimas los días 13 y 16 de febrero de 2001. Las balas utilizadas fueron de espuma de poliuretano en diferentes densidades a las que, por la dureza de las incrustaciones (dureza alta) se les adosaron cepillos de alambre para aumentar sus efectos abrasivos, como se observa en las fotografías 3.5 y 3.6.



Fotografía 3.5. Vista general de la bala



Fotografía 3.6. Cepillos de alambre adosados a la bala

Las balas se ingresaron a través del TCR, estructura abierta que tiene 34 m de largo por 5 m de ancho (figura 3.4), formado por dos secciones. La primera presenta un par de compuertas deslizantes de sección cuadrada (2.0 m x 2.0 m) que permiten regular el flujo entre las dos secciones del tanque. La segunda se ubica aguas arriba del tanque, teniendo un vertedor lateral que, mediante el cierre de las compuertas, permite derivar gasto hacia el canal “El Guayabo”.

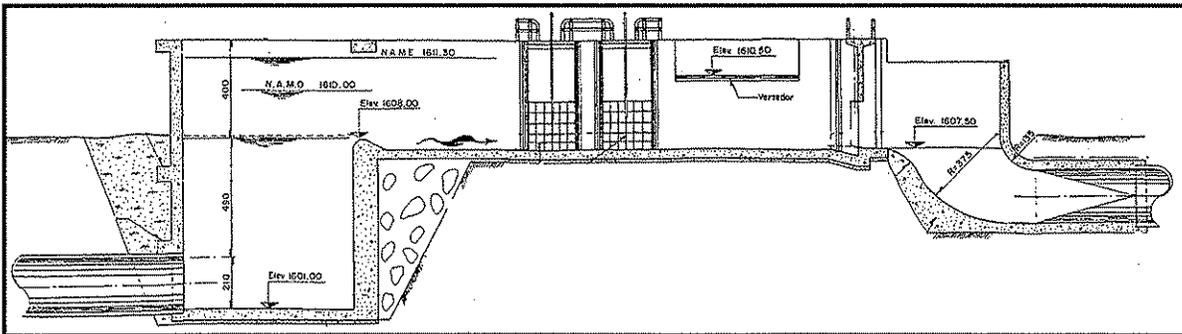
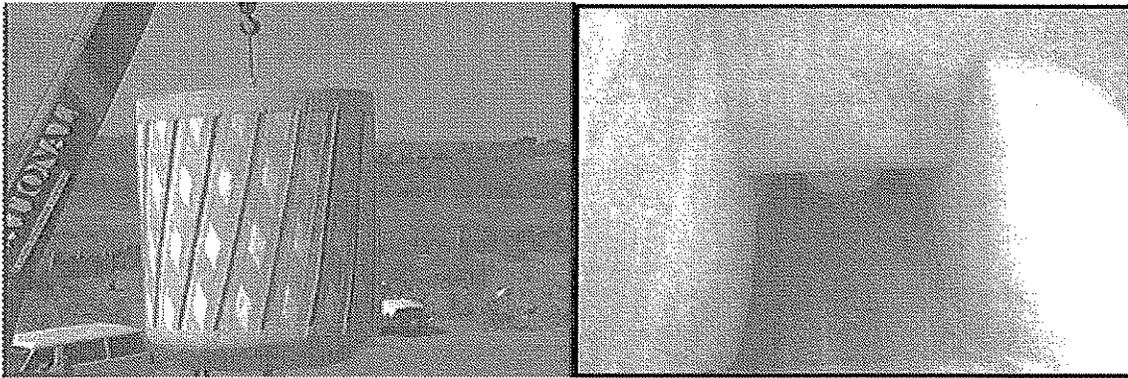


Figura 3.4. Arreglo del tanque de cambio de régimen.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografía 3.7. Izaje de la bala sobre el TCR Fotografía 3.8. Introducción de la bala en el TCR

Las balas fueron izadas por medio de una grúa y presentadas al interior de la caja con ayuda de un teclé (palanca mecánica), como se aprecia en las fotografías 3.7 y 3.8. Durante estas maniobras se sacó de funcionamiento el tramo a limpiar y se tuvo que realizar el vaciado de varios metros de la tubería.

Por otra parte, el bombeo del acueducto nunca se suspendió gracias a las compuertas del TCR que permiten la derivación de agua hacia el canal El Guayabo, mientras se realizaban las maniobras de inserción de la bala.

Las maniobras de lanzamiento se desarrollaron de la manera siguiente:

- a) Una vez introducida la bala a través de la caja, se procedió a desviar el gasto del canal “El Guayabo” hacia el interior de la caja para llenar de nuevo la tubería, manteniendo cerrada la válvula de compuerta del by-pass del tanque de entrega.
- b) Llena la tubería y con el TCR a punto de derramar, se procedió a abrir la válvula cerrada del tanque de entrega de manera que pudiera iniciar la corrida del dispositivo

Cuando el dispositivo comenzó a avanzar, se monitoreó en todo su recorrido para conocer su ubicación con ayuda del transmisor de radio colocado en el interior de la bala. Asimismo, se midió la velocidad real de la bala.

La velocidad del dispositivo de limpieza se reguló mediante el gasto en la tubería, gracias a las compuertas del TCR y la válvula de compuerta de 72 in del by-pass. En la tabla 3.2, se muestra un resumen de las velocidades mínimas, medias y máximas para cada corrida del dispositivo, además de la duración de ellas.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

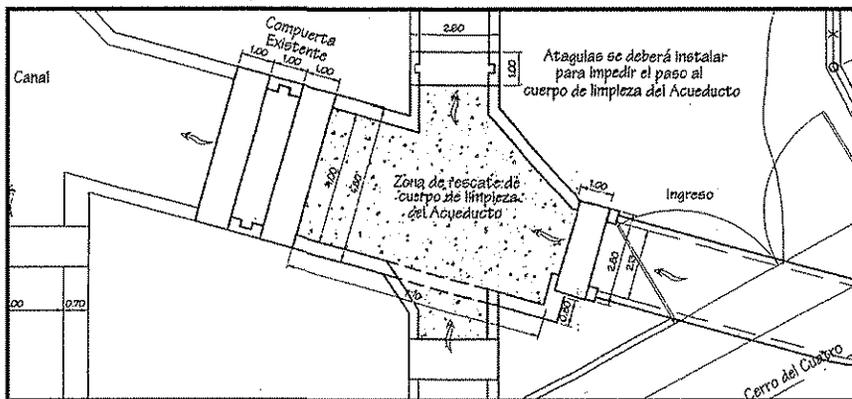
Corrida (#)	Fecha (dd/mm/aa)	Duración total (horas)	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)
1	18/11/00	6.47	0.906	1.48	0.65
2	20/11/00	9.14	0.641	1.60	0*
3	13/02/01	6.46	0.907	2.00	0.58
4	16/02/01	6.61	0.887	1.25	0.37

* Debido a una interrupción involuntaria del flujo, el dispositivo se detuvo y volvió a arrancar a unos 5 kilómetros del tanque de cambio de régimen cuando habían transcurrido 2.45 hrs

Tabla 3.2. Datos de las corridas realizadas

La velocidad de avance de la bala es controlada para evitar que se dañe con las bifurcaciones o cambios de dirección repentinos de la tubería y por la logística de limpieza (tiempos de monitoreo, eficiencia de limpieza, maniobras de abertura de desfogues, recepción de lodos en la planta potabilizadora, etc.)

La recepción de la bala fue en la caja de enlace, siendo ésta una estructura abierta de aproximadamente 5 metros de ancho por 8 de largo, como se muestra en la figura 3.5.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.5. Esquema de la caja de enlace

Antes y durante la llegada del dispositivo a la caja, se tomaron muestras del agua que iba saliendo de la caja, con el fin de conocer más sobre el material desincrustado.

En la siguiente secuencia de fotografías se presenta la salida del dispositivo en la caja de enlace. Se observa el estado general de las balas, que en todos los casos, llegaron muy dañadas y no fue posible realizar más de una corrida con cada una de ellas.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Fotografías 3.9. Secuencia de la bala a la salida en la caja de enlace

En la secuencia de fotografías anterior se observa el agua totalmente turbia, además de verse los daños en el dispositivo tanto en la parte delantera como trasera. El desgaste en la parte trasera fue en todas las corridas significativo, pudo ser ocasionado por la deformación producida por el empuje del agua. Además, el cambio de dirección de 90° en el by-pass del tanque de entrega pudo incrementar el daño. La parte delantera ofrece un desgaste natural por ser el área donde se inicia el contacto entre la superficie incrustada y la bala.

Es importante decir que durante las corridas se mantuvieron algunos de los desfuegos de la tubería abiertos; con el objetivo de desalojar parte la incrustación, sin dañar el entorno. De todos

modos, la planta potabilizadora "Miravalle", que es el punto de entrega del agua de los acueductos, estuvo en todo momento preparada para captar el material producto de la limpieza.

Después de cada dos corridas se procedió a realizar mediciones de gasto y presión en la línea para conocer el beneficio obtenido.

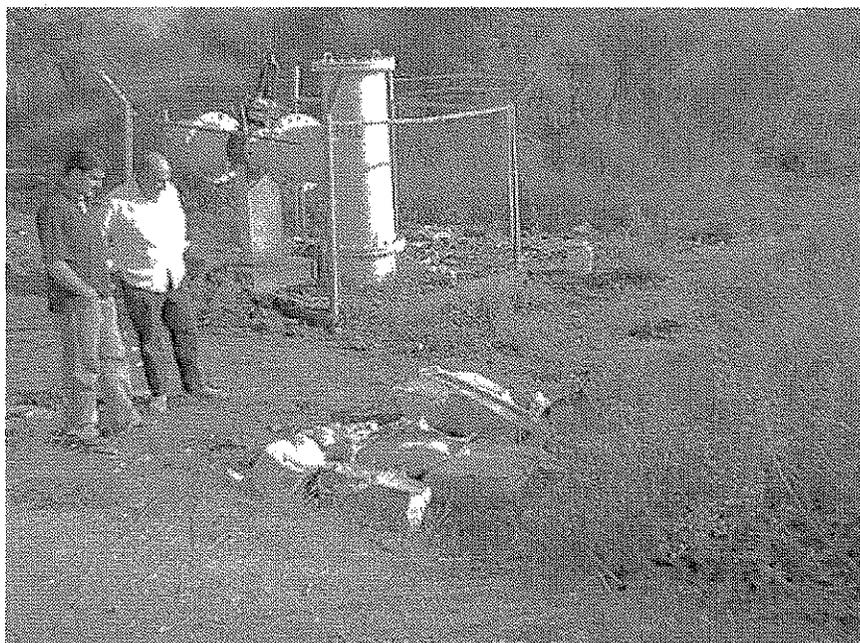
El gasto máximo calculado de este tramo después de la limpieza fue de 6.475 m³/s que representa una ganancia importante sobre la capacidad de conducción, dado que antes de la limpieza era de 5.23 m³/s. En el capítulo siguiente se presentarán datos sobre los resultados a detalle de los aforos y factores de fricción "*f*" (Darcy - Weisbach) antes, durante y después de la limpieza de tuberías.

3.3.1 Análisis del dispositivo tipo bala en el ACHG

A continuación, se presentan algunos puntos importantes sobre la limpieza realizada:

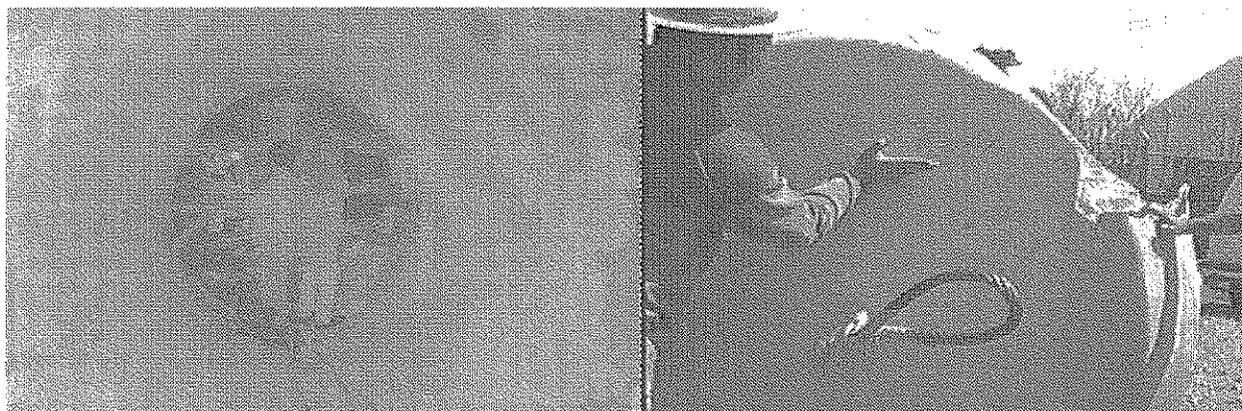
1. Las balas de limpieza fueron especialmente diseñadas para su aplicación en este acueducto. Por lo general fueron más cortas que lo que marca las normas (dos veces su diámetro), debido al cambio de dirección de aproximadamente 90°, con un radio de curvatura corto, en el by-pass del tanque de entrega.
2. Se presentaron daños importantes en la balas durante las corridas que pudieron ser evitados, por ejemplo:
 - ✓ No se tuvo la coordinación necesaria en la operación de un desfogue de la tubería, y cuando la bala pasó frente a él, se encontraba abierto lo que ocasionó la succión y desprendimiento de un pedazo de tamaño importante, dañándolo considerablemente (ver fotografía 3.10).
 - ✓ A la llegada del tanque de entrega existe una bifurcación que entra al mismo, al cual se le soldaron vigas para evita que la bala reconociera hacia ese punto (ver fotografía 3.11), sin embargo, esta vigas sólo fueron punteadas y la bala al llegar a este punto las rompió fácilmente ocasionando un daño en la punta como se aprecia en la fotografía 3.12.
3. Es importante que después de cada corrida se evalúe la recuperación obtenida con cada dispositivo. Lo anterior no fue posible y sólo después de las corridas dos y cuatro se pudo conocer el beneficio. En este capítulo se ha planteado la necesidad de medir después de cada corrida ya que ofrece un análisis de corridas contra recuperación obtenida.
4. Durante las corridas se pudo observar que el dispositivo arrastró aire ya que en algunas juntas del tubo existían fugas, y la presencia de la bala evacuó el aire. Es importante decir que se deberá tratar de purgar la línea lo mejor posible ya que si se llegara a acumular una bolsa grande de aire, ésta se podría comprimir ocasionando la concentración del esfuerzos en la tubería haciéndola reventar.

5. Los desechos, producto de la limpieza, en todo momento fueron captados por la planta potabilizadora “Miravalle” o desalojada por algunos desfogue sin poner en riesgo el medio.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fotografía 3.10. Parte de la bala desprendida durante el paso por un desfogue



Fotografía 3.11. Vigas de acero instaladas en la bifurcación del tanque de entrega.

Fotografía 3.12. Bala dañada por acción de las vigas en el tanque de entrega.

En general, la limpieza del tramo TCR a CE se desarrolló con éxito, creando gran aceptación dado los resultados obtenidos.

Capítulo 4.

Recuperación de la capacidad de conducción en los acueductos Río Colorado-Tijuana y Chapala-Guadalajara

4.1 Capacidad de conducción

La capacidad de conducción de una tubería se define como el gasto que se puede hacer circular por ella, dado un gradiente hidráulico. Según la fórmula de Darcy – Weisbach:

$$Q = \sqrt{\frac{g\pi^2 D^5 S_f}{8f}} \quad (1)$$

donde:

- g, constante de aceleración de la gravedad (m/s²)
- π , constante geométrica (adimensional)
- D, diámetro interior de la conducción (m)
- S_f , gradiente hidráulico (adimensional)
- f, factor de fricción (adimensional)
- Q, gasto volumétrico (m³/s)

De la ecuación 1 se deduce que la capacidad máxima de conducción corresponde al máximo gradiente hidráulico posible y al factor de fricción mínimo. En tramos a bombeo S_f depende de la potencia de las bombas y por tanto, del costo de bombeo, por lo que no puede crecer indiscriminadamente. En tramos a gravedad, S_f está dado por la diferencia de elevaciones y por la longitud entre los extremos de la tubería.

La capacidad de conducción depende considerablemente del factor de fricción y, a su vez, de la rugosidad del tubo. Se ha visto que esta rugosidad es alterada por la presencia de material fino adherido a las tuberías. Gracias a observaciones de campo, además se ha podido evidenciar que la rugosidad aumenta con el tiempo (Ramos S, 1998. Carmona R, et al, 1996).

Existen estudios que muestran los cambios en la capacidad de conducción de acueductos con el tiempo de operación. Carmona (1996), Echávez (1997), Hudson (1966), Genijew, en Sotelo (1992) y Velitchko (1992) mostraron como posibles causas del incremento de la rugosidad, a la corrosión y a los depósitos orgánicos e inorgánicos adheridos en el interior de las tuberías; éstos a su vez tienen su origen en las características físico-químicas y biológica del agua que transportan. Además, todos coinciden que ya sea la rugosidad, el factor de fricción “f” de Darcy, “n” Manning, “C” de Hazen o cualquier otro parámetro relacionado con la pérdida de carga, éste cambia en el tiempo, incrementándose con la edad para cada acueducto o conducto en particular. Para el caso del coeficiente de fricción “C” de Hazen, este disminuye.

A continuación, se presenta un resumen de los antecedentes de la reducción de pérdida de carga en los acueductos Río Colorado-Tijuana y Chapala-Guadalajara.

4.2 Reducción de la capacidad de conducción

4.2.1 Acueducto Río Colorado - Tijuana

El Instituto de Ingeniería (II) ha llevado a cabo trabajos en el ARCT desde 1987, año en que se realizó un estudio del funcionamiento hidráulico. El primer problema analizado fue el derrame de agua por el coronamiento de la torre de oscilación uno (TO1) de la planta de bombeo uno (PB1). Las mediciones se llevaron a cabo en tramo de la TO1 – TS2, con la operación de un equipo de bombeo y sobre la paralela 1 de 48” de diámetro en funcionamiento (ver figura 3.1). Se determinó que el coeficiente de fricción era de 0.0133 (f en la fórmula de Darcy –Weisbach). Con este resultado se hizo el análisis de operación de tres equipos de bombeo y tres líneas de conducción en paralelo; el resultado permitió establecer la necesidad de sobre elevar la corona de la TO1 en 5 m (Carmona R, et al, 1987).

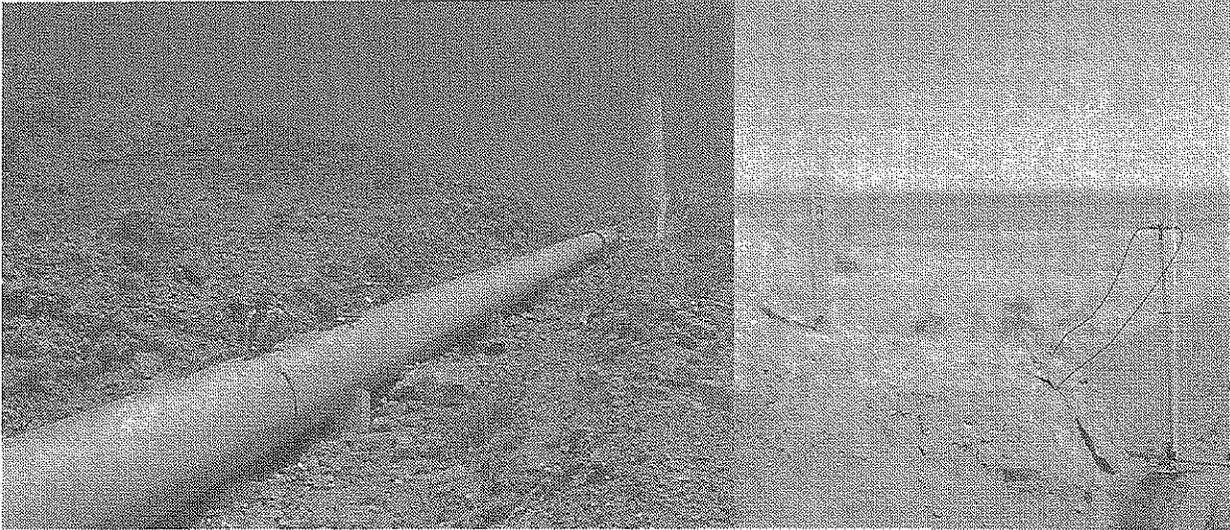
Más tarde, en 1998, el II realizó una segunda campaña de medición porque persistía el desbordamiento de la TO1. Los resultados obtenidos mostraron que la sobre elevación de la torre había sido correcta y que los derrames presentados eran causa del incremento del coeficiente de pérdida de carga de 0.0133 a 0.0237 en la paralela 1 (Carmona R, et al, 1988).

Posteriormente, en febrero de 1992, se llevó a cabo otra campaña de medición que tuvo como propósito evaluar la resistencia al flujo de las tuberías, así como determinar mediante pruebas de campo los valores del coeficiente de fricción de cada tramo. Los resultados mostraron entre otros que el valor de f en tramo TO1-TS2 de la línea paralela 1 se había incrementado de 0.0133 en junio de 1987 a 0.0329 en febrero de 1992. Este crecimiento fue atribuido a la presencia de material fino adherido a la pared interna del tubo (Carmona R, et al, 1992).

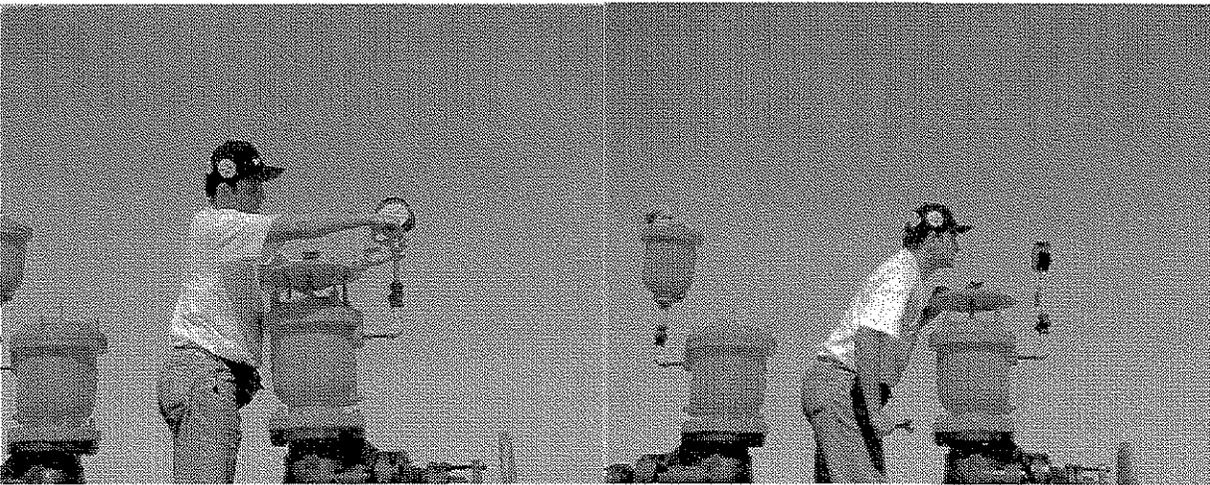
Hasta ese momento todas las mediciones habían sido hechas sobre la línea 1. Es importante mencionar que la línea 1 inició su funcionamiento en 1983 (año que empezó a funcionar el acueducto) y que en 1985 entró a operar la línea 2, alternadamente con la uno, dado que la demanda de agua en ese momento no requería el funcionamiento de las dos tuberías. Mediciones realizadas en octubre de 1996 sobre la línea 2 (no se pudo medir sobre línea 1), mostraron que el coeficiente de pérdida de carga era de 0.0378, mayor al medido en febrero de 1992 para la línea 1, lo cual, hace pensar que aunque la línea 2 no operaba con la misma frecuencia que la línea 1, la rugosidad evolucionó por mantenerse siempre llena (Ramos S., 1998).

Durante las campañas de medición los aforos se realizaron con tubo Pitot instalado al inicio del tramo a gravedad, en una sección cercana al TO1 (ver fotografías 4.1). Para determinar el gradiente hidráulico “ S_f ” se instalaron conexiones a manómetros a lo largo de la conducción, como se observa en las fotografías 4.2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografías 4.1. Instalación de tubo Pitot en la rampa de descenso de la torre de oscilación uno.



Fotografías 4.2. Instalación y lectura de manómetro sobre válvula de admisión y expulsión de aire.

En la tabla 4.1, se muestran los resultados obtenidos en las distintas fechas de medición, indicando gasto y gradiente hidráulico; éste último calculado mediante un ajuste por mínimos cuadrados sobre las lecturas piezométricas, a lo largo del tramo.

Fecha (mm-aa)	Tramo TO1-TS2 (línea paralela #)	Gasto (m ³ /s)	S _f
07-1987	1	1.460	0.000905
09-1988	1	1.330	0.001332
02-1992	1	1.171	0.001382
10-1996	2	1.003	0.001165

Tabla 4.1 Aforos y gradientes en el tramo TO1 – TS2

Para determinar los valores del factor de fricción “f”, se utilizó la fórmula 1 de la siguiente forma:

$$f = \frac{g\pi^2 D^5 S_f}{8Q^2} \quad (2)$$

Siendo Q el gasto aforado (m³/s) y S_f calculado con anterioridad.

Tiempo de operación (años)	Paralela (#)	Gasto (m ³ /s)	S _f	f	Re*10 ⁶	ε (mm)
4	1	1.460	0.000905	0.0133	1.5	0.14
5.17	1	1.330	0.001332	0.0237	1.4	2.41
8.28	1	1.171	0.001382	0.0329	1.2	6.88
10.75*	2	1.003	0.001165	0.0378	1.0	11.86

*con referencia al año que empezó a funcionar (1985)

Tabla 4.2. Resultados de mediciones en las paralelas 1 y 2 del tramo TO1-TS2, ARCT.

En la tabla 4.2 muestra un resumen de gastos, gradientes hidráulicos, factores de fricción y rugosidad equivalente. Esta última determinada con la fórmula de Swame y Jain (Mott R.,1994) :

$$f = \frac{0.25}{\left(-\text{Log}_{10} \left(\left(\frac{\epsilon}{3.7D} \right) + \left(\frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right) \right)^2} \quad (3)$$

Donde:

- ε, rugosidad (mm)
- D, diámetro en (mm)
- Re, Número de Reynolds (adimensional)
- f, factor de fricción (adimensional)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Además, en la tabla anterior se ha incluido el tiempo de operación para cada caso en las paralelas 1 y 2, desde su inicio de operación. Por su parte la figura 4.1 muestra la evolución del gasto y factor de fricción en el tiempo.

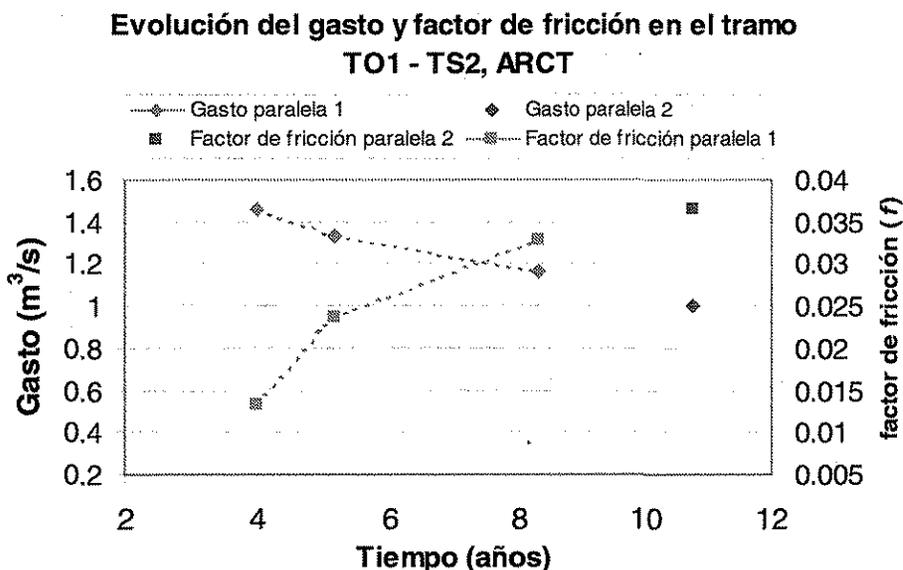


Figura 4.1. Evolución del gasto y factor de fricción en las líneas en paralelo 1 y 2.

Según estos resultados el factor de fricción aumentó en la línea paralela 1 en un 147 % en cuatro años y medio, lo que representó una reducción en la capacidad de conducción de 36 %. Con respecto a la paralela 2, el gasto era de 1.033 m³/s y el factor de fricción de 0.0378, mayor que los reportados en la última medición por línea 1. Sin embargo, se podría esperar que la evolución, tanto de factor de fricción como del gasto por la línea 1, siguiera la misma tendencia. De igual forma se puede suponer que la evolución de esos parámetros para la línea 2, tuviera el mismo comportamiento que los reportados para la línea 1, dado que ambas líneas son iguales.

4.2.2 Acueducto Chapala – Guadalajara

En mayo de 1990, se puso en operación el primer tramo del acueducto, desde la planta de bombeo (PB) hasta el tanque de cambio de régimen (TCR), a través del cual el agua se vertió hacia en canal “El Guayabo”. En septiembre de este mismo año, el Instituto de Ingeniería (II) realizó las primeras mediciones de gasto y gradiente hidráulico a lo largo de la conducción.

Un año después, en septiembre de 1991, entró en operación el tramo a gravedad desde el TCR al tanque de entrega (TE), ubicado en el Cerro del Cuatro en la periferia de la Ciudad de Guadalajara, permitiendo la operación completa del sistema, suspendiendo la operación anterior hacia el Cana el “El Guayabo”. Sin embargo, fue hasta agosto de 1994 cuando se pudo realizar la primera medición de gasto y gradiente con la operación de cuatro equipos de bombeo (Carmona R., 1996).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Desde entonces, se han efectuado mediciones en ambos tramos de la conducción con la operación de hasta 5 equipos de bombeo. Los aforos se han realizado con tubo Pitot en dos secciones del acueducto, la primera localizada en la descarga de planta de bombeo, para las mediciones del tramo a bombeo y la otra ubicada a 670 m a la llegada del TE en las mediciones para el tramo a gravedad. Para la determinación del gradiente hidráulico se instalaron manómetros en válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA), así como en algunos desfogues, además de medirse los niveles de operación en los tanques de cambio de régimen y de entrega.

El gradiente hidráulico, el factor de fricción y la rugosidad equivalente fueron calculados con el mismo procedimiento que en el acueducto Río Colorado – Tijuana. En las tablas 4.3 y 4.4 se muestran los resultados de los tramos PB-TCR y TCR-TE respectivamente, indicando en el tiempo de operación de cada uno de ellos. Por su parte las figuras 4.2 y 4.3 muestran la evolución del factor de fricción en ambos tramos.

Fecha (mm-aa)	Bombas operando (#)	Años en operación (años)	Q (m ³ /s)	S _f	f	Re*10 ⁶	ε (mm)
09-1990	2	0.33	2.75	0.000224	0.0146	1.7	0.46
10-1994	4	4.42	5.64	0.001496	0.0232	3.4	4.02
11-1995	4	5.50	5.01	0.001221	0.0240	3.0	4.57
04-1996	5	5.92	5.93	0.001761	0.0248	3.6	5.10
10-1996	4	6.42	5.09	0.001311	0.0250	3.1	5.29
10-1998	3	8.42	4.05	0.001049	0.0316	2.5	11.89

Tabla 4.3. Mediciones en el tramo PB-TCR

Fecha (mm-aa)	Bombas operando (#)	Años en operación (años)	Q (m ³ /s)	S _f	f	Re*10 ⁶	ε (mm)
08-1994	4	2.92	5.46	0.001053	0.01746	3.3	1.22
10-1994	4	3.08	5.48	0.001078	0.01774	3.3	1.31
11-1995	4	4.17	4.99	0.001171	0.02325	3.0	4.02
04-1996	5	4.67	5.55	0.001504	0.02413	3.4	4.64
10-1996	5	5.08	5.96	0.001528	0.02126	3.6	2.84
10-1996	4	5.08	4.92	0.001211	0.02473	3.0	5.07
01-1997	5	5.3	5.84	0.001498	0.02171	3.5	3.08
02-1997	5	5.4	5.88	0.001480	0.02116	3.6	2.78
10-2000	4	9.1	4.61	0.001312	0.03051	2.8	10.60
10-2000	3	9.1	4.04	0.000914	0.02770	2.4	7.60
10-2000	2	9.1	2.69	0.000413	0.02820	1.6	8.08

Tabla 4.4. Mediciones en el tramo TCR-TE



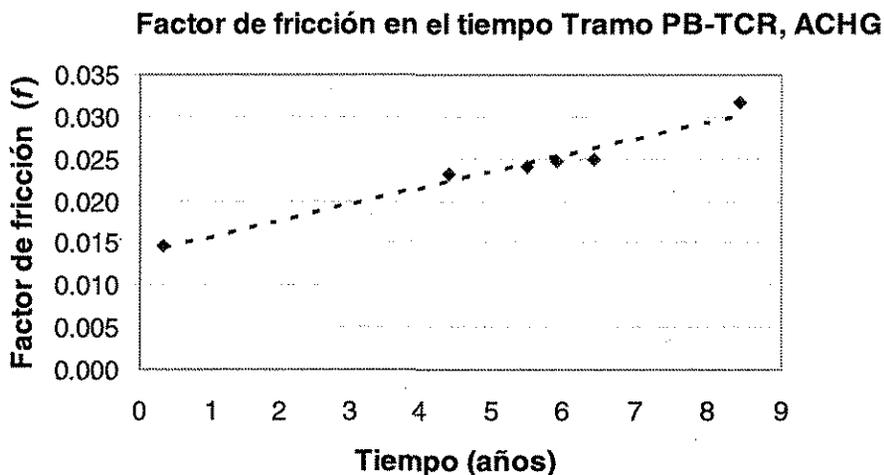


Figura 4.2. Evolución del factor de fricción en el tramo PB-TCR

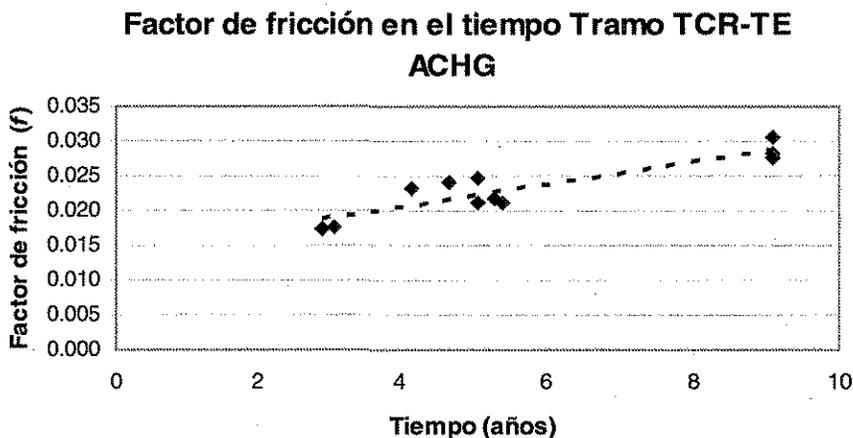


Figura 4.3. Evolución del factor de fricción en el tramo TCR – TE

En las figuras anteriores se puede ver la tendencia ascendente del factor de fricción con el tiempo, además en la figura 4.4 se observa la reducción de gasto con el tiempo para la operación con 4 equipos de bombeo en el acueducto.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Evolución del gasto en el tramo TCR-TE ACHG con 4 equipos de bombeo en operación

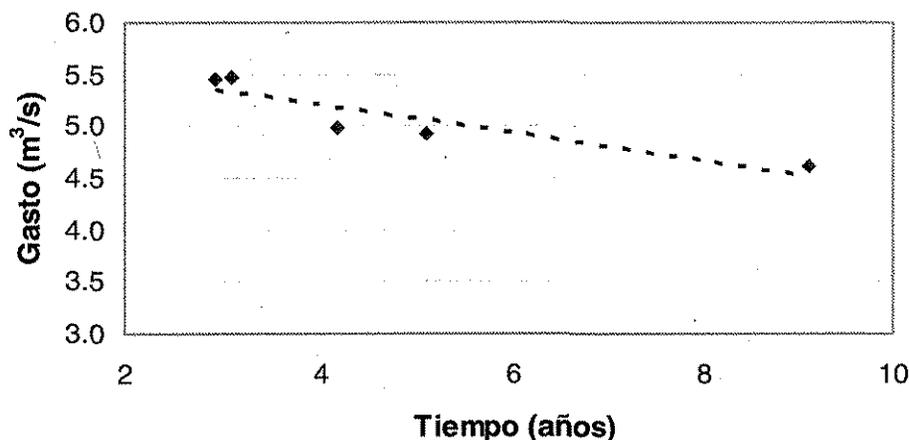


Figura 4.4. Evolución del gasto con 4 equipos en el tramo TCR-TE

De los resultados de las mediciones en el acueducto Chapala – Guadalajara se observa que el factor de fricción en el tramo por bombeo se ha incrementado en 116 % durante los 8 años transcurridos desde la primera medición en 1990 hasta la última en 1998. Para el tramo a gravedad, bajo la hipótesis de un coeficiente inicial $f = 0.0146$ (coeficiente medido al inicio de la operación del tramo a bombeo) después de 9 años el incremento del coeficiente de fricción es de 97 %.

Para la capacidad de conducción en el tramo a bombeo la disminución es de 32 % en un periodo de 8 años, mientras que en tramo a gravedad es de 22 % en 6.2 años.

Por otra parte, aunque la rugosidad se ha visto fuertemente incrementada en ambos acueductos, ésta ha alcanzado algunos valores por encima a los reportados en campo (5-7 mm), por lo que es necesario pensar en una rugosidad equivalente que no refleja verazmente el valor medio de la rugosidad real en las paredes de la conducción. Los efectos que pudieran producir éstos cambios en la rugosidad han sido estudiados por Carmona et al, 2002.

El cambio de la capacidad de conducción en el tiempo, se ha podido evidenciar en ambos acueductos, cada uno con diferente evolución, pero siguiendo la misma tendencia al disminuir el gasto e incrementarse el coeficiente de pérdida de carga.

Finalmente, se puede decir que cada acueducto es único y su evolución hacia la reducción de capacidad de conducción es sólo cuestión de tiempo, si no se llevan a cabo acciones para prevenirlo.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

4.3 Recuperación de la capacidad de conducción

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.1 Acueducto Río Colorado – Tijuana

Con base en los antecedentes de reducción de capacidad de conducción hasta 1996 en el tramo TO1 – TS2, se procedió a realizar la limpieza en este tramo sobre la línea en paralelo número 2 (como se ha descrito en el capítulo tres) con el propósito de recuperar la capacidad de conducción.

El 25 de junio de 1997 se realizaron nuevas mediciones de gasto y presión en la paralela 2 para conocer el beneficio obtenido; éstas se describen a continuación (Ramos S., 1998).

Para determinar el gradiente hidráulico se instalaron manómetros a lo largo de la línea de conducción sobre algunas VAEAS, además de aforarse la línea con tubo Pitot. Los resultados de cargas piezométricas y gasto se muestran en la tabla 4.5.

Cargas Piezométricas sobre la línea 2 tramo T01-TS2, ARCT (25/06/97)

VAEA	VAEA	VAEA	VAEA
4+385	9+660	16+620	21+340
msnm	msnm	msnm	msnm
191.28	185.46	176.81	172.22
Gasto aforado 1.36 m³/s			

Tabla 4.5

Como se ha mencionado con anterioridad, mediante un ajuste de mínimos cuadrados se determina el gradiente hidráulico (ver figura 4.5), mientras que en la tabla 4.6 se presentan los resultados del coeficiente de pérdida de carga y de la rugosidad equivalente, calculados con la fórmulas de Darcy – Weisbach y Swamee – Jain respectivamente.

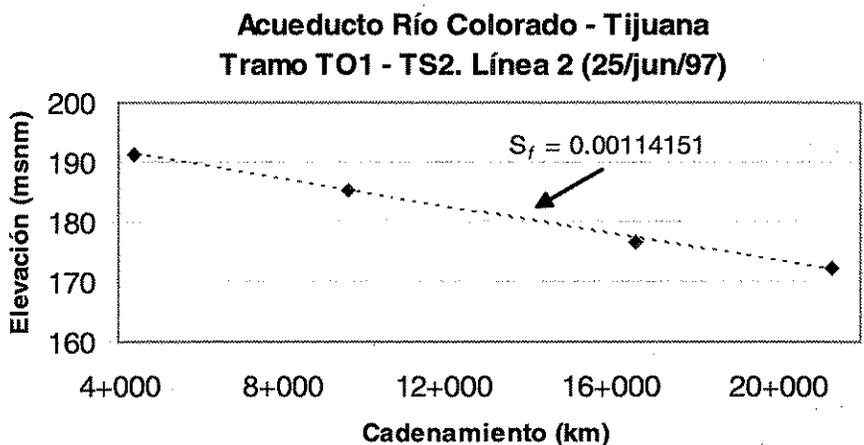


Figura 4.5. Gradiente hidráulico medido en la línea 2, TO1-TS2

Acueducto Río Colorado – Tijuana

Resultados de las mediciones después de la corrida de balas en la paralela 2

Fecha (dd-mm-aa)	Q (m ³ /s)	S _f	f	Re*10 ⁶	ε (mm)
25-06-1997	1.36	0.00114151	0.0201	1.42	1.27

Tabla 4.6. Resultados después de la limpieza en la paralela 2 del tramo TO1- TS2.

Con base en los resultados, el factor de fricción calculado después de la limpieza en la línea 2 es de 0.0201, lo que representa una disminución del 47% con respecto al reportado en octubre de 1996 de 0.0378. Al igual que el factor de fricción, la rugosidad equivalente calculada presenta una disminución significativa a valores de 1.27 mm. Desafortunadamente, no fue posible entrar al tubo para ver la apariencia de la pared, después de la limpieza.

Por otra parte, el gasto se incrementó en 0.36 m³/s, ya que antes era de apenas 1 m³/s. Conviene recordar que la limpieza se hizo con sólo 2 balas de baja densidad, ya que no fue posible lanzar más, lo que hubiese podido mejorar las condiciones de operación.

Es importante mencionar, dado los buenos resultados alcanzados por la limpieza de la línea 2, se recomendó limpiar todo el acueducto, en especial la paralela 1 de este mismo tramo, para mejorar considerablemente la capacidad de conducción de todo el sistema.

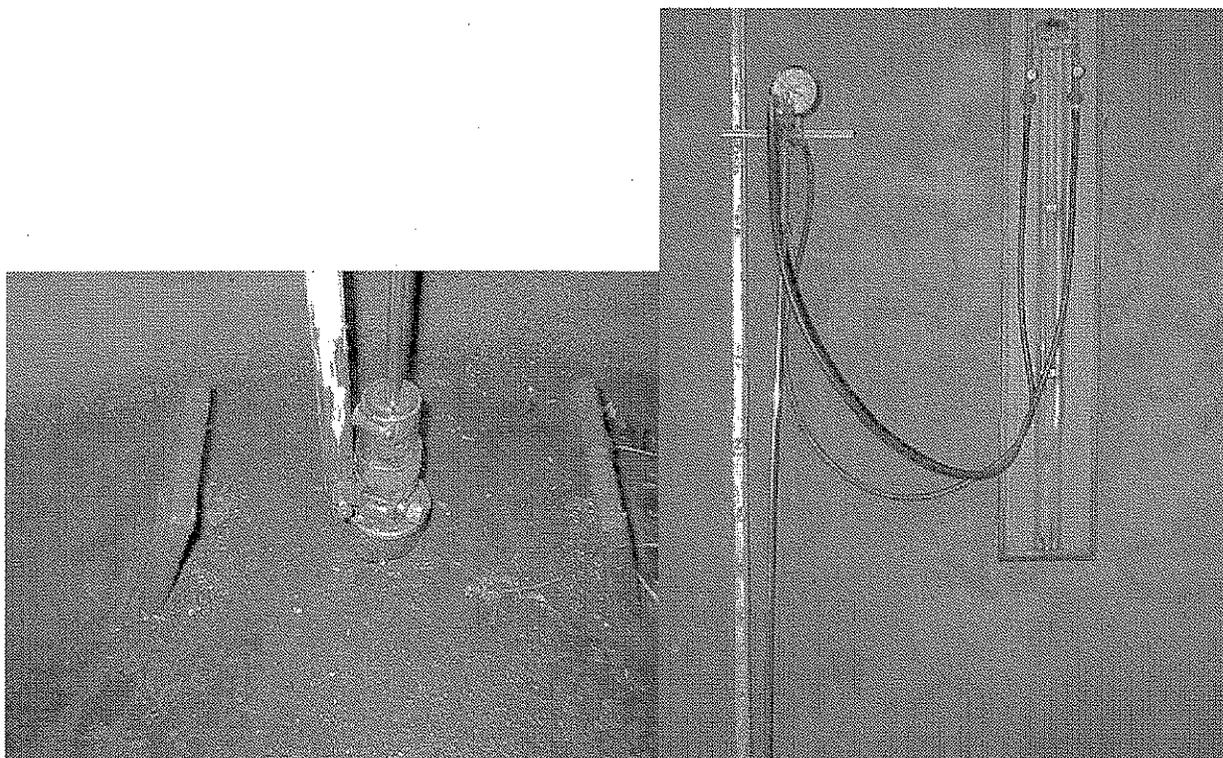
4.3.2 Acueducto Chapala - Guadalajara

Con el propósito de recuperar la capacidad de conducción, como se ha mencionado con anterioridad, se realizaron dos etapas de dos corridas cada una con el dispositivo tipo bala en el tramo tanque de cambio de régimen a tanque de entrega. A continuación se mostrarán las mediciones y resultados para ambas corridas (Sánchez A., et al, octubre 2000. Sánchez A., et al, diciembre 2000. Sánchez A., et al, febrero 2001).

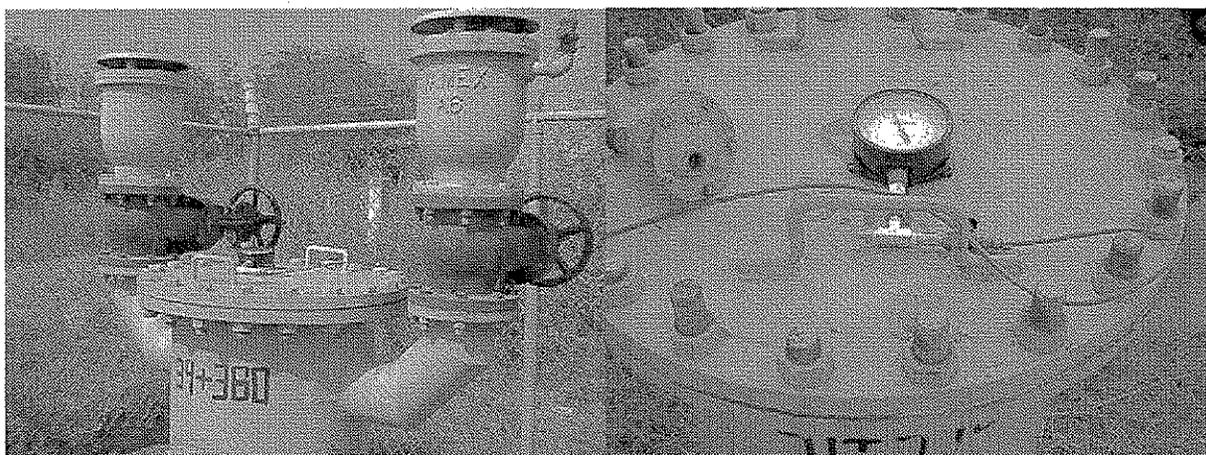
Después de cada etapa de limpieza en el tramo, se procedió a realizar mediciones de gasto y presión sobre la línea de conducción para conocer la ganancia en el gasto entregado.

Para el cálculo de gradiente hidráulico se instalaron manómetros sobre la línea y se aforó con tubo Pitot a la llegada del TE en cada medición con diferente número de equipos de bombeo en operación (ver fotografía 4.3 y 4.4). En la tabla 4.7 y 4.8 se muestran los gradientes calculados, los coeficientes de pérdida carga según la fórmula de Darcy – Weisbach y la rugosidad equivalente en la fórmula de Swamee - Jain, para cada etapa de limpieza.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Fotografías 4.3. Instalación del tubo Pitot y toma de lecturas en un manómetro diferencial con tetracloruro de carbono a la llegada del tanque de entrega (cerro del cuatro).



Fotografías 4.4. Instalación de manómetros sobre válvulas de admisión y expulsión de aire.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fecha (dd-mm-aa)	Corridas de limpieza	Equipos operando (#)	Q (m ³ /s)	S _f	Re*10 ⁶	f	ε (mm)
18/12/2000	2	4	4.472	0.000956	2.7	0.0236	4.27
18/12/2000	2	3	4.178	0.00068	2.5	0.0193	1.86
19/12/2000	2	2	2.752	0.000292	1.7	0.0191	1.74
20/12/2000	2	5	5.017	0.000114	3.0	0.0224	3.47
Promedio						0.0211	2.84
						Des. Est	1.24

Tabla 4.7. Resultados después de la primer etapa de limpieza, en el tramo TCR – TE.

Fecha (dd-mm-aa)	Corridas de limpieza	Equipos operando (#)	Q (m ³ /s)	S _f	Re*10 ⁶	f	ε (mm)
17/02/2001	4	4*	2.891	0.000311	1.8	0.0184	1.49
17/02/2001	4	4	4.609	0.000837	2.8	0.0195	1.96
18/08/2001	4	3	3.935	0.000589	2.4	0.0188	1.67
Promedio						0.0189	1.71
						Des. Est	0.24

* Derivando gasto por el canal El Guayabo

Tabla 4.8. Resultados después de la segunda etapa de limpieza, en el tramo TCR – TE.

Con base en los resultados de la primera etapa de limpieza, el factor de fricción promedio de 0.0211 que aparece en la tabla 4.7, representa una disminución del 27% con respecto al medido antes de la limpieza de 0.0288 (con referencia a las últimas 3 medidas de la tabla 4.4). La segunda etapa de limpieza muestra nuevamente un decremento del factor de fricción del 10%, pasando de 0.021 a 0.0189 (valores promedio). En consecuencia la ganancia total de “f”, debida a las dos etapas de corridas, fue de 37% en reducción del coeficiente de Darcy - Weisbach. La reducción más importante se presenta después de las primeras dos 2 corridas que formaron la primera etapa de limpieza (ver figura 4.6).

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

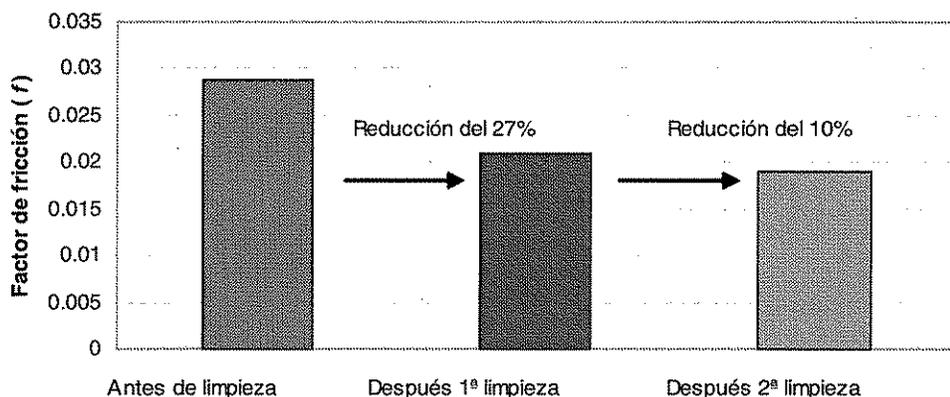


Figura 4.6. Comparación del factor de fricción en distintas etapas.

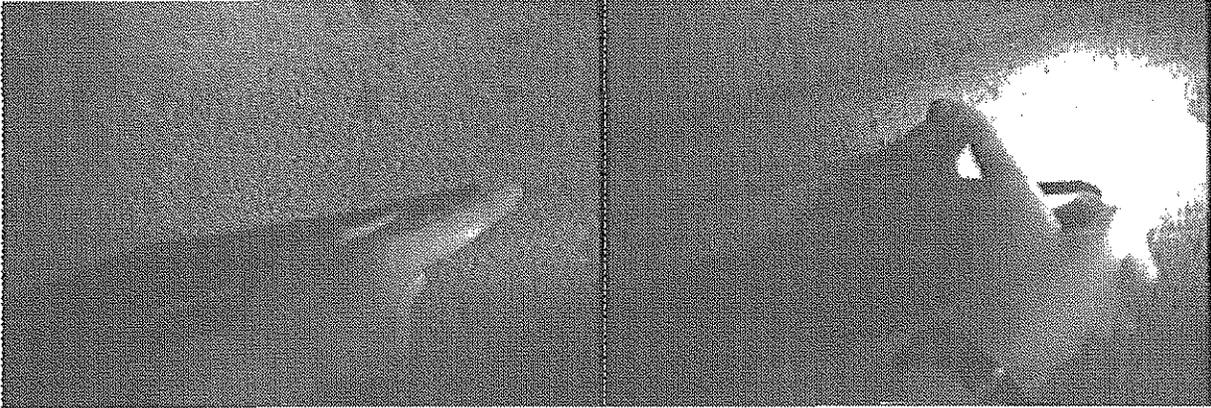
De igual forma, los resultados para la rugosidad equivalente muestran una clara disminución, lo que permite observar que antes de la limpieza se tenía una rugosidad promedio de 7.76 mm, con una desviación estándar de 1.61 mm, mientras que después de la primera etapa de corridas se calculó una rugosidad promedio de 2.84 mm, con una desviación estándar de 1.24 mm, y finalmente, después de la segunda etapa, la rugosidad promedio fue de 1.71 mm, con una desviación estándar de 0.24 mm. En las fotografías 4.5, se observa la pared interior después de las corridas de limpieza, presentando una disminución en el espesor de la incrustación con apariencia lisa (comparar con fotografías 1.3 y 1.4).

En la figura 4.7 se muestran los puntos para la rugosidad calculada antes y después de cada etapa de limpieza, sobre el diagrama de Moody, lo cual permite tener una idea de la rugosidad relativa esperada, así como del régimen del flujo en el acueducto. Cabe señalar que aquí no es válido graficar el promedio de las mediciones, sino cada una de ellas en las diferentes etapas.

Cabe mencionar que en el extremo izquierdo del diagrama de Moody, para números de Reynolds menores a 2000, la línea recta muestra la zona de flujo laminar. Para Reynolds entre 2000 y 4000 no se trazan curvas, pues se trata de una zona crítica entre flujo laminar y flujo turbulento y no es posible predecir el flujo. Para valores superiores a 4000, tanto en la parte superior derecha como en la inferior del diagrama, se tiene la zona de flujo turbulento para tuberías lisas y rugosas (García R., 2000).

Los resultados anteriores de las mediciones se encuentran en la zona de flujo turbulento correspondiente a tuberías rugosas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fotografías 4.5. Aspecto de la pared interior del tubo después de 4 corridas con balas

Diagrama de Moody

* Antes de limpieza + Después 1er etapa x Después 2ª etapa

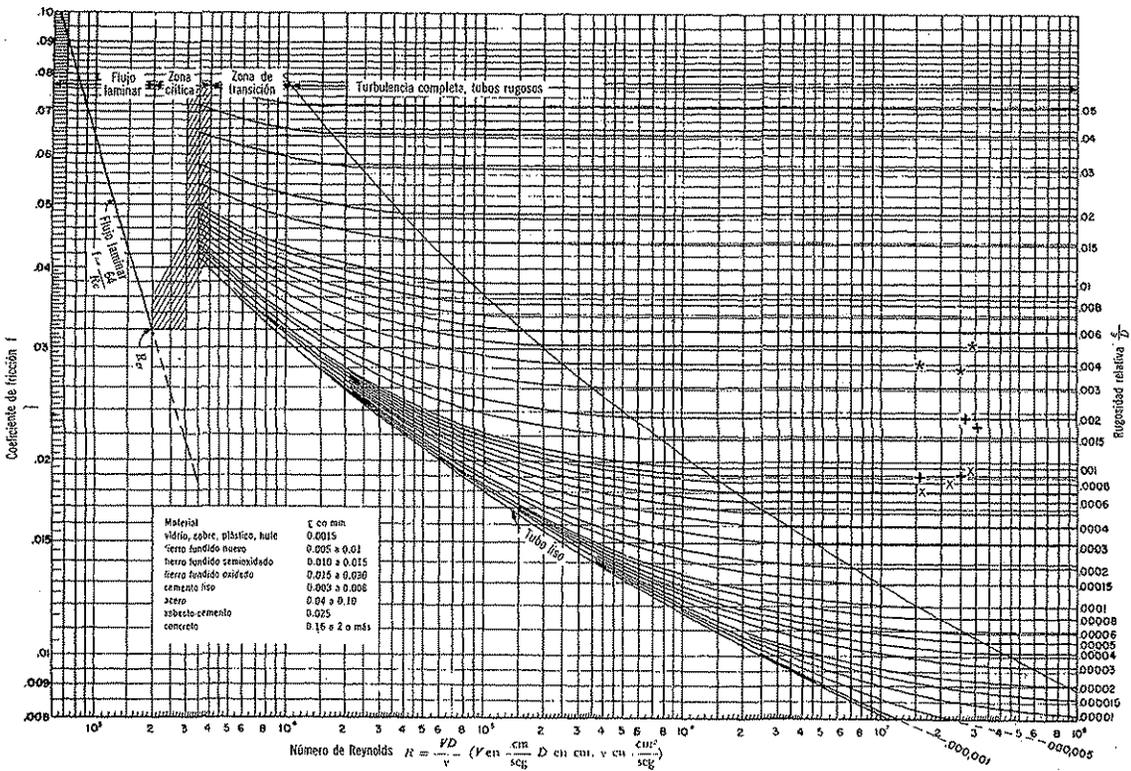


Figura 4.7. Diagrama de Moody

TESIS CON FALLA LE OR GEN

Al inicio del este capítulo se dijo que la máxima capacidad de conducción implica que el gradiente hidráulico (S_f) sea el máximo posible y el coeficiente de fricción el mínimo. En tramos a gravedad, S_f está dado por la diferencia de elevaciones y por la longitud entre los extremos de la tubería.

Para el tramo en estudio del TCR a TE, el gradiente hidráulico máximo posible es $S_{f\text{ máx}} = 0.001592$ y de la fórmula uno (Darcy – Weisbach):

$$Q_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{g\pi^2 D^5 S_{f\text{ máx}}}{8f_{\text{medido}}}} \quad (4)$$

Dado que el diámetro de la tubería es de 2.1 m, sólo faltará sustituir el valor de f_{medido} , para calcular el gasto máximo. En la tabla 4.9 se presentan los gastos máximos extrapolados para antes y después de la limpieza de cada etapa.

Corridas con balas	Etapas	$Q_{\text{máx}}$ (m ³ /s)	Factor de fricción promedio calculado (Darcy – Weisbach)
Antes de realizar limpieza	-	5.230	0.0288
Después de 2 corridas con balas	Primera	6.180	0.0210
Después de 4 corridas con balas	Segunda	6.473	0.0189

Tabla 4.9. Gastos máximos extrapolados en el tramo TCR – TE

Por lo tanto, el gasto máximo posible después de las cuatro corridas de balas es 6.473 m³/s, que corresponde a una recuperación aproximada de 1.24 m³/s, con respecto al calculado antes de la limpieza. Es conveniente observar que la ganancia importante de gasto se presenta después de la primera etapa de corridas; es decir se recuperaron 0.95 m³/s con tan sólo dos corridas de balas y 0.29 m³/s con las dos últimas.

En la figura 4.8, se han graficado los gastos máximos extrapolados para las condiciones descritas en la tabla anterior, pero se ha agregado un punto correspondiente a la hipótesis de que el factor de fricción mínimo corresponde a 0.0146, medido al inicio de la operación del acueducto en 1990. Bajo esta hipótesis el gasto máximo posible en este tramo sería de 7.343 m³/s que es inferior al gasto de diseño del acueducto de 7.5 m³/s, pero servirá para evaluar la ganancia con cada etapa de corridas.



Comparación de factores de fricción medidos contra el gasto máximo posible en el tramo TCR- TE, ACHG

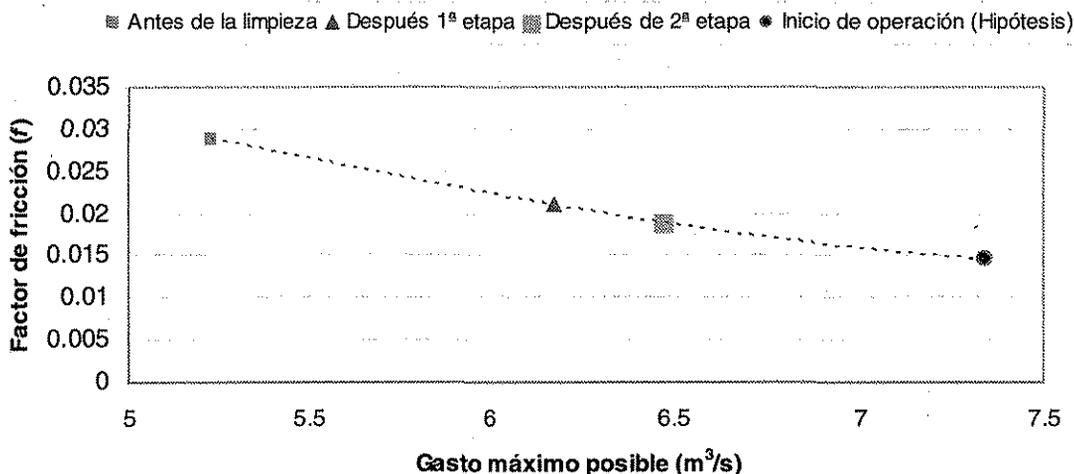


Figura 4.8.

En la gráfica anterior se observa que después de la primera etapa de limpieza la reducción del factor de fricción y la ganancia del gasto son muy significativas, recuperando gran parte de la capacidad de conducción perdida. Sin embargo, cuanto más cerca se esté del gasto máximo posible de 7.343 m³/s, la tendencia de recuperación se hace más suave, haciendo más difícil alcanzar el gasto requerido. Es decir, las corridas subsecuentes a las primeras no tendrán el mismo efecto, como se pudo observar con la segunda etapa de limpieza.

Es muy importante estimar hasta qué porcentaje de recuperación de la capacidad de conducción es económicamente factible llegar. En consecuencia, es necesario desarrollar esquemas de análisis que permitan comparar costos de corridas de limpieza con costos asociados a no llevar a cabo esas corridas.

En 1985 Walski plantea soluciones para incrementar la capacidad de conducción de las tuberías, mediante la alternativa de limpieza y rehabilitación contra instalar una nueva tubería en paralelo. A cada alternativa la provee de funciones para evaluarlas económicamente para así tomar una decisión. Además recomienda que cuando se requiera ampliar la capacidad de conducción de un acueducto las tuberías existentes no debieran ser rehabilitadas sino más bien instalar una tubería nueva en paralelo con capacidad suficiente para cumplir con los requerimientos. Por otra parte, si la pérdida de capacidad de conducción no es muy importante y la longitud de la tubería es grande, es más económico hacer limpieza y rehabilitar tuberías.

Además, realiza una discusión sobre la existencia de otras opciones para incrementar la capacidad de conducción, como incrementar el bombeo mediante la adición de bombas de apoyo tipo booster o rediseñar impulsores de bombas, lo que llevaría a aumentar consumos de energía y por consiguiente los costos.

4.4 Análisis económico de corridas de limpieza en el ACHG

Con el propósito de analizar la ganancia obtenida con las corridas de las balas en el acueducto Chapala – Guadalajara, se procedió a construir una curva que permitiera conocer la recuperación del gasto con cada corrida. Para la construcción, se tomaron las diferencias de los gastos máximos extrapolados de la tabla 4.9, para el número de corridas de balas 2 y 4, siendo el objetivo conocer el número de corridas necesario para alcanzar el gasto máximo de 7.343 m³/s correspondiente al 100 % de recuperación calculado con el factor de fricción mínimo registrado durante la puesta en operación del acueducto (0.0146).

El tipo de curva de ajuste es:

$$Y = aX^b \quad (5)$$

Donde

- Y, porcentaje de recuperación acumulado (%)
- X, número de corridas (número natural)
- a, constante de ajuste
- b, constante de ajuste



En la figura 4.9 se presenta la curva propuesta para la recuperación de capacidad de conducción en función del número de corridas de balas. Según el ajuste realizado, el 100% de recuperación de capacidad de conducción sería posible con 16 corridas de balas. Se puede ver que después de dos corridas se ganó un 45%, con 2 corridas más sólo un 14 %, para un total de 59 %, faltando recuperar el 41% de la capacidad de conducción, sin embargo es evidente que con cada corrida subsiguiente la ganancia es cada vez menor.

Recuperación de capacidad de conducción contra número de corridas

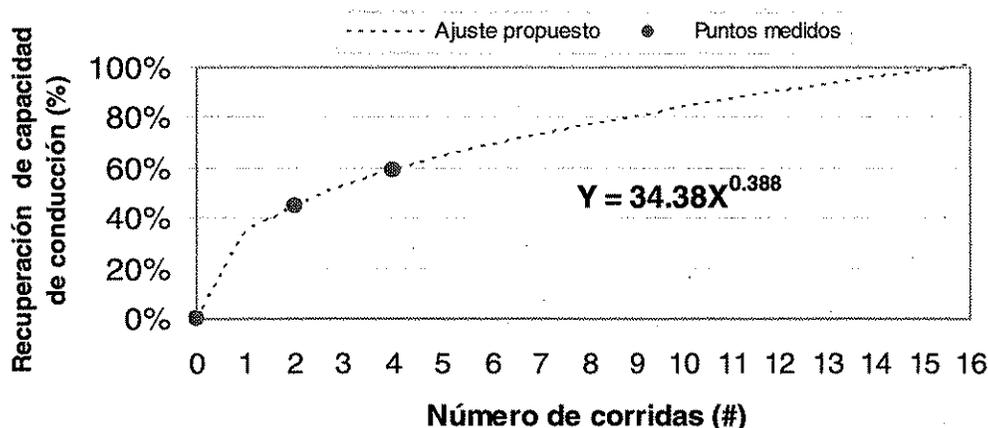


Figura 4.9. Recuperación de la capacidad de conducción vs número de corridas de bala

Por otra parte, en la figura 4.10 se muestra un análisis de los costos acumulados de corridas de limpieza contra recuperación de gasto. Esta fue construida con un costo inicial aproximado de \$ 1,000,000.00, el cual corresponde a las adecuaciones que se tuvieron que hacer en las tuberías del acueducto para las corridas de las balas. Posteriormente, se define un costo fijo por bala de limpieza de \$ 279, 000.00.

Según la gráfica el costo por recuperar el 59% de la capacidad de conducción fue de aproximadamente \$ 2,116,000.00, para un gasto de 1.243 m³/s, restando invertir \$ 3,348,000.00 pesos para recuperar el 41% faltante, este corresponde a la corrida de 12 balas más.

Según Walski se puede pensar en una alternativa para recuperar el gasto restante mediante la instalación de una tubería nueva en paralelo. Para este caso, el 41 % de la recuperación corresponde a un gasto de 0.868 m³/s, si se considera que esto es posible mediante una tubería de 36 in de diámetro en acero, el costo se muestra en la tabla 4.10.

Costos de corridas contra porcentaje de recuperación

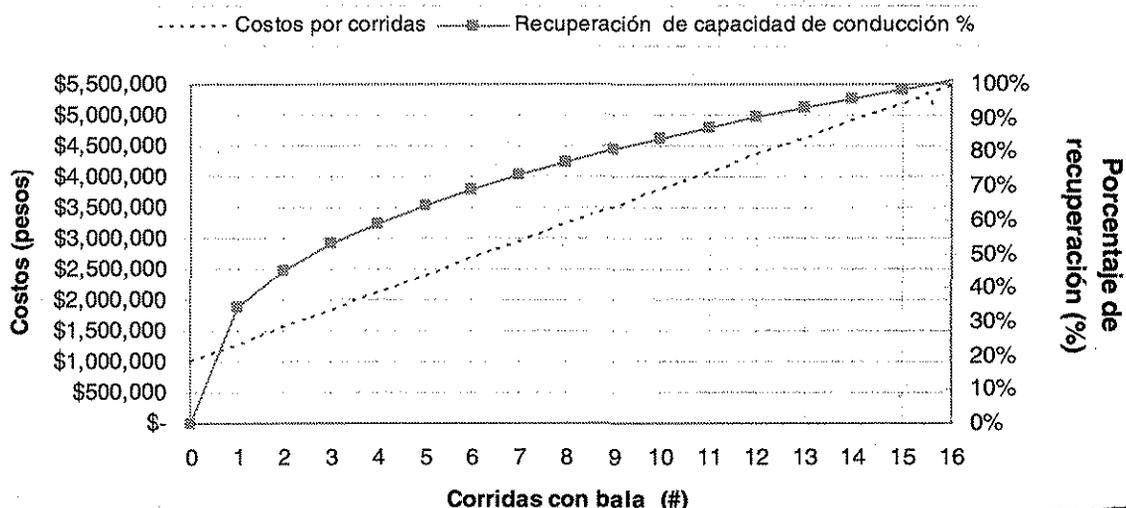


Figura 4.10.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Alternativa de instalación de tubería paralela de 36 in en acero, ACHG.

Costo por metro de tubería *(\$)	Longitud (m)	Costo total tubería (\$)
\$ 3,913.90	46,200	\$ 180,822,180.00

*incluye costos de instalación, suministro y protección (fuente: CNA 2000)

Tabla 4.10.

La inversión de esta alternativa sólo para la tubería es de \$ 180,822,180.00 (se ha visto que la mayor parte de la inversión inicial en un acueducto son las líneas de conducción) que es sumamente mayor al costo de las balas de apenas \$ 3,348,000.00.

Es evidente que la construcción de una línea nueva en paralelo es mucho más cara que la limpieza de tuberías con las balas. Posiblemente la curva de ajuste de porcentaje de recuperación contra número de corridas no sea muy aproximada y tendrá que ser confirmada con corridas subsecuentes para afinar el cálculo. Sin embargo muestra una tendencia clara de la ganancia aproximada con cada corrida. Además, la decisión final de seguir realizando corridas de limpieza contemplará otro análisis de ver cuánto cuesta al organismo operador traer el agua de otra fuente o sitio contra la limpieza con balas.

Finalmente, falta conocer la evolución del factor de fricción después de las corridas con balas para poder determinar cada cuanto tiempo es necesario realizar corridas, por lo que se deberá seguir instrumentando en los acueductos para crear reglas que sirvan para conservar la capacidad de conducción de las tuberías.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Con base en los estudios y trabajos presentados en los capítulos anteriores relacionados con los acueductos Río Colorado – Tijuana y Chapala – Guadalajara, se establecen las siguientes conclusiones:

- ✓ La reducción de capacidad de conducción en ambos acueductos se ha podido evidenciar con la medición de gasto y presión en las tuberías en distintos tiempos de operación. Esta reducción se debe a la presencia de material adherido a las paredes internas del tubo, lo cual se ha confirmado con inspecciones visuales directamente en el interior de la conducción.
- ✓ La capacidad de conducción depende considerablemente del factor de fricción y, este a su vez, de la rugosidad del tubo. Esta rugosidad es alterada por la presencia de material fino adherido en las paredes de las tuberías. Además se ha podido observar que la rugosidad cambia con el tiempo.
- ✓ Las incrustaciones tanto en el acueducto Río Colorado – Tijuana como en el Chapala – Guadalajara se deben a las características físico-químicas y biológicas del agua que transporta. En el primer caso a procesos químicos y bioquímicos que inciden en el proceso de corrosión y material adherido; para el segundo caso los depósitos de material tiene origen en la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua.
- ✓ En ambos acueductos para evitar las incrustaciones se han propuesto pretratamientos al agua influente, acciones que no han sido llevadas a cabo por los organismos operadores.
- ✓ Se trate o no el problema de origen de las incrustaciones, es necesario remover el material adherido para recuperar la capacidad de conducción, mediante la limpieza de tuberías.
- ✓ La limpieza de tuberías contribuye a preservar las dos funciones principales para las cuales son diseñadas las tuberías: la capacidad de *transportar* y la de *contener* el volumen de agua. En la función de *transportar*, la limpieza tiene dos objetivos fundamentales: *restituir* y *conservar* la capacidad de conducción. La función de *contener* el fluido, se ve favorecida por la limpieza al preservar la *integridad física del tubo*.
- ✓ Dentro de la limpieza de tuberías existen diferentes métodos que presentan ventajas y desventajas en cuanto a su uso y tiempos de ejecución. Los tiempos de ejecución son una de las principales limitantes, dado que no se puede suspender el funcionamiento de los sistemas por periodos prolongados. Esta es la razón por la cual el utilizar dispositivos de limpieza tipo bala hacen de esta labor, una buena opción, dado que realizan su trabajo sin sacar totalmente de funcionamiento al sistema.
- ✓ Por desgracia los acueductos del país no están diseñados para limpiar sus tuberías con dispositivos tipo bala, por lo que, es necesario realizar una serie de tareas para acondicionar las tuberías retirando obstáculos, principalmente válvulas y piezas especiales. En este trabajo se han propuesto una serie de recomendaciones que servirán como guía para evitar problemas al correr éste tipo de dispositivos de limpieza.

- ✓ Se recomienda que el diseño de nuevos acueductos tome en cuenta las instalaciones adecuadas para llevar a cabo corridas de limpieza, además de observar las dificultades descritas para las maniobras de limpieza de los acueductos Río Colorado - Tijuana y Chapala - Guadalajara.
- ✓ Con la limpieza en el tramo TO1 – TS2 del Acueducto Río Colorado - Tijuana, el factor de fricción disminuyó de 0.0378 a 0.0201 (aproximadamente un 47%), mientras que el gasto se incrementó en $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$, dado que antes era de $1 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ✓ En el acueducto Chapala - Guadalajara los resultados de las cuatro corridas de balas en el tramo TCR–TE permitieron disminuir el factor de fricción un 37%, de 0.0288 a 0.0211 en las primeras dos corridas y de 0.0211 a 0.0189 con las dos últimas. El gasto máximo posible del tramo después de las cuatro corridas resultó de $6.473 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a una recuperación aproximada de $1.24 \text{ m}^3/\text{s}$, con respecto al calculado antes de la limpieza de $5.23 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ✓ Se debe estimar hasta qué porcentaje de recuperación de la capacidad de conducción es económicamente factible llegar con el número de corridas de balas. Por lo cual, es necesario desarrollar esquemas de análisis que permitan comparar costos de corridas de limpieza con costos asociados a no llevar a cabo esas corridas.
- ✓ Es necesario conocer la evolución del factor de fricción en cada acueducto en particular para determinar cada cuanto tiempo es necesario realizar corridas de limpieza, por lo que se deberán seguir instrumentando los acueductos para crear reglas y programas de mantenimiento que sirvan para conservar la capacidad de conducción de las tuberías.
- ✓ Finalmente, las corridas con dispositivos tipo bala son una buena opción para recuperar y conservar la capacidad de conducción de los acueductos del país.

Bibliografía

Alcerreca H. "Limpieza de tuberías: arte o ciencia", Revista 5 Ductos, publicación Enero-Febrero 1998, PEMEX.

Carmona R., Guevara Y. y Sánchez J. L. "Funcionamiento hidráulico del Acueducto Río Colorado - Tijuana", reporte técnico II, UNAM, elaborado para la CNA, Noviembre de 1987.

Carmona R., Sánchez A., Guevara Y., Castillo G., Rodal E. y Samano A. "Informe de los resultados de la campaña de mediciones realizadas en el Acueducto Río Colorado – Tijuana los días 20 a 25 de septiembre de 1988", reporte técnico II, UNAM, elaborado para la CNA, Septiembre de 1988.

Carmona R., Sánchez A. y Samano A. "Estudio del problema de alta resistencia al flujo en las tuberías de acero del Acueducto Río Colorado - Tijuana". Reporte técnico II, UNAM, elaborado para la CNA, Abril de 1992.

Carmona R. y Sánchez A. "Incremento de pérdida de carga en acueductos. Información de campo de dos acueductos", XVII Congreso Latino Americano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador, Octubre de 1996.

Carmona R., Ortiz L. y Sánchez A. "Efectos dinámicos y temporales en la reducción de capacidad de conducción en grandes acueductos. Estudio con medidas en prototipo", Revista Ingeniería Hidráulica en México, vol. XVII, núm. 2, pp5-16, abril-junio de 2002.

Comisión Federal de Electricidad, "Pruebas físico-químicas a muestras de suelo", reporte técnico, Noviembre de 1996.

Comisión Nacional del Agua (CNA), "Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Protección catódica y recubrimientos anticorrosivos". Libro V 3.5.1, Junio de 1994.

Custodio E. y Llamas M. "Hidrología superficial", Editorial Omega, 2ª edición, vol. 1 1976 – vol. 2 1983.

Echávez G. "Increase in losses coefficient with age for small diameter pipes". Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, vol. 123, No. 2, February 1997, pp157-159.

Fisher H. "Pipeline Desing Essencial In Making Pigging Plans". Pipeline & Gas Journal, August 1998, pp 55-57.

García R. "Pérdida de carga por fricción en tuberías funcionando a presión", tesis para obtener el título de Ing. Civil, FI, UNAM, Enero de 2000.

Girard Industries, Inc. "Catálogo de Aqua – Pigs". T. M. Houston, 1995.

Girard Industries, Inc. "The Art of Pigging". sitio web, <http://www.girardind.com/art.htm>

Harper y Charles A. "Handbook of plastic and elastomers", primera edición, Nueva York, McGraw – Hill, 1975.

Hudson W. "Studies of distribution system capacity un seven cities". Journal of American Water Works Association, vol. 58, No. 2, pp157-164.

Momber A. y Nielsen A. "Pipeline rehabilitation by water - jetting", Materials Performance, February 1998. pp 97-101

Mott R. "Applied Fluid Mechanic", Prentice may Career & Technology Englenwood Cliffs, New Jersey, 1994, pp 248.

Ramos S. "Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías", tesis para obtener el título de Ing. Civil, FI, UNAM, Febrero de 1998.

Sánchez A., Sánchez J.A. y Ortiz L. "Mediciones previas a la limpieza de la tubería del tramo a gravedad del Acueducto Chapala – Guadalajara". Reporte técnico II, UNAM, elaborado para el SIAPA, Octubre de 2000.

Sánchez A., Sánchez J.A., González C. y Zarco J.A. "Mediciones posteriores a la limpieza de la tubería del tramo a gravedad del Acueducto Chapala – Guadalajara". Reporte técnico II, UNAM, elaborado para el SIAPA, Diciembre de 2000.

Sánchez A., Castillo G., Ramos S., Pérez A. y González C. "Determinación de caudales de bombeo y definición de acciones para el mejoramiento del Acueducto Río Colorado – Tijuana", reporte técnico II, UNAM, elaborado para la CNA, Diciembre de 2000.

Sánchez A., Carmona R., González C., Pozos O., Pérez A. y Ramos S. "Mediciones posteriores a la 2ª etapa de limpieza de la tubería del tramo a gravedad del Acueducto Chapala – Guadalajara". Reporte técnico II, UNAM, elaborado para el SIAPA, Febrero de 2001

Sotelo G. "Hidráulica General". Editorial Limusa, Decimatercera edición 1992.

Victorica J., Galván M., Rojas M. y Mendoza F. "Evaluación de las posibles causas de la formación de los depósitos de material en las paredes internas del Acueducto Chapala - Guadalajara", reporte técnico II, UNAM, elaborado para la CNA, Julio de 1997.

Victorica J., Galván M., Rojas M. y Mendoza F. "Análisis físico-químicos y bacteriológicos e identificación de mecanismos que dan origen a la formación de depósitos de material en las paredes internas de la tubería del Acueducto Río Colorado – Tijuana", reporte técnico II, UNAM, elaborado para la CNA, Diciembre de 1997.

Velitchko G. y García C. “Influencia de la calidad del agua sobre la variación del coeficiente de cortante en tuberías”, XXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, La Habana, Cuba, Noviembre de 1992.

Walski T. “Cleaning and Lining versus Parallel Mains”. Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 111, No 1, January 1985, ASCE, pp 43-53.