



01173

4
Ref

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS

*ESTUDIO SOBRE EL AUMENTO DE PÉRDIDA DE CARGA EN
TUBERÍAS PARA TRANSPORTE DE AGUA*

PRESENTADA POR :

RAFAEL CABRERA GUTIÉRREZ

PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERÍA
(MECÁNICA)

DIRIGIDA POR :

Dr. RAFAEL CARMONA PAREDES

Ciudad Universitaria, Marzo de 1998

01173

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 está 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.

A mis Padres

A mis Maestros

A mis compañeros y amigos

*Mi sincero agradecimiento al
Sr. Dr. Rafael Carmona Paredes
por su ayuda para la elaboración
de este trabajo.*

Quiero dar las más sinceras gracias al Sr. Dr. Jorge Carrera Bolaños por haberme sugerido cursar la maestría en Ingeniería y al Sr. Dr. Rafael Carmona Paredes por ayudarme a terminarla.

Asimismo, quiero agradecer al CONACYT, por haberme becado durante los cursos y al Instituto de Ingeniería, durante la realización de esta tesis.

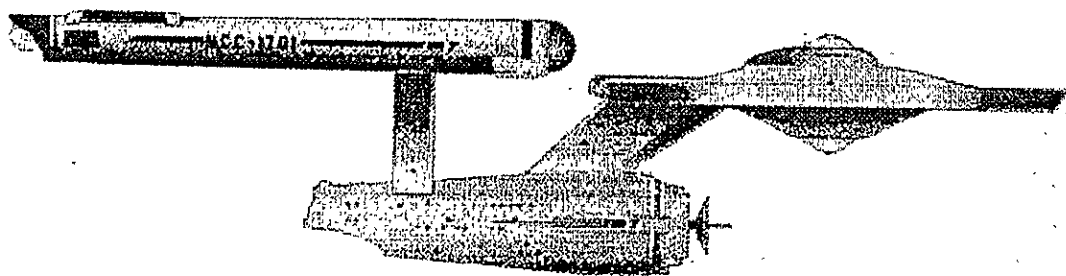
De igual modo, quiero dar las gracias a mis amigos y a todos quienes me ayudaron en la DEEFI, en el II y en el SUAFFYL.

La conquista del espacio.....

.....El gran reto.

Estos son los viajes de la nave *Enterprise*. Su misión durante los próximos cinco años :
Explorar nuevos mundos, descubrir la vida y las civilizaciones que existan en el espacio extraterrestre.....Debe llegar adonde jamás ha llegado el ser humano :

Viaje a las estrellas



Paramount Pictures. T.M.

INDICE

	PÁGINAS
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. FUERZAS DE ORIGEN MECÁNICO QUE PROPICIAN LA MIGRACIÓN RADIAL DE LAS PARTÍCULAS ARRASTRADAS POR EL FLUJO EN ACUEDUCTOS.....	2
1) Fuerza de sustentación debida al cortante.....	3
2) Arrastre viscoso.....	8
3) Fuerza de sustentación debida al giro de la partícula.....	8
4) Fuerza de Coriolis debida a la rotación de la Tierra.....	9
CAPÍTULO 3. FUERZAS DE ORIGEN ELÉCTRICO	11
CAPÍTULO 4. MECANISMOS BIOLÓGICOS.....	15
CAPÍTULO 5. PÉRDIDA DE CARGA EN EL INTE- RIOR DEL ACUEDUCTO CHAPA- LA - GUADALAJARA.....	24

Factor de fricción para el Acueducto...	24
Flujo de líquidos.....	26
Flujo de mezclas.....	30
CAPÍTULO 6. LIMPIEZA DE TUBERÍAS.....	37
Diablos (Pigs).....	37
Dispositivos Magnéticos.....	56
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

El acueducto Chapala-Guadalajara, obra importantísima que abastece de agua a la capital tapatía, entró en operación en sus dos tramos de bombeo y gravedad en 1990 y 1991, respectivamente. El agua que el acueducto transporta es cruda, e.g. no potable. Para que dicha agua pueda ser apta para el consumo humano, se le transporta a una planta potabilizadora antes de ser distribuida en la zona urbana de Guadalajara. En los viajes de inspección realizados posteriormente se encontró una disminución en la capacidad de conducción del acueducto. Al inspeccionar las tuberías se encontró una capa de sedimento fuertemente adherida a las paredes.

Por otra parte, el acueducto Río Colorado-Tijuana, que provee del vital líquido a esta última ciudad, también presenta el mismo tipo de problemas.

El objetivo de este trabajo de tesis consiste en buscar explicación a las causas que propician que las partículas emigren hacia las paredes de los tubos, así como reportar las mediciones realizadas en estos y en otros acueductos, además de discutir las implicaciones del aumento de pérdida de carga y revisar mecanismos de limpieza.

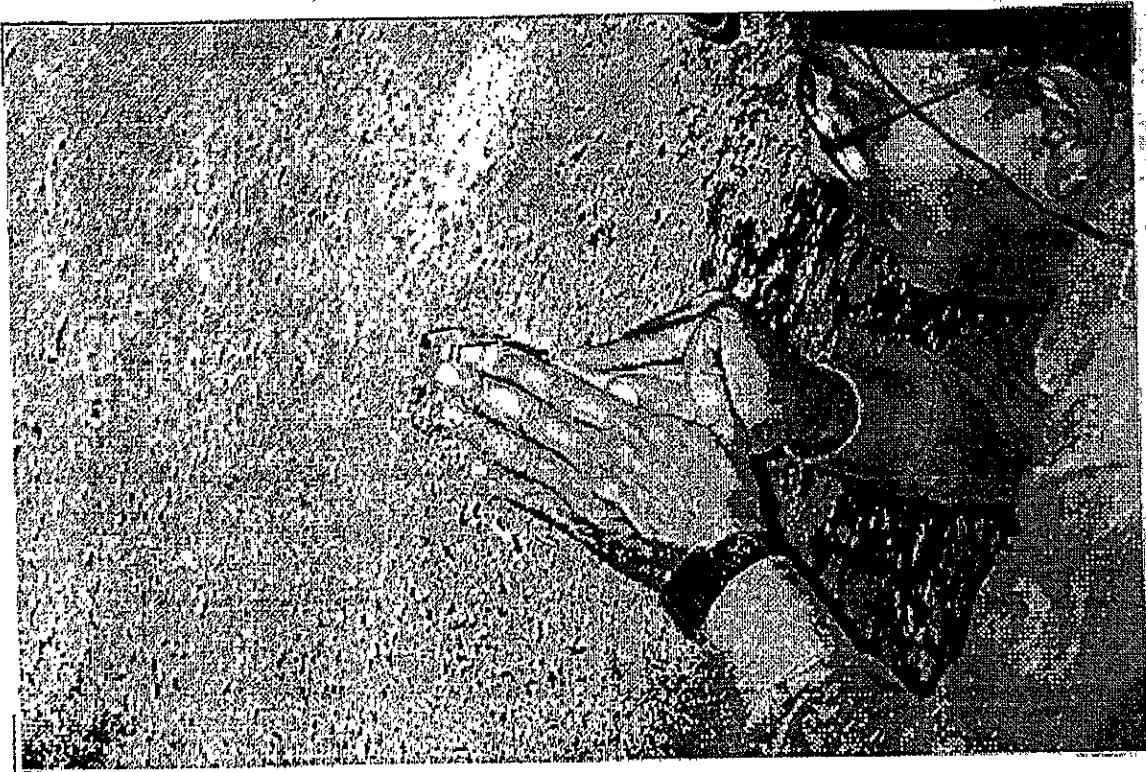
En el segundo capítulo se analizan las fuerzas de origen mecánico, en el tercero las de origen eléctrico y en el cuarto los mecanismos de tipo bioquímico que conducen a la formación de la capa de sedimento.

En el quinto capítulo se mencionan los cálculos del factor de fricción en el acueducto Chapala-Guadalajara basándose en los resultados de campo obtenidos por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, mientras que el sexto capítulo está dedicado a explicar los métodos de limpieza que se pueden aplicar a la tubería. Las conclusiones quedan asentadas en el séptimo capítulo.

CAPÍTULO II.

FUERZAS DE ORIGEN MECÁNICO QUE PROPICIAN LA MIGRACIÓN RADIAL DE LAS PARTÍCULAS ARRASTRADAS POR EL FLUJO EN ACUEDUCTOS.

En inspecciones al interior de las tuberías del acueducto Chapala-Guadalajara se encontró que una capa de partículas muy finas recubría totalmente el interior de la tubería, como se observa en la siguiente figura. Dicha capa no es muy gruesa pero presenta una superficie rugosa y áspera, capaz de aumentar significativamente la pérdida de carga por fricción. Aparentemente, debe su existencia a material fino acarreado desde el Lago de Chapala.



Limpieza con espátula

Figura 1. Aspecto del material que cubre las paredes del Acueducto Chapala - Guadalajara.

Por su parte, el acueducto que abastece a la ciudad de Tijuana toma el agua del río Colorado que arrastra diversos minerales. Las paredes de este acueducto presentan incrustaciones de limo arcilloso.

En la literatura técnica se describen fuerzas de deriva de distinto origen capaces de producir la migración radial de las partículas, entre las que se encuentran la sustentación debida tanto al esfuerzo cortante como a la rotación de la partícula, el arrastre viscoso y la fuerza de Coriolis.

A continuación se analiza cada una de esas fuerzas y sus posibilidades de contribuir al fenómeno observado.

1) Fuerza de sustentación debida al cortante.

Segré y Silberberg [31], por medio de varios experimentos, mostraron que las partículas suspendidas en movimiento dentro de un tubo vertical con un fluido donde se tenía establecido un flujo de Poiseuille, emigraban radialmente hacia una región anular situada a 0.6 veces el radio del tubo. A pesar de tener información estadística valiosa, existía cierta incertidumbre en la trayectoria de algunas partículas.

Para subsanar dicha incertidumbre, Jeffrey y Pearson [20], desarrollaron un método consistente en fotografiar la trayectoria de algunas partículas dentro de un tubo vertical. El líquido usado para el experimento fué una solución de agua y glicerina. El flujo dentro del tubo era estacionario y laminar. Por su parte, las partículas eran esferas de polimetilo-metacralito con un diámetro aproximado de 1/8 de pulgada.

Cuando las partículas tenían flotabilidad neutra, se confirmó lo encontrado por Segré y Silberberg [31] en su experimento : Si el flujo era hacia arriba, las partículas emigraban hacia la pared del tubo; en un flujo hacia abajo, emigraban hacia el eje del tubo. Por otra parte, si las partículas eran ligeramente más densas que el fluido, emigraban rápidamente hacia la pared del tubo en un flujo hacia abajo y hacia el eje del tubo en un flujo hacia arriba. En otras palabras, cuando el movimiento de las partículas no se opone al flujo, entonces éstas se mueven hacia la pared; por el contrario, cuando el movimiento de las partículas es en contra del flujo, aquellas migran radialmente hacia el eje.

Las partículas en el tubo vertical no caen con una velocidad de caída libre v_f cuando el flujo es hacia abajo, sino con una velocidad relativa $v_r = v_f(1 - r^2)$, donde r es la posición radial de la partícula. Por lo tanto, cuando $r = 1$ (en la pared) $v_r = 0$ y como la velocidad del flujo es cero en la pared, no hay movimiento de las partículas respecto del tubo.

Finalmente, Saffman [29]-[30] - con base en resultados anteriores y en resultados propios - llegó a la conclusión de que la fuerza de sustentación debida al cortante es :

$$F_L = 6.46\mu V_m a^2 G^{1/2} / \nu^{1/2} \quad (1)$$

donde G es el gradiente de velocidad; V_m velocidad media; a , radio de la partícula; μ , viscosidad dinámica; ν , viscosidad cinemática.

En el análisis de Saffman [29]-[30], el origen de coordenadas se mueve con la partícula, por lo que el movimiento es estacionario. Siguiendo a Segré y Silberberg [33], los ejes x e y se localizan dentro del tubo en dirección transversal, mientras que el eje z se sitúa perpendicularmente a ellos en el eje del tubo.

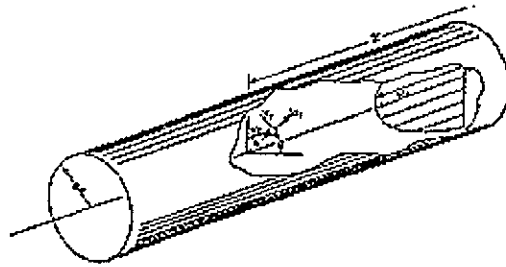


Figura 2. Ejes de coordenadas en un tubo.

La fuerza F_L tiene como condición suficiente que :

$$Re_p = \frac{2aV_m}{\nu} \ll 1 \quad (\text{Número de Reynolds de deslizamiento})$$

$$\text{Re}_G = \frac{4a^2 G}{\nu} \ll 1 \quad (\text{Número de Reynolds del cortante})$$

$$\text{Re}_\omega = \frac{4a^2 |\omega|}{\nu} \ll 1 \quad (\text{Número de Reynolds de rotación})$$

Así como :

$$\text{Re}_G \gg \text{Re}_p^2 \quad ; \quad \text{Re}_\omega \gg \text{Re}_p^2$$

i.e., se necesita que la viscosidad sea grande, lo que implica que la velocidad V_m sea pequeña.

Saffman [29] introduce una coordenada forzada donde :

$$\tilde{r} = S \bar{r}$$

$$\bar{r} = (x, y, z)$$

donde $S \rightarrow 0$ cuando $\nu \rightarrow \infty$.

El factor S se determina por la condición de que los términos viscoso y de inercia deben ser de un orden comparable, i.e. :

$$\nu S^2 = 1 \quad , \quad S = \nu^{-1/2}$$

Para el caso del orden más bajo (es decir, cuando $\nu \rightarrow \infty$), la fuerza en la partícula es el arrastre de Stokes :

$$D = 6 \pi \mu a V_m$$

(Tomado de Schlichting, [31]).

Si V_m es muy grande, F_L es inválida porque los cálculos realizados por Saffman [29] para obtener la fuerza de sustentación requieren - como se observa en los párrafos anteriores - que :

$$V_m / (\nu G)^{1/2} \ll 1$$

De esta manera, el resultado no proporciona la sustentación sobre una esfera moviéndose a través de un fluido cuando existe un cortante pequeño donde :

$$G \ll \nu / V_m^2$$

La solución de Saffman [29] está basada en los resultados obtenidos por Stokes y Oseen para el flujo paralelo sobre una esfera.

La solución de Stokes, como se observa en la figura 3, sólo se aplica a los casos en que $Re < 1$ (Schlichting, [31]).

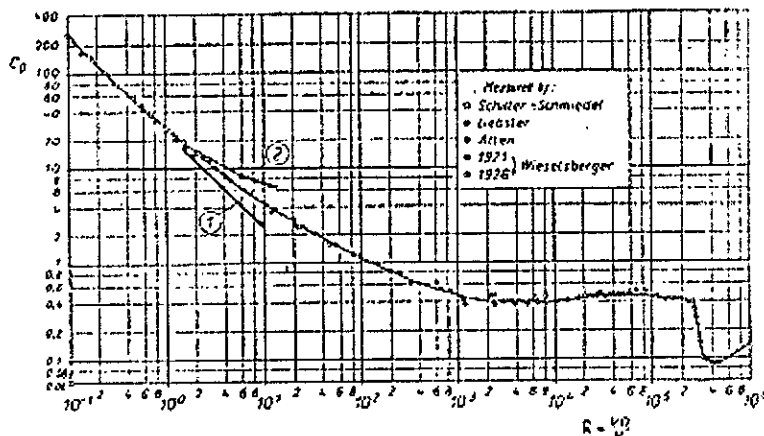


Figura 3. Gráfica de Re vs. C_d para esferas.
 Curva (1), resultados de Stokes.
 Curva (2), resultados de Oseen.
 (Schlichting, [31])

A continuación se analiza si estas condiciones se cumplen para el caso del acueducto Chapala - Guadalajara.

Supóngase que $a = 10^{-6}$ m. La velocidad media del fluido V_m puede tomar valores entre 0.433 m/s y 1.732 m/s, dependiendo del número de bombas

utilizadas. El valor de v será tomado como 1×10^{-6} . Entonces, el número de Reynolds de desplazamiento puede tomar valores de :

$$Re_p = 0.866 \text{ y } Re_p = 3.464.$$

Es decir, que para el caso $V_m = 0.433 \text{ m/s}$, $Re_p = 0.866$ es un poco menor que 1. Por otro lado si $V_m = 1.732 \text{ m/s}$, tenemos que $Re_p = 3.464$ es mayor que 1. Entonces, para el caso de Re_p , una de las condiciones de Karnis et.al., [21] no se cumple. Ahora veremos que ocurre con el resto de las condiciones.

Para ello, se utilizará el perfil de velocidades para flujo turbulento en una tubería :

$$U = V_m [1 + 1.43 \sqrt{f} + 2.15 \sqrt{f} \log (1 - r/R)]$$

donde,

R , radio del tubo (1.05 m).

r , posición de la partícula.

f , factor de fricción.

(Tomado de Mott, [25]).

Entonces, puesto que $G = \frac{\partial U}{\partial r}$, resulta :

$$G = - \frac{2.15 V_m \sqrt{f} \log e}{R - r} \quad (\text{dirigido hacia el eje del tubo}),$$

substituyendo,

$$Re_G = \frac{3.73498 \times 10^{-6} V_m \sqrt{f}}{R - r}$$

Cuando la partícula está cerca de la pared, $r \approx R$ y $Re_G \rightarrow \infty$.

La velocidad de rotación de la partícula puede escribirse como :

$\omega' = G/2 \cos\theta$ (θ , coordenada esférica).

Entonces :

$$\text{Re}_\omega = \frac{1.86749 \times 10^{-6} V_m \sqrt{f} \cos \theta}{R - r}$$

Cuando $r \approx R$, se tiene que $\text{Re}_\omega \rightarrow \infty$.

Se sabe que el número de Reynolds representa la razón adimensional de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas. Un número de Reynolds pequeño indica que las fuerzas viscosas predominan, mientras que un valor grande del número de Reynolds indica que dominan las fuerzas de inercia (Binder, [3]). Entonces, puede decirse que cuando Re_G y Re_ω tienden a ∞ , el gradiente G es el término dominante. De esta manera, las condiciones necesarias para que (1) sea válida no se satisfacen para el caso del acueducto.

2) Arrastre viscoso :

$$F_d = 6 \pi \mu a V_m \quad (2)$$

La expresión (2) tiene validez cuando $\text{Re}_p \ll 1$ y $\ell_m/a \ll 1$ donde ℓ_m es la trayectoria libre media de la partícula (Soo y Tien, [34]). Como se mencionó anteriormente, Re_p toma valores de 0.866 y de 3.464 para valores de V_m de 0.433 m/s y 1.732 m/s, respectivamente. Debido a que 0.866 no es mucho menor que 1, en este caso la fórmula (2) no puede aplicarse.

3) Fuerza de sustentación debida al giro de la partícula :

$$F_s = \pi \rho a^3 \bar{\Omega} \times \bar{V}_m \quad (3),$$

donde Ω es la velocidad angular.

Esta fuerza se origina por efectos inerciales cerca de la partícula. Se ha sugerido que (3) puede explicar la migración radial de partículas, especialmente para aquellas que tienen flotabilidad neutra. Sin embargo, se ha encontrado que

partículas que no presentan giro alguno también experimentan una fuerza de sustentación. (Lawler y Lu, [22]).

4) Fuerza de Coriolis debida a la rotación de la Tierra.

La razón adimensional de las fuerzas de inercia a las fuerzas de Coriolis es el número de Rossby. En un flujo a través de una tubería es igual a :

$$R_o = \frac{V_m}{2 \omega d \sin \alpha} \quad (4),$$

donde $\omega = 7.3 \times 10^{-3}$ rad/s es la velocidad angular de la Tierra (Ingard y Kraushaar, [19]), d es el diámetro de la tubería y α es la latitud.

Si el número de Rossby es lo suficientemente grande, la rotación terrestre no afecta al flujo dentro de la tubería (Benton, [1]).

En el Acueducto Chapala - Guadalajara se tiene un diámetro de 2.10 m y la latitud es aproximadamente 20° . Por otro lado la velocidad del flujo, dependiendo del número de bombas varía de 0.433 m/s (una bomba) a 1.732 m/s (4 bombas).

El número de Rossby, calculado según la expresión (4), tendría valores de $R_o = 4.13 \times 10^3$ y $R_o = 1.65 \times 10^4$.

Para el caso del Acueducto Río Colorado - Tijuana, se tienen tres diámetros distintos de tuberías : $d_1 = 60'' = 1.524$ m para concreto, $d_2 = 54'' = 1.3716$ m, acero y $d_3 = 48'' = 1.2192$ m, también acero. Para estos diámetros rigen las siguientes velocidades de flujo : $v_1 = 1.94$ m/s, concreto; $v_2 = 1.8$ a 1.9 m/s, acero, y $v_3 = 1.0$ a 1.5 m/s, acero. Entonces para $\alpha = 32^\circ$ (latitud de Tijuana) los números de Rossby serán : $R_o = 0.1645394 \times 10^3$, concreto; $R_o = 0.1696282 \times 10^3$, acero ($v_2 = 1.8$ m/s); $R_o = 0.179052 \times 10^3$, acero ($v_2 = 1.9$ m/s); $R_o = 0.1060176 \times 10^3$, acero ($v_3 = 1.0$ m/s); $R_o = 0.1590265 \times 10^3$, acero ($v_3 = 1.5$ m/s).

En fenómenos oceanográficos y meteorológicos, donde la rotación terrestre es importante, el número de Rossby es del orden de 10^{-1} . Por lo tanto, puede suponerse, de acuerdo con los valores encontrados, que la fuerza de Coriolis

puede despreciarse a la hora de considerar la migración de partículas dentro del acueducto (Benton, [1]).

De acuerdo con lo observado en los puntos (1) al (4), las características de operación del acueducto no satisfacen las condiciones de ninguna de las fuerzas de origen mecánico propuestas para explicar la migración radial de las partículas hacia la pared del tubo. Por lo que fue necesario buscar el origen de este fenómeno en fuerzas de tipo electrostático, reacciones químicas o procesos biológicos. Tales estudios se resumen en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO III. FUERZAS DE ORIGEN ELÉCTRICO.

La electroforesis, es decir, el transporte de partículas cargadas a través de un campo eléctrico (Diccionario Enciclopédico Universal, [9]), es un mecanismo alternativo de depositado de partículas. En el caso presente, la electroforesis depende de la presencia de partículas cargadas (o polarizadas) y de un campo eléctrico.

Las partículas y otras superficies inmersas en un líquido se cargan eléctricamente debido a la absorción de iones por la superficie o por ionización de grupos de superficies. El intercambio de cargas tiene lugar entre la superficie de la partícula y el líquido. El establecimiento de la carga en la partícula se compensa por otra carga de signo contrario establecida en las capas adyacentes de líquido. La carga en la superficie de la partícula, rodeada por una coraza de carga de signo contrario, constituye una doble capa electrostática (figura 4).

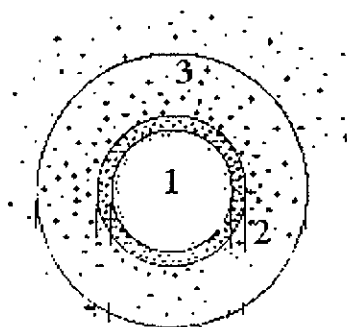


Figura 4. Partícula cargada.

- 1.- Partícula cargada negativamente.
- 2.- Capa de iones que se adhieren a la partícula.
- 3.- Capa difusa de iones.

La carga que compensa, establecida en el líquido que rodea a la partícula, se divide en dos regiones : 1) una capa compacta interior de iones absorbidos que se adhieren a la partícula; y 2) una capa externa, difusa, de iones. La frontera

entre las dos regiones es el plano cortante. Cuando la partícula se mueve a través del líquido, o éste fluye sobre aquella, los iones en la capa compacta se mueven con la partícula, mientras que los iones en la capa difusa se mueven con el líquido. (Donovan et. al., [10]).

La influencia de las variables del sistema en la doble capa electrostática, se refleja en forma aproximada en la siguiente expresión :

$$\eta = \left(\frac{\epsilon_0 D k T}{2 n_0 e^2 v^2} \right)^{1/2}$$

donde,

η , espesor de la doble capa

$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Jm}$, permitividad del vacío

D , constante dieléctrica del medio

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}^\circ$, constante de Boltzmann

T , temperatura (K°)

n_0 , concentración del electrólito

$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, carga del electrón

v , valencia del catión (Mitchell, [24]).

Esta relación muestra que el espesor de la doble capa varía inversamente con la valencia y la raíz cuadrada de la concentración y directamente con la raíz cuadrada de la constante dieléctrica y la temperatura ; los otros factores permanecen constantes.

Dado que las fuerzas repulsivas electrostáticas, de largo alcance, dependen de la cantidad de traslapes o interacciones entre dobles capas adyacentes, pueden estimarse las influencias probables en el comportamiento que resultan de los cambios en la composición del sistema. En general, entre más espesor tenga la capa difusa de iones, menor será la tendencia de las partículas en suspensión a flocularse, i.e. a formar grumos (Mitchell, [24]).

Entre los factores adicionales que influyen en el espesor de la doble capa, el más importante es el efecto del pH, o potencial hidrógeno. El pH se define

como $\text{pH} = -\log \text{H}^+$, i.e. la concentración de iones de hidrógeno. Si $\text{pH} < 7$, la solución es ácida ; si $\text{pH} > 7$ es básica (Luna et. al., [23] y Puig, [26]). El pH juega un papel muy importante en el comportamiento de las suspensiones de arcilla. Un pH bajo conduce en general a la floculación de la suspensión. Las suspensiones estables o dispersiones de partículas de arcilla, requieren a menudo condiciones de pH alto (Mitchell, [24]).

El mismo fenómeno de la formación de capas de iones puede aplicarse a las paredes del tubo en forma tentativa. Cuando las partículas y la pared tienen cargas de signo contrario, aquellas se adhieren a la tubería. Este mecanismo de migración de partículas queda en el aire, a menos que se encuentre un dispositivo que permita explicar la formación de un campo eléctrico generado por el flujo del agua a través del Acueducto. En un artículo elaborado por Walmsley [38] se menciona la generación de un potencial y campos electrostáticos en fluidos dentro de tuberías de plástico, empleados en la industria petrolera.

Se han encontrado diversos niveles de voltaje inducido en tuberías de metal enterradas que están localizadas junto a líneas de transmisión eléctrica sobrecalentadas. Para atenuar esta anomalía, generalmente se aterriza la tubería (Dabkowski, [6]).

Cuando los minerales existentes en el agua, los cuales están hechos de iones moleculares cargados positiva y negativamente, se encuentran sujetos a cambios de temperatura y presión, muchos de ellos se precipitarán fuera de su estado disuelto y formarán en las paredes de la tubería capas de sedimento. Naturalmente, la diferencia en su carga eléctrica es lo que los atrae entre sí, e.g. los iones cargados negativamente son atraídos a los iones cargados positivamente. Esta formación, que tiene una textura sólida de calcita frágil, se conoce en la industria como estructura cal/escama y obviamente causa problemas costosos como pérdida de transferencia de calor y falla de equipo (Catálogo de "Superior manufacturing division magnatech corporation.", [5]).

Debido a la ausencia de datos obtenidos mediante una medición del campo eléctrico en los acueductos Río Colorado - Tijuana y Chapala - Guadalajara, no es posible actualmente decidir si las fuerzas eléctricas tienen o no que ver con el problema del sedimento en las tuberías.

CAPÍTULO IV. MECANISMOS BIOLÓGICOS.

Tanto la explicación por fuerzas mecánicas como por eléctricas, para que sean la causa que provoca que las partículas se adhieran a la pared de los acueductos, han fallado. A continuación se analizará que tanto ayudan los procesos biológicos a esclarecer este fenómeno.

Durante el mes de julio de 1997, personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en virtud de un convenio con la Comisión Nacional del Agua (CNA), realizó una investigación en torno a la formación de depósitos de material en las paredes del acueducto Chapala-Guadalajara. El equipo fué coordinado por el Dr. Jorge Luis de Victorica Almeida, investigador del Instituto en el área de Ingeniería Ambiental. A continuación se resumirá el informe que fué presentado a la CNA (De Victorica et.al., [7]).

El Dr. de Victorica y su equipo tomaron muestras del agua y del material depositado en las paredes. Primero analizaron el tramo a gravedad desde el Canal del Guayabo (km 28 + 285) hasta el km 41 + 990 (poco antes del canal de llegada a la planta potabilizadora). La segunda fase de inspección se realizó en el tramo a bombeo desde el km 9 + 000 hasta el 14 + 600. Las muestras de agua tomadas se sometieron a análisis fisicoquímicos cuantitativos para averiguar que tan corrosivas son (i.e. su agresividad), y su incrustabilidad.

Los análisis fisicoquímicos del material depositado se enfocaron a la identificación de los compuestos que forman las biopelículas. En los análisis biológicos de tipo cualitativo del agua y del material, se centró la atención en los seres microscópicos que suelen encontrarse en las biopelículas.

Se realizó una inspección ocular de los depósitos en las paredes del acueducto por parte de de Victorica et.al. [7], donde se encontraron pequeñas variantes relacionadas al aspecto (arenoso, esponjoso o escamoso), consistencia (duro, blando o gelatinoso) y color (entre blanquecino y café oscuro) del material depositado.

En la tabla N° 1 se muestran los resultados del análisis fisicoquímico, efectuado por los autores mencionados, a las muestras de agua.

Si se comparan los niveles de concentración del canal del Guayabo con los del canal de llamada, se observa que dichos niveles no cambian demasiado, conforme el agua fluye hacia la planta potabilizadora.

El último parámetro de la tabla es el índice de Langelier. A continuación se explicará en qué consiste.

Tabla No. 1 Análisis Físico-Químicos de las muestras de agua Adueducto Chapala - Guadalajara

Parámetros (mg/l)	Sitio de muestreo	
	Canal del guayabo	Canal de llamada
Temperatura (°C)*	22	22
pH*	6.72	7.56
Oxígeno Disuelto*	7.5	8.5
Conductividad (µS/cm)	863	922
Alc.Fenolf.(como CaCO ₃)	27.5	30.6
Alc.Tot. (como CaCO ₃)	359	356
Dureza Tot. (como CaCO ₃)	223.2	216
Dureza Ca (como CaCO ₃)	118.8	129.6
Dureza Mg (como CaCO ₃)	104.4	86.4
ST	715	630
STF	20	35
STV	695	595
SST	42	32
SSF	8	4
SSV	34	28
SDT	673	598
SDF	12	31
SDV	661	567
Índice de Langelier	-0.53 (corrosivo)	0.36 (incrustante)

*Análisis de campo

Tabla N° 2. Análisis elemental en muestras de material adherido.
ACUEDUCTO CHAPALA-GUADALAJARA.

SITIO DE MUESTREO (km) Y CONSISTENCIA DE LA MUESTRA.	CONCENTRACIÓN EN g/Kg.			
	Si	Fe	Ca	Mg
28 + 285. lado derecho, material blando.	0.66	6.07	6.91	2.92
28 + 285 techo, material duro	0.64	8.24	301	15
28 + 285 piso, material blando.	0.24	7.99	11	2.02
28 + 285 piso, material blando.	1.34	5.65	278	12.9
33 + 500 piso, material blando.	2.11	11.5	64	6.16
33 + 500 junta, material duro.	0.46	348	106	2.44
33 + 500 lado derecho, material duro.	0.58	7.02	307	14.5
33 + 500 codo, material blando.	0.78	0.62	21	1.41
33 + 500 lodo piso, material blando.	2.06	65	---	8.96
41 + 990 techo, material escamoso.	2.42	3.2	170	4.67
41 + 990 piso izquierdo, material duro.	1.57	27.9	784	55.1
41 + 990 piso, material blando.	0.45	6.94	192	12.3
41 + 990 pared izquierda, material escamoso.	0.91	2.76	86.6	2.8

El contenido de calcio en el agua se emplea para medir la tendencia del agua para corroer, ya sea metal o concreto, o formar incrustaciones. Para este propósito, se asignan valores al contenido de calcio y a la alcalinidad del agua. Se hacen ajustes para la temperatura y para el efecto total de los sólidos disueltos. El valor resultante se compara con el pH del agua observado para determinar si ésta es corrosiva o incrustante. Este es, a grandes rasgos, el índice de Langelier (Gagliardi y Liberatore, [14]).

El agua es corrosiva cuando el índice de Langelier (i.e., el índice de saturación del carbonato de calcio) es negativo. El análisis del agua mostrará en general, aunque no siempre, un pH menor que 7 (ácido). El agua es incrustante cuando el índice de Langelier es positivo. El pH para este caso será mayor que 7 (básico).

A pesar de que el índice de Langelier del canal del Guayabo sugiere que el agua que por ahí fluye es corrosiva, no se encontraron vestigios de corrosión en la tubería. Esto se debe a que el pH y, por tanto, el índice de Langelier no permanecen constantes.

La concentración de los sólidos disueltos en el agua aumenta cuando ésta fluye del canal de llamada al del Guayabo. De Victorica et.al. [7] suponen que este aumento se debe a la actividad biológica que se desarrolla entre estos dos lugares.

En la tabla N° 2 se muestran los resultados del análisis del material adherido a las paredes del acueducto. Las concentraciones de silicio, fierro, calcio y magnesio tienen relación con la presencia de algunos microorganismos.

Los resultados de los análisis biológicos del agua y del material adherido a las paredes, muestran una gama abundante de microorganismos. Se encontraron bacterias intestinales, como coliformes totales, fecales, enterococos y enterobacterias; bacterias patógenas y oportunistas; levaduras y hongos filamentosos; diatomeas con esqueletos de sílice, y protozoarios.

La formación de la biopelícula posiblemente se debe a la abundancia de cristales de sílice en las muestras gelatinosas y escamosas, que se encontraron

en el estrato que está adherido directamente a la pared del acueducto (De Victorica et.al. , [7]).

En las muestras de material adherido se encontraron, además de los ya mencionados, huevos de anfípodos y gasterópodos que se localizaron en la parte exterior de la biopelícula. En otras muestras se encontraron algunas ferrobacterias, las cuales metabolizan el fierro y sus compuestos que se hallan en los sustratos.

La primera capa de la biopelícula está formada por diatomeas y arcillas ya presentes en el agua que se adhieren a la tubería. Esta capa sirve como sustrato al cual se le van agregando minerales (Ca, Fe, Mg), materia orgánica y microorganismos como bacterias y hongos filamentosos. Este material ya depositado atrae a otros seres como levaduras, hongos, protozoarios, moluscos y crustáceos, con lo que aumenta en consideración el espesor de la biopelícula.

Los primeros microorganismos que entran a formar parte de la biopelícula, entran al sistema de distribución donde quedan atrapados en regiones donde el agua fluye a menor velocidad, que es donde existen sedimentos o depósitos de minerales. Algunos de estos microorganismos se juntan entre sí mediante las fuerzas de Van der Waals (i.e., las fuerzas de atracción intermoleculares). Otros tienen apéndices con los que se fijan al sustrato ya existente - mencionado en el párrafo anterior. Estos apéndices segregan una sustancia de apariencia gelatinosa que forma una capa que protege y sostiene a la comunidad de microorganismos. Esta capa constituye un atractivo especial para los cationes como Ca, Zn, Fe o Mg, sedimentos y células microbianas.

La biopelícula va creciendo lentamente al atraer a otros organismos que se alimentan de las excreciones de los microorganismos de la primera capa. De esta manera, se encuentra una gran variedad zoológica en la biopelícula : bacterias, de tipo filamentosos, esférico y enterobacterias; algas, como las diatomeas; hongos filamentosos, levaduras, protozoarios y nemátodos.

En las siguientes figuras se muestran algunos ejemplos de los diversos organismos que forman la biopelícula del acueducto.

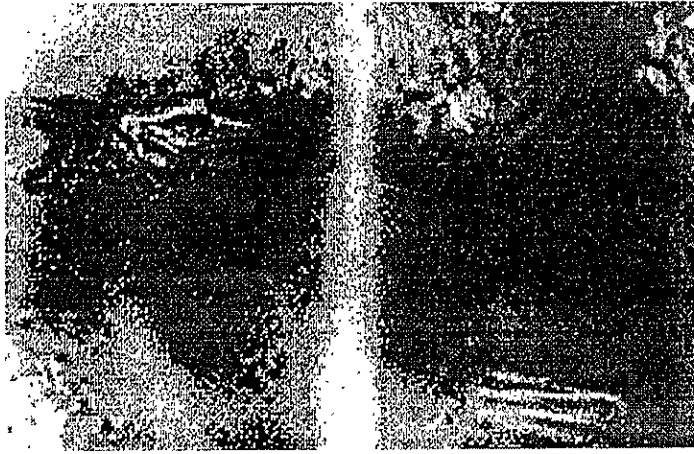


Figura 5. Diatomeas. *Navicula* (superior izquierda) y *Fragilaria sp.* (inferior derecha).

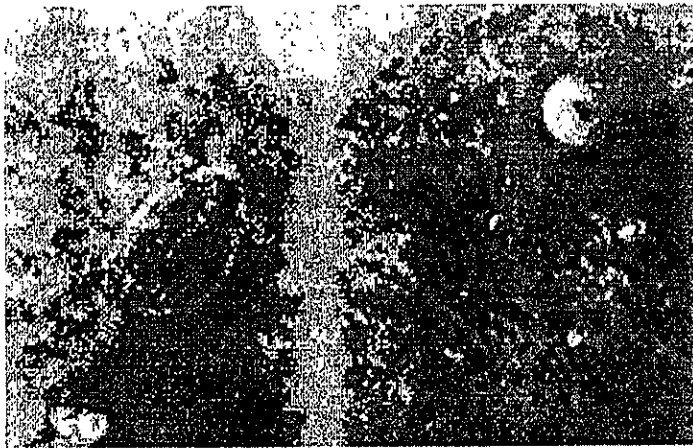


Figura 6. Diatomeas. *Navicula sp.* (centro izquierda) y *Cyclotella sp.* (superior derecha).

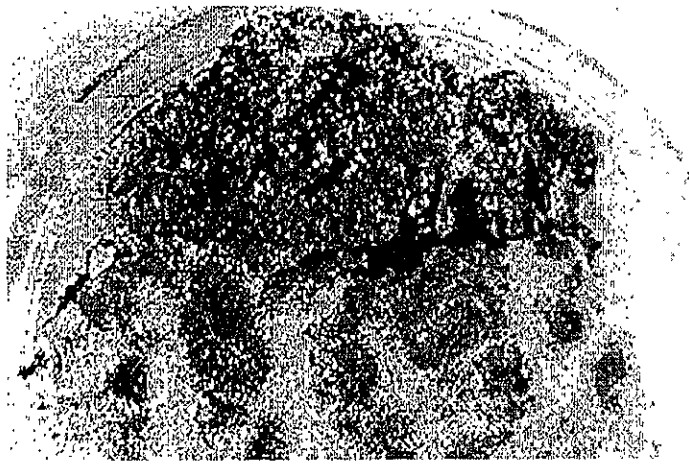


Figura 7. Ejemplo de la capa mucilaginosa que permite la adherencia de partículas suspendidas en el agua.

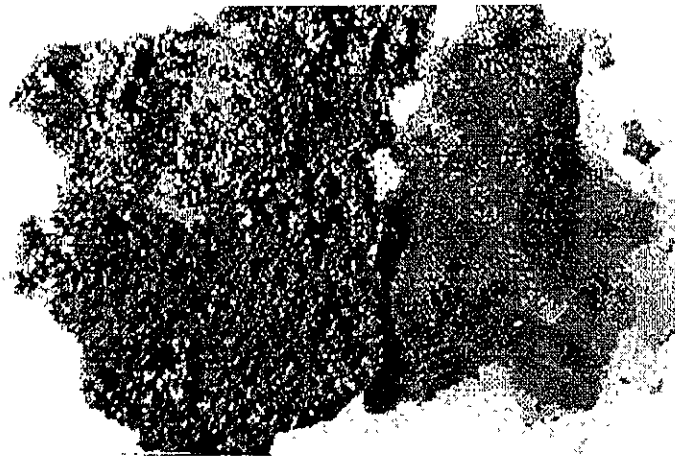


Figura 8. Otro ejemplo de la capa mucilaginosa. Las partículas que se adhieren a ella, sirven como sustrato para los microorganismos.

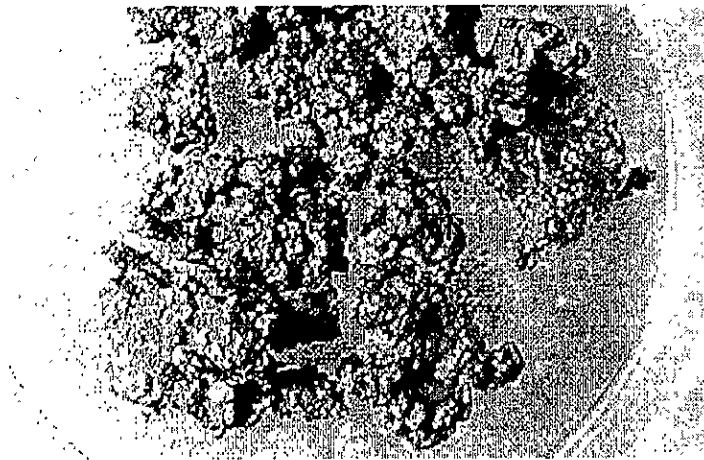


Figura 9. Crustáceos anfípodos *Hyalella azteca* sobre la biopelícula.

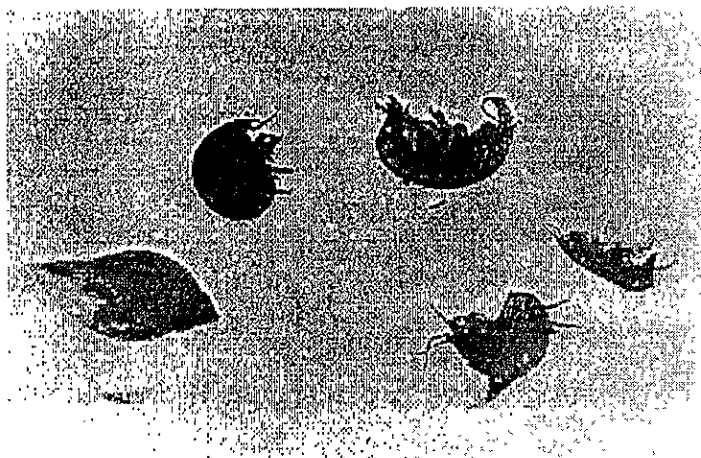


Figura 10. Algunos crustáceos y moluscos extraídos de la biopelícula.

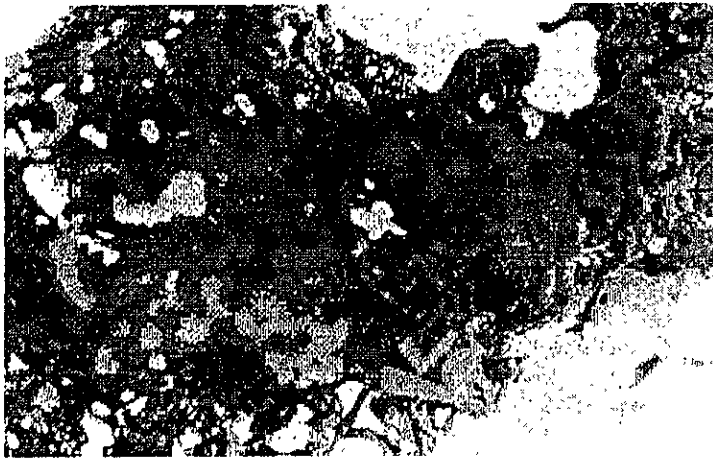


Figura 11. Ejemplo de los conductos tubulares construídos en la biopelícula por los crustáceos.

Para evitar la formación de la biopelícula, de Victorica et.al. [7] recomiendan el retiro o el inactivar a los microorganismos antes de que entren al acueducto. Asimismo, estos autores sugieren realizar estudios para analizar la posibilidad de aplicar diversos procesos para desinfectar el agua, así como potabilizar el agua mediante una planta en la zona del lago de Chapala.

Entre los procesos que se mencionan se encuentran la aplicación de algunos agentes químicos que impiden la formación de la biopelícula y propician que los precursores de sedimentos se agrupen en flóculos que se decantan en el fondo del acueducto, los cuales son después retirados mediante cualquier procedimiento de limpieza (Véase el capítulo VI).

De acuerdo al análisis efectuado por de Victorica et.al. [7], se puede afirmar que el mecanismo que permite la formación de una capa de sedimentos en el interior del acueducto Chapala-Guadalajara, es de origen biológico y no involucra a ninguna fuerza de origen mecánico o eléctrico como en un principio se había pensado.

CAPÍTULO V. PÉRDIDA DE CARGA EN EL INTERIOR DEL ACUEDUCTO CHAPALA-GUADALAJARA.

El acueducto Chapala-Guadalajara, que entró en operación en su tramo a bombeo en mayo de 1990 y en su tramo a gravedad en septiembre de 1991, ha sido sometido a diversas pruebas para determinar su caudal Q , su factor de fricción f y su número de Reynolds Re .

Las medidas han sido tomadas sistemáticamente a partir de octubre de 1994. Las pruebas subsiguientes han sido las de noviembre de 1995 y las de abril de 1996. Los últimos parámetros se han obtenido de las medidas de noviembre del año 1996.

En los párrafos siguientes se muestra una revisión del estado del flujo en el interior del acueducto.

FACTOR DE FRICCIÓN PARA EL ACUEDUCTO.

Al graficar los resultados de las mediciones realizadas en el acueducto -véase tabla N° 3-, en un diagrama $\log f$ vs $\log Re$, se esperaba encontrar un comportamiento como el descrito para flujo turbulento. Es decir, se suponía que el flujo en el acueducto se comportaría como si tuviera lugar en un tubo rugoso. Sin embargo, al graficar se observó que lo esperado no se presentaba, pues los puntos se arreglan en forma distinta.

Como se puede ver en la figura 12, el comportamiento del factor de fricción del acueducto no sigue los lineamientos del diagrama de Moody. Se hace necesario efectuar un análisis de flujos viscosos para obtener más información.

Tabla N° 3. Datos de campo recabados en noviembre de 1996.
 ACUEDUCTO CHAPALA-GUADALAJARA.

Q	Re	f
3 771	2286370	0.0306
4.085	2476750	0.0296
4.943	2996960	0.0230
4.991	3026070	0.0232
5.006	3035160	0.0241
5.086	3083660	0.0251
5.561	3371660	0.0240
5.644	3421980	0.0232
5.835	3537790	0.0217
5.882	3566280	0.0211
5.933	3597200	0.0247
5.963	3615390	0.0209
6.664	4040410	0.0209

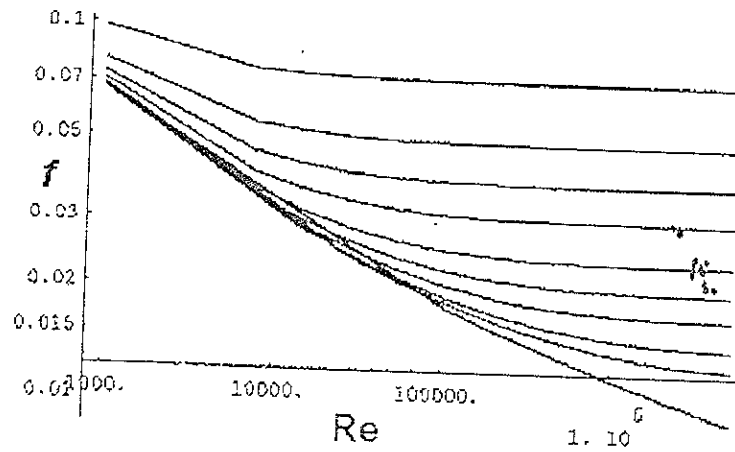


Figura 12. Factor de fricción calculado en el Acueducto Chapala - Guadalajara.

En las siguientes secciones del capítulo se analizarán los distintos tipos de flujo en tuberías, así como sus factores de fricción.

FLUJO DE LÍQUIDOS.

La ecuación general de energía para fluidos es :

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (5)$$

donde,

- h_A representa la energía entregada al fluido (ejemplo : bombeo)
- h_R , la energía extraída (ejemplo : generación hidroeléctrica) y
- h_L la energía disipada (ejemplo : fricción y pérdidas locales).

Una parte de la energía disipada se debe a la fricción que ocurre dentro del fluido. En el caso del flujo en tuberías, la fricción es proporcional a la carga de

velocidad del flujo y al cociente de la longitud y el diámetro del conducto. Esto queda establecido matemáticamente por la ecuación de Darcy .

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

donde,

- h_l , es la pérdida de energía o de carga debida a la fricción
- L , longitud del flujo de corriente
- D , diámetro del tubo
- v , velocidad promedio
- f , factor de fricción.

La ecuación de Darcy puede usarse tanto para flujo laminar como turbulento. La diferencia estriba en la manera de calcular f . (Mott, [25]).

Cuando el flujo es laminar, se puede obtener una relación entre la pérdida de carga y los parámetros medibles del flujo. Esta relación se conoce como la ecuación de Hagen-Poiseuille, donde la pérdida de carga es proporcional a la velocidad :

$$h_l = \frac{32 \mu L v}{\gamma D^2} \quad (7)$$

Los parámetros involucrados son, aparte de los ya mencionados, la viscosidad μ y el peso específico γ . La pérdida de carga en un flujo laminar es independiente de las condiciones de la superficie interior del tubo.

La ecuación (7) es válida únicamente cuando el flujo es laminar, i.e. cuando el número de Reynolds es menor que 2000. Igualando (6) y (7), podemos obtener el valor del factor de fricción :

$$f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = \frac{32 \mu L v}{\gamma D^2}$$

Despejando :

$$f = \frac{64 \mu g}{v D \gamma}$$

pero $\rho = \gamma/g$. Entonces :

$$f = \frac{64 \mu}{v D \rho}$$

como $v = \mu/\rho$, se tiene que :

$$f = \frac{64 \nu}{v D}$$

El número de Reynolds es $Re = \frac{v D}{\nu}$. Substituyendo se tiene finalmente que :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (8)$$

En el caso de flujos turbulentos, también puede utilizarse la ecuación (6). Como el flujo no se comporta siguiendo un patrón establecido, no se puede determinar el valor de f por un cálculo simple, sino que se obtiene de datos experimentales, los cuales muestran que el factor de fricción depende del número de Reynolds Re y de la rugosidad relativa de la tubería, definida como la razón del diámetro D a la rugosidad promedio de la pared del tubo, ϵ .

Para determinar el valor del factor de fricción se puede emplear el diagrama de Moody (figura 13) que muestra en escala log-log la gráfica de Re vs f , con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa D/ϵ (Mott, [25] y Sotelo, [35]).

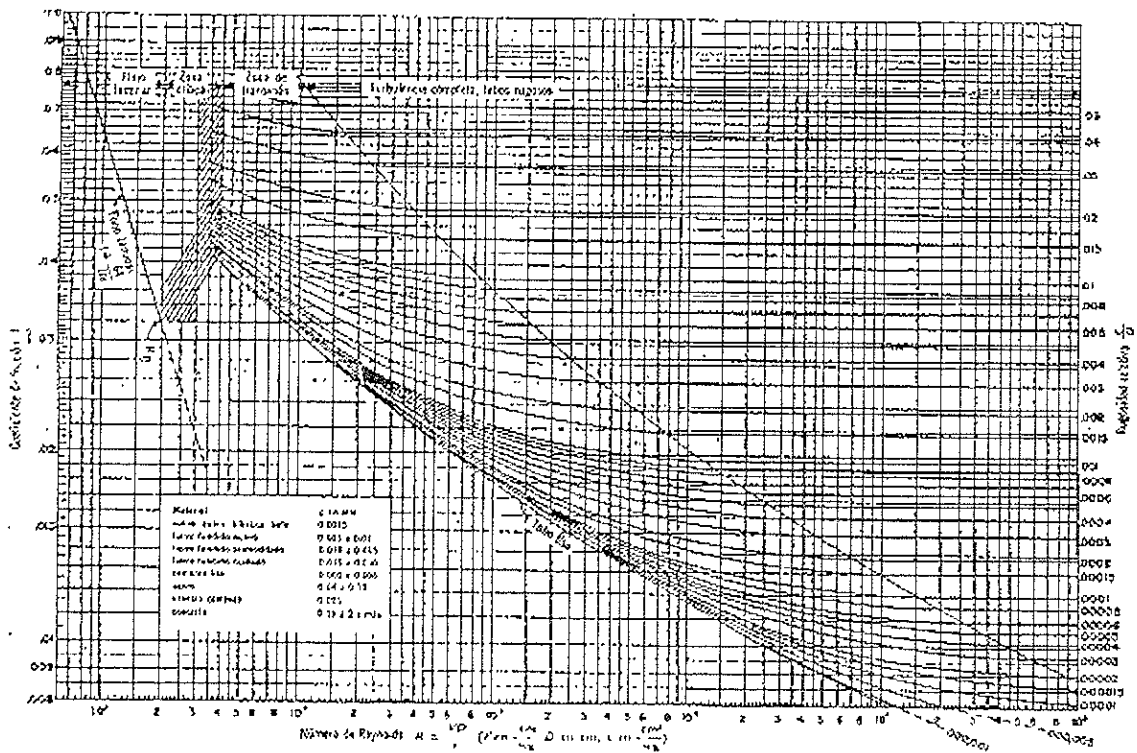


Figura B.3. Coeficiente de fricción para cualquier tipo y tamaño de tubo; diagrama universal de Moody.

Figura 13. Diagrama de Moody
(Tomado de Sotelo [35])

Swamee y Jain [36] desarrollaron una expresión para el factor de fricción para flujo turbulento :

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (9)$$

Para el caso de tubo liso, $\varepsilon/D = 0$, (5) se convierte en :

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (10)$$

(Tomado de Mott, [25]).

FLUJO DE MEZCLAS.

Una mezcla concentrada (lodo) tiene una cantidad considerable de material fino que le imparte una alta viscosidad. El flujo de mezclas en tuberías depende de la interacción entre los sólidos y el líquido así como entre la mezcla y el tubo.

En un flujo homogéneo las partículas sólidas están distribuidas uniformemente a lo ancho de la sección transversal del tubo. Este flujo se encuentra en mezclas con altas concentraciones y tamaño pequeño de las partículas. Las mezclas que se comportan de este modo no tienden a asentarse en un estado de reposo y forman un depósito en presencia de flujo.

En flujo heterogéneo existe un gradiente de concentración a lo largo de la sección transversal del tubo.

Un régimen intermedio ocurre cuando algunas de las partículas están distribuidas homogéneamente, mientras otras lo están de manera heterogénea. Cuando se tienen partículas menores a 35μ y concentraciones relativamente altas, las propiedades del flujo de mezclas dependen de la reología, la cual

consiste en la relación entre el esfuerzo cortante y la correspondiente razón de corte en una mezcla bajo la condición de flujo laminar.

Un fluido newtoniano es aquel que se caracteriza únicamente por la viscosidad. En cambio, un fluido no newtoniano es caracterizado por varios parámetros.

Relaciones entre esfuerzo cortante y la razón de corte para distintos tipos de flujos de mezclas :

Newtoniano	$\tau = \mu \gamma$
Plástico de Bingham	$\tau = \tau_y + \eta \gamma$
Pseudoplástico	$\tau = K \gamma^n$
Pseudoplástico de cedencia	$\tau = \tau_y + K \gamma^n$

donde,

- τ ,es el esfuerzo cortante
- τ_y ,esfuerzo transverso
- γ ,razón de corte
- μ ,viscosidad dinámica (newtoniana)
- η ,viscosidad dinámica (plástica)
- n , índice de comportamiento del fluido
- K , índice de consistencia

(Gandhi, [15]).

La pérdida de carga de una mezcla homogénea depende de las características reológicas de la mezcla. Se puede encontrar flujo laminar en suspensiones no asentadas.

Se define la velocidad de transición como aquella bajo la cual se encuentra flujo laminar (para una mezcla newtoniana, dicha velocidad corresponde a un valor de $Re = 2000$).

En las mezclas que presentan características de plástico de Bingham, la velocidad de transición depende de los números, el de Reynolds y el de Hedstrom :

$$He = \frac{D^2 \rho \tau_y}{\mu^2} \quad (11)$$

El factor de fricción para una mezcla newtoniana en un flujo laminar se calcula según la expresión (8), donde ahora

$$Re = \frac{v D}{\nu_M}$$

ν_M es la viscosidad cinemática de la mezcla.

El factor de fricción para flujo laminar de mezclas con un comportamiento de plástico de Bingham viene dado por (Gandhi, [15]) :

$$\frac{f}{16} = \frac{1}{Re} + \frac{He}{6 Re^2} - \frac{He^4}{3 f^3 Re^8}$$

despejando a f :

$$f^4 - \left(\frac{8 He}{3 Re^2} + \frac{16}{Re} \right) f^3 + \frac{16 He^4}{9 Re^8} = 0 \quad (12)$$

Dependiendo del valor de He , se pueden obtener varias gráficas (Zandi, [39]), como se ilustra en la figura 14 :

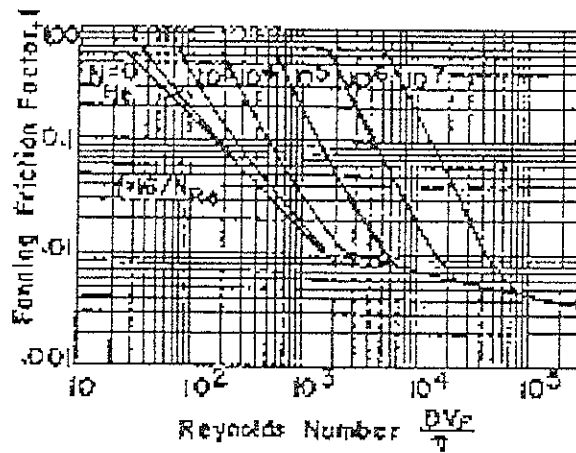


Figura 14. Gráfica de Re vs f' para plásticos de Bingham.

En el caso de mezclas pseudoplásticas, el factor de fricción para flujo laminar viene dado por :

$$f = \frac{16}{Re_p} \quad (13)$$

donde Re_p es el número de Reynolds para una mezcla pseudoplástica :

$$Re_p = 8 \rho D^n V_m^{2-n} \left(\frac{n}{2 + 6n} \right)^n / K \quad (14)$$

El factor de fricción para flujo turbulento de líquidos pseudoplásticos es :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n^{0.75}} \log (Re_p f^{1-n/2}) - \frac{0.4}{n^{1.2}} \quad (15)$$

En estos casos, Re_p depende de las características de la mezcla. En la figura 15 se observa la variación de f , para distintos valores de n , con K fijo (Gandhi,[15]).

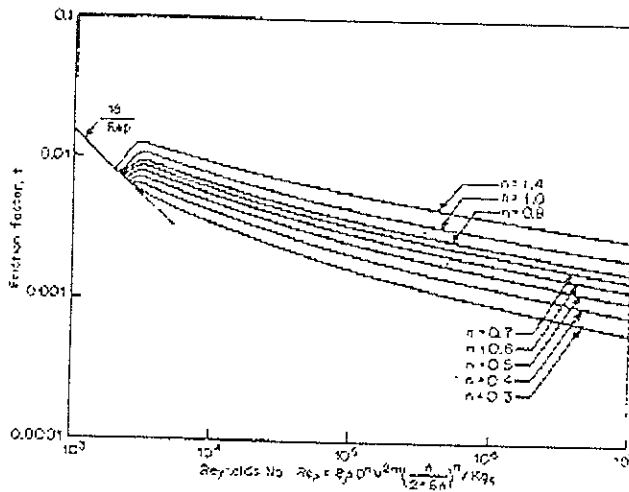


Figura 15. Gráfica de Re vs f para mezclas pseudoplásticas.

Al iniciarse la operación del acueducto Chapala-Guadalajara en 1991, el flujo quedaba clasificado como turbulento en un tubo rugoso. Supóngase que el flujo es laminar e introdúzcase una viscosidad modificada ν_m en (8) de la siguiente manera :

$$f = \frac{64}{\text{Re} \frac{\nu}{\nu_m}} \quad (16)$$

y graficando en log-log a Re vs f con ν / ν_m tomando valores de la forma 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, ..., 0.0002, etc., se observa que los valores medidos en el acueducto caen entre las líneas de $\nu / \nu_m = 0.001$ y $\nu / \nu_m = 0.0005$. Es decir, el flujo dentro del acueducto se comporta como si fuese laminar, lo que a primera vista resulta extraño.

En la figura 16 se muestra el ajuste con mínimos cuadrados para las medidas tomadas. Dicho ajuste se realizó considerando una expresión para f de la forma $f = \frac{C}{\text{Re}}$, donde C es una constante.

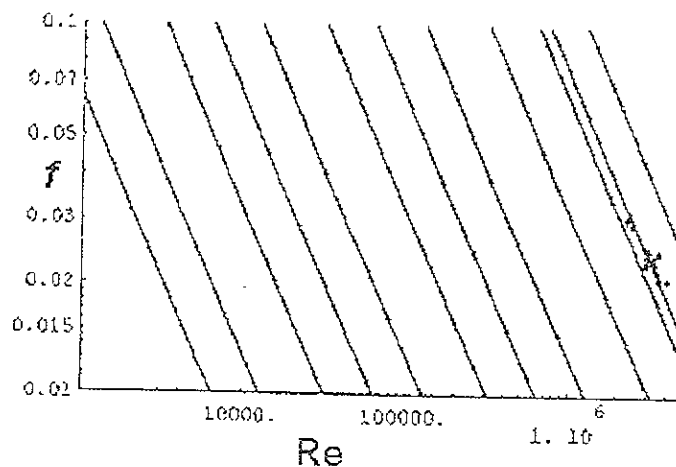


Figura 16. Líneas de la forma $f = \frac{C}{\text{Re}}$, y ajuste con mínimos cuadrados para los datos del Acueducto Chapala - Guadalajara.

La ecuación de la línea obtenida por medio del ajuste es :

$$f = \frac{75270.7}{Re} \quad (17)$$

Igualando (16) con (17) :

$$\frac{64}{Re \frac{\nu}{v_m}} = \frac{75270.7}{Re}$$

Entonces, se tiene que :

$$\frac{64}{\frac{\nu}{v_m}} = 75270.7$$

Despejando y substituyendo a ν como 1×10^{-6} , se tiene que el valor de la viscosidad modificada es de :

$$\nu_m = 1.176 \times 10^{-3} \quad (18)$$

Esta viscosidad es semejante a la reportada para el aceite SAE 30 a una temperatura de 38°C : $\nu = 1.106 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Roberson y Crowe, [27]).

Sin embargo, se puede decir que una de las causas por las que el factor de fricción del acueducto no se comporta de acuerdo al diagrama de Moody, es la existencia de capa de sedimento que cubre sus paredes y cuyo origen se menciona en el capítulo anterior. De ahí la importancia de mantener el acueducto libre de incrustaciones, e.g. para que el gasto Q se aproxime al valor proyectado ($7.5 \text{ m}^3/\text{s}$). En octubre de 1996, Q tenía un valor de $6.664 \text{ m}^3/\text{s}$

Aparentemente, la capa de sedimentos ha llegado a una condición estable, por lo que no se espera que f crezca más ni que se reduzca aún más la capacidad de conducción.

El fluido que circula por el tanque de cambio de régimen y que llega al tanque de entrega, no presenta un aspecto de fluido de alta viscosidad. El comportamiento como flujo laminar probablemente se deba a la existencia de los sedimentos en las paredes de la tubería.

De esta manera, el problema de la existencia del flujo laminar en el acueducto queda abierto a nuevos intentos de explicación, uno de los cuales podía incluir el estudio de la capa límite en las paredes del mismo, así como otras investigaciones.

CAPÍTULO VI. LIMPIEZA DE TUBERÍAS.

Cuando se realiza transporte de líquidos en tuberías, se recomienda en general tener un flujo laminar (siempre que sea posible, lo que en general no se cumple), el cual tiene la desventaja de que los sólidos se acumulan en las paredes de las tuberías y en las válvulas. Es por esto que el sistema de tuberías debe limpiarse regularmente.

A continuación se mencionan dos de los más importantes mecanismos de limpieza de tubería: por medio de "diablos" y por medio de dispositivos magnéticos.

DIABLOS (PIGS).

Se ha obtenido una gran experiencia con el uso de "diablos" limpiadores o pigs. Estos diablos son objetos fabricados con espuma dotados de cepillos, que se mueven a través de las tuberías junto con el flujo mientras van limpiando, sin interrumpir la operación continua del sistema.

Los diablos tienen forma de bala, punta parabólica, base cóncava, y están hechos de espuma de poliuretano de alta calidad y están disponibles en varios tipos de cubierta externa (figura 17).

El poliuretano es un polímero esponjoso que se obtiene a partir de un poliéster que se usa en la fabricación de plásticos, resinas y recubrimientos protectores (Diccionario Enciclopédico Océano, [8]).

Cuando al diablo se le aplica presión neumática o hidráulica, se expande provocando una acción de raspado y sellado en la tubería. Esto elimina las protuberancias y retira el sedimento. Después de su aplicación, la calidad del agua mejora, el gasto tiende a aumentar al reducir la fricción y la turbulencia.

Los diablos tienen una longitud aproximadamente dos veces su diámetro a fin de reducir la posibilidad de que se vuelquen dentro de la tubería. Su diámetro es ligeramente mayor que el de la tubería que van a limpiar, con el objeto de

ejercer un arrastre por fricción entre la superficie exterior del diablo y la pared del tubo.

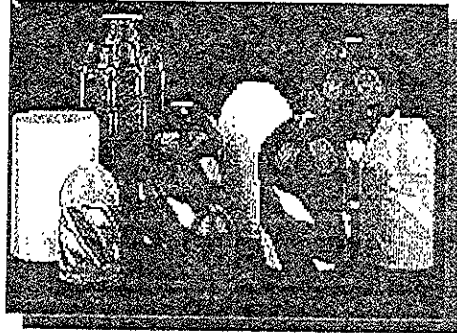


Figura 17. Diablos de poliuretano.

La escala del durómetro A es utilizada para medir la dureza de plásticos parecidos al caucho (figura 18). Por ejemplo, una dureza que varía entre 30 y 40 corresponde a una liga de hule; entre 50 y 60 a una llanta de automóvil y 70 a un tacón de zapato (Harper, [17]).

Los diablos típicos tienen una base cóncava cubierta con poliuretano con una dureza de 90 A -según la escala del durómetro A-, la cual proporciona una superficie máxima selladora trasera para las fuerzas propulsoras del agua transportada.

Las capas externas de los diablos de espuma consisten de espirales de poliuretano de tipo cruzado con una dureza de 90, según la escala anterior. Las espirales añaden resistencia y dan una mayor acción barredora y raspadora en comparación con la espuma sola.

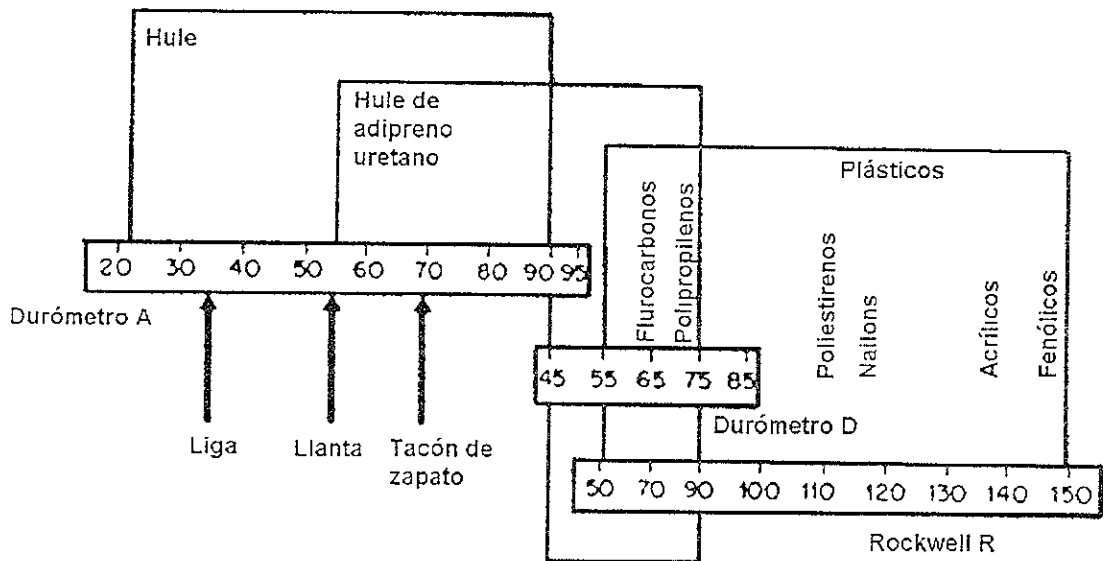


Figura 18. Escalas del durómetro.

Se pueden empotrar cepillos de alambre o cerdas de plástico a las espirales de poliuretano para añadir una mayor acción limpiadora o raspadora.

El movimiento limpiador de los diablos comienza por el arrastre por fricción proporcionado por su mayor diámetro en comparación al tubo. Además, la presión hidráulica creada sobre el diablo lo comprime longitudinalmente. Esto incrementa el arrastre por fricción y la acción raspadora. La mayor parte del sedimento incrustado que ha sido raspado es empujado adelante del diablo, conforme éste avanza a través de la tubería. Sin embargo, algo de sedimento queda detrás del diablo, el cual será limpiado posteriormente por los siguientes diablos que sean lanzados, o por el mismo flujo que circula dentro de la tubería.

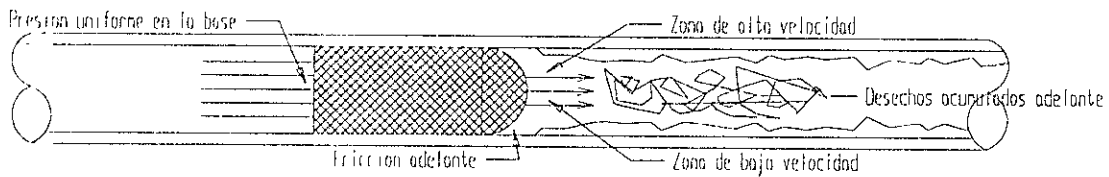


Figura 19. Limpieza de una tubería mediante el empleo de diablos.

La elección del tipo, tamaño y rigidez de los diablos, así como el número de corridas por realizar, queda a criterio del ingeniero a cargo de la operación.

Revisando los procedimientos para el lanzamiento de los diablos, se debe tomar en cuenta lo siguiente :

1).- Se debe proponer la serie de pasos de limpieza. Como mínimo, el primer paso debe ser un diablo tipo "almohadilla", i.e. un diablo flexible sin cubierta, que es capaz de reducir su área transversal en un tercio a fin de limpiar posibles obstrucciones, conforme se va abriendo paso por la tubería. Las siguientes corridas deben incluir diablos más rígidos y/o de mayor diámetro. Es importante que el ingeniero valore el progreso alcanzado después de cada corrida y ajuste el programa de trabajo. El objetivo es retirar el sedimento que se ha acumulado sin dañar las paredes de la tubería.

2).- Se debe establecer un límite superior para el número de corridas, para reducir la posibilidad de daño a la tubería

3).- El último paso de la limpieza debe ser el lanzamiento de un diablo de punta chata para limpiar cualquier resto de sedimento suelto acumulado en la tubería.

4).- Se debe mantener el flujo a toda su capacidad después de cada corrida para limpiar los restos de sedimento y para prevenir que las partículas más pesadas regresen a la tubería.

5).- Las estructuras lanzadiablos deben estar bien detalladas dentro de los diagramas que se proporcionan al licitador del equipo y los instrumentos, así como sus localizaciones, deben estar identificados.

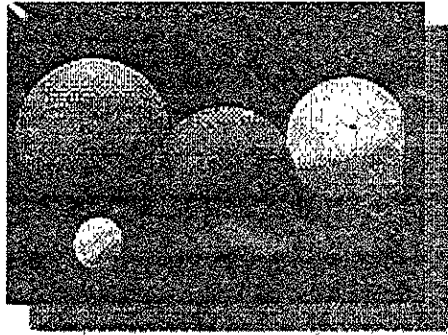


Figura 20 A. Diablos esféricos.

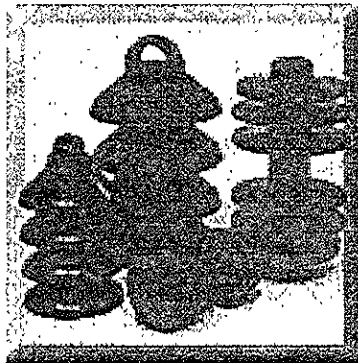


Figura 20 B. Diablos de molde sólido.

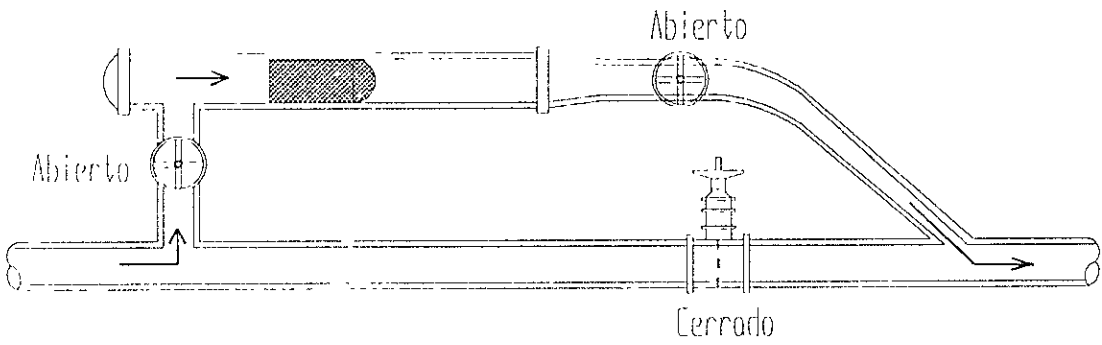


Figura 20 C. Diablos mecánicos.

6).- Las operaciones para retirar los diablos de la tubería deben estar bien definidos. Deben incluir vehículos adecuados para jalar y levantar a los diablos, como grúas o montacargas. Debido al peso y consistencia de los diablos ya usados, jalarlos y levantarlos es una operación complicada.

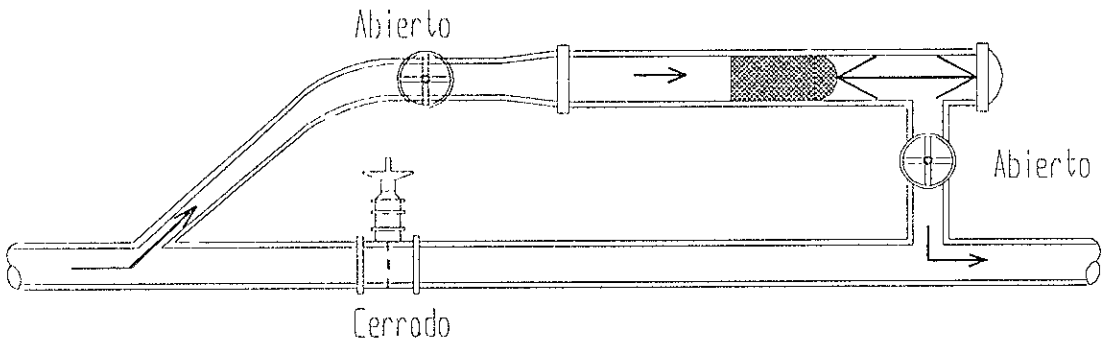
7).- Las operaciones planeadas después de que un diablo es lanzado dentro de la tubería, deben quedar bien establecidas.
(French, [13]).

Para que los diablos sean colocados dentro del sistema que van a limpiar, se emplean los llamados lanzadiablos que se adaptan a la tubería. Para retirarlos se emplea una esclusa de descarga especial o cachadiablos.



Metodo convencional
de lanzamiento

Figura 21 A.



Metodo convencional
de recepcion

Figura 21 B.

Los lanzadiablos pueden ser de distintos tipos :

- 1).- Hidrante.
- 2).- Y.
- 3).- Sección de tubería especialmente adaptada.

Para que los diablos puedan pasar a través de las válvulas, éstas deben ser de compuerta. (Catálogo de Aqua-Pigs, [4]).

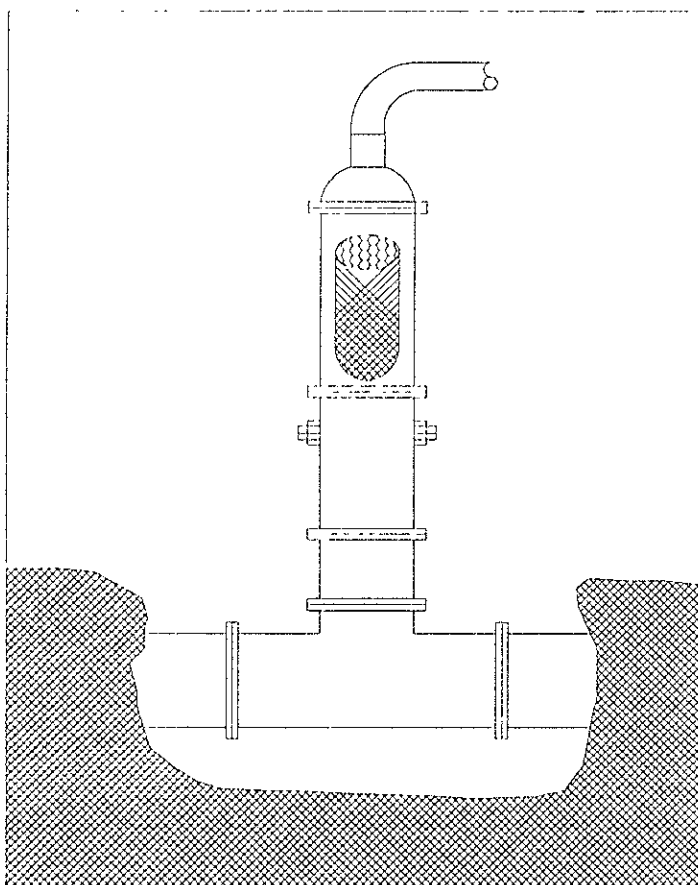


Figura 22 A. Lanzamiento a través de un hidrante empleando un reductor.

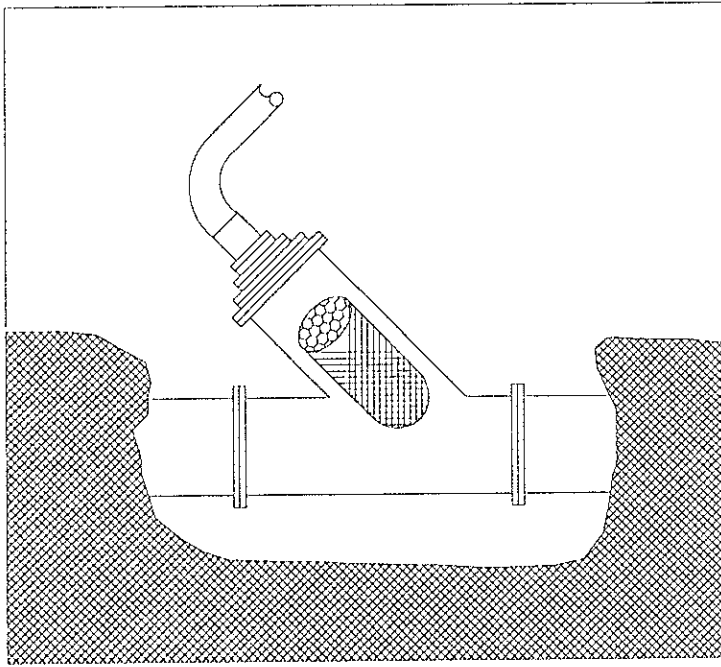


Figura 22 B. Lanzamiento a través de una sección típica o de una “y” regular.

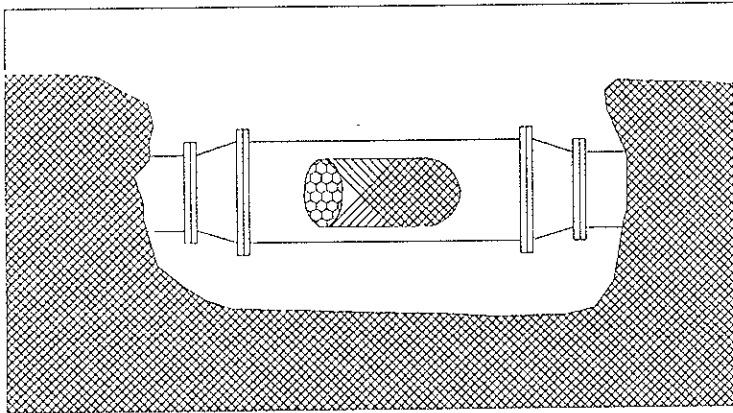


Figura 22 C. Lanzamiento por medio de una sección agrandada que puede ser acoplada a la tubería.

A finales de 1985, se realizó la limpieza de unas tuberías de desagüe que desembocaban en el puerto de Boston, E.U. Fueron empleados diablos como los descritos anteriormente para realizar esta tarea. Después de la limpieza, el factor de fricción para un tubo de hierro colado de 1.5 m. de diámetro, cambió de $f = 0.054$ a $f = 0.019$ (French, [13]).

En el mes de junio de 1997, se realizaron una serie de corridas de diablos en el Acueducto Río Colorado - Tijuana, donde el Instituto de Ingeniería fungió como asesor de la C.N.A. (Comisión Nacional del Agua). Para el tramo cubierto por una tubería de acero de 48 pulgadas de diámetro, el factor de fricción en octubre de 1996 era de $f = 0.0378$. Después de una corrida con dos diablos de baja densidad, se tiene que $f = 0.0185$. Actualmente, se está planteando la posibilidad de realizar la limpieza del Acueducto Chapala-Guadalajara con el mismo procedimiento.

Las siguientes figuras muestran las diversas etapas de la operación de limpieza llevada a cabo en el acueducto Río Colorado - Tijuana.

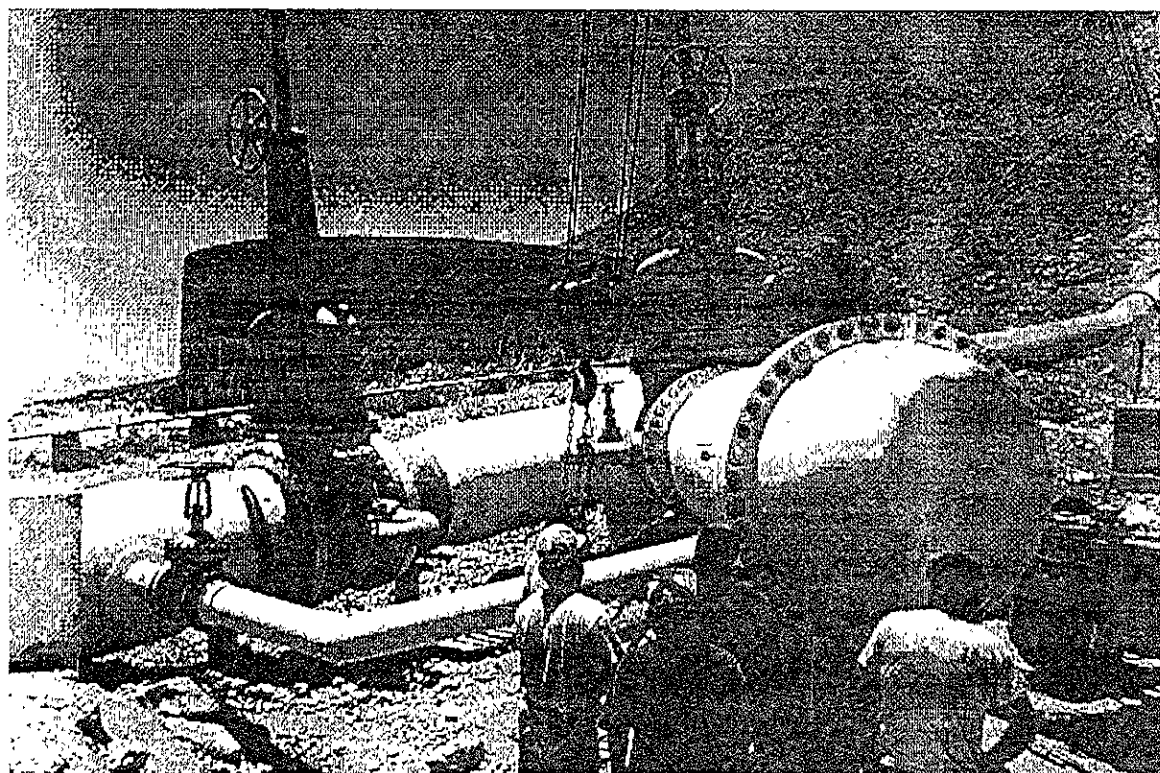


Figura 23. Vista completa de la estructura lanza-diables.

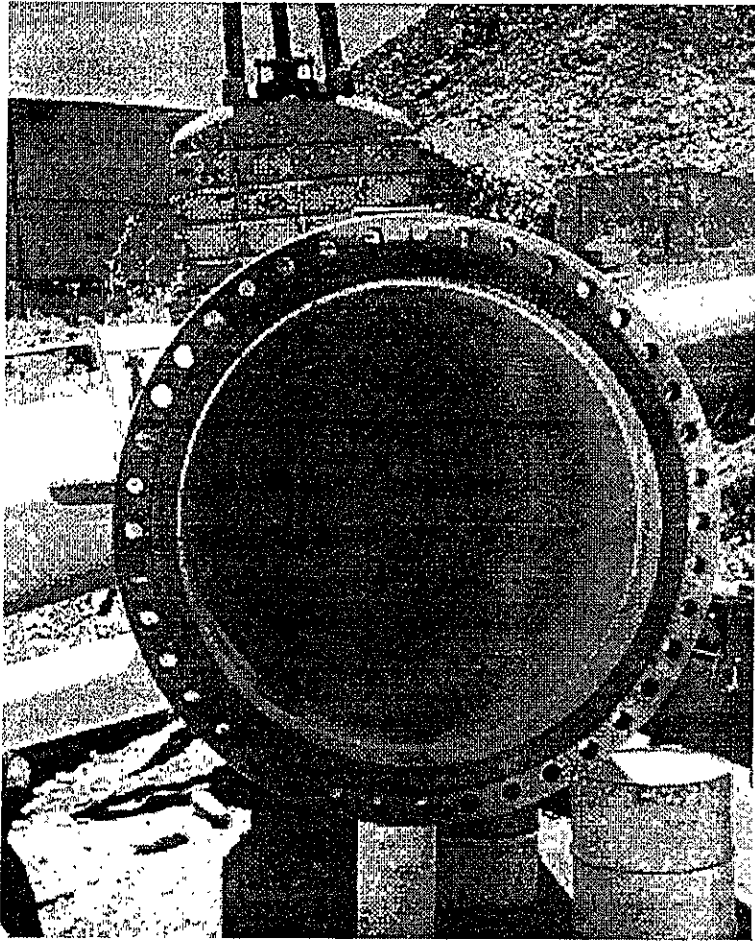


Figura 24. Entrada a la cámara lanza-diablos.



Figura 25. Izamiento del diablo por medio de una grúa para colocarlo dentro de la cámara lanza-diablos.

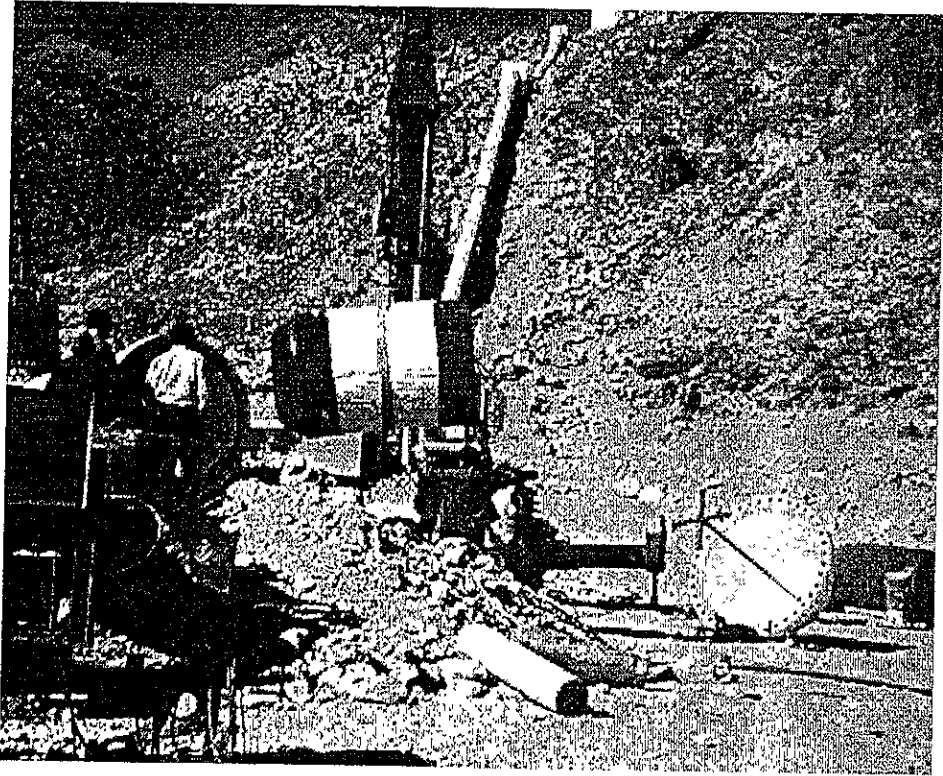


Figura 26 A. Comienzo de las maniobras para colocar el diablo en la cámara lanzadora.

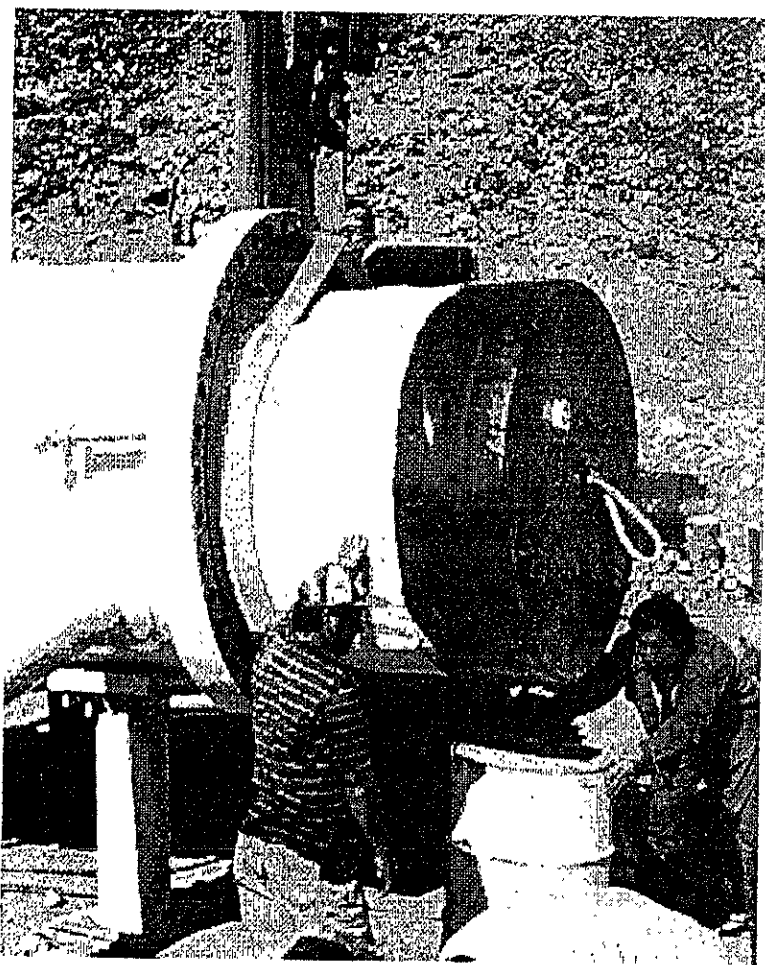


Figura 26 B. Pasos finales de la colocación del diablo en la cámara lanzadora.

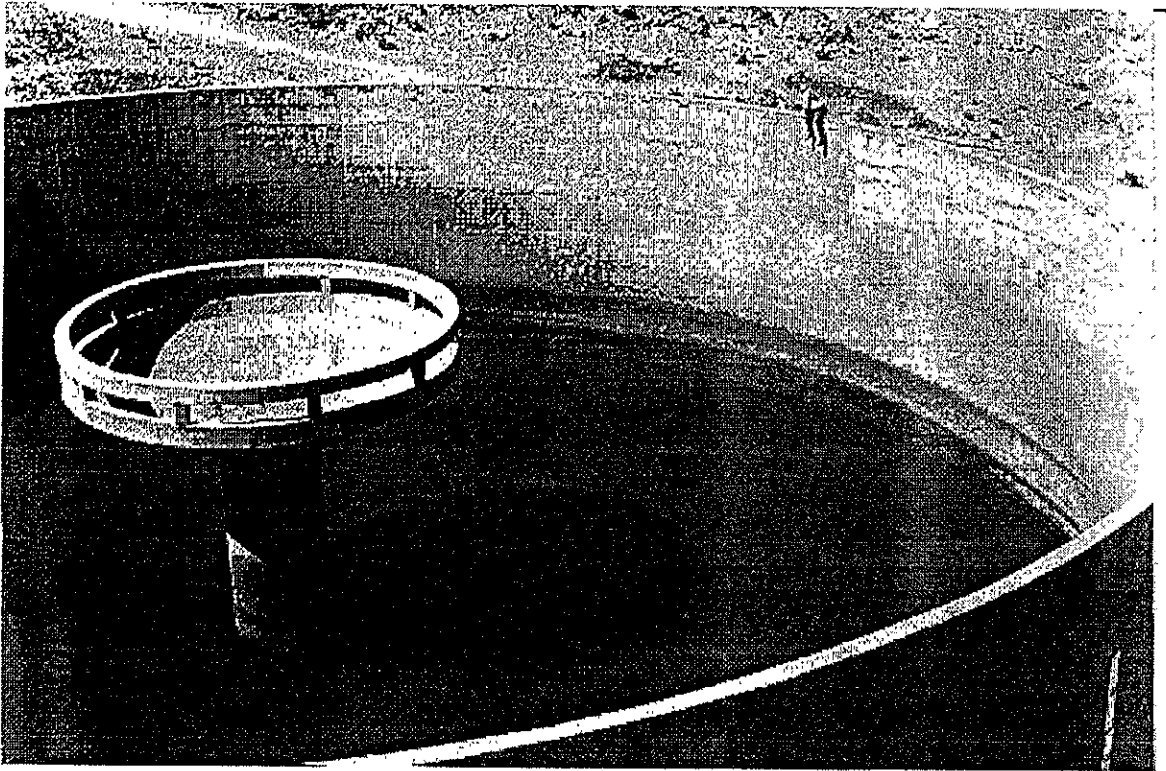


Figura 27 A. Esperando la llegada del diablo al Tanque de Sumergencia dos (TS2) en el Acueducto Río Colorado - Tijuana (agua clara).

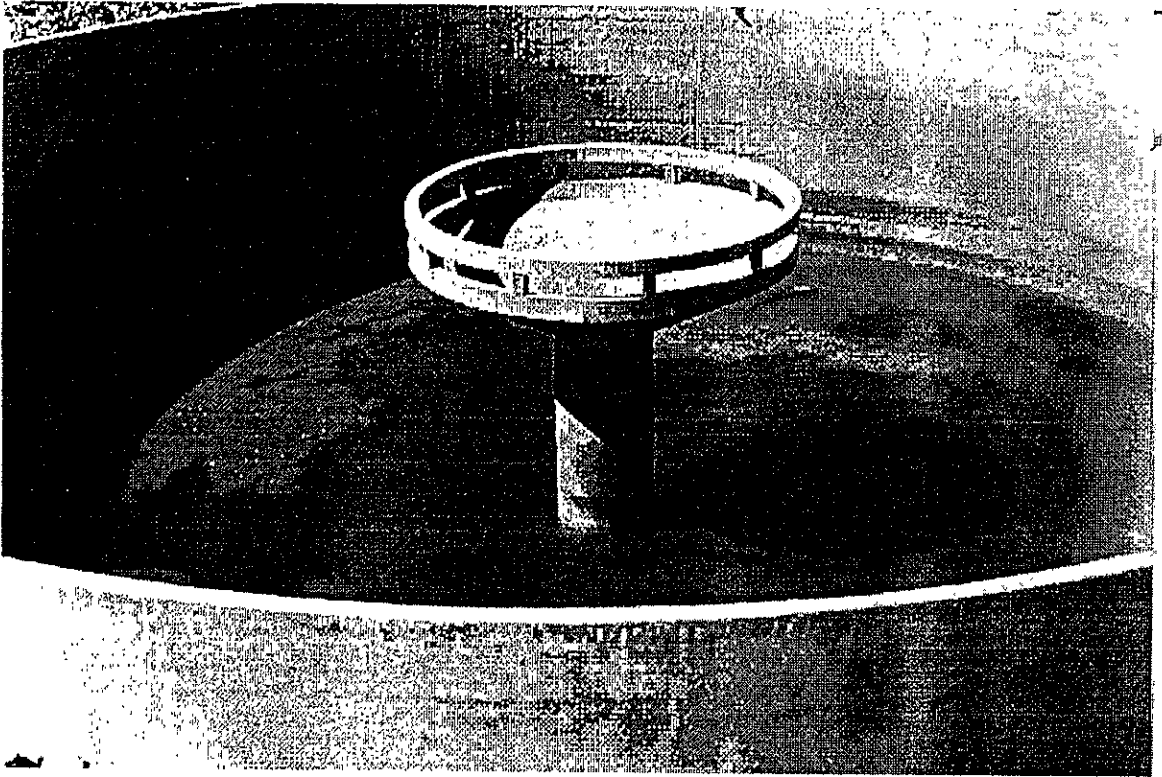


Figura 27 B. Se observa el material arrastrado por el diablo antes de llegar al TS2 (agua turbia).

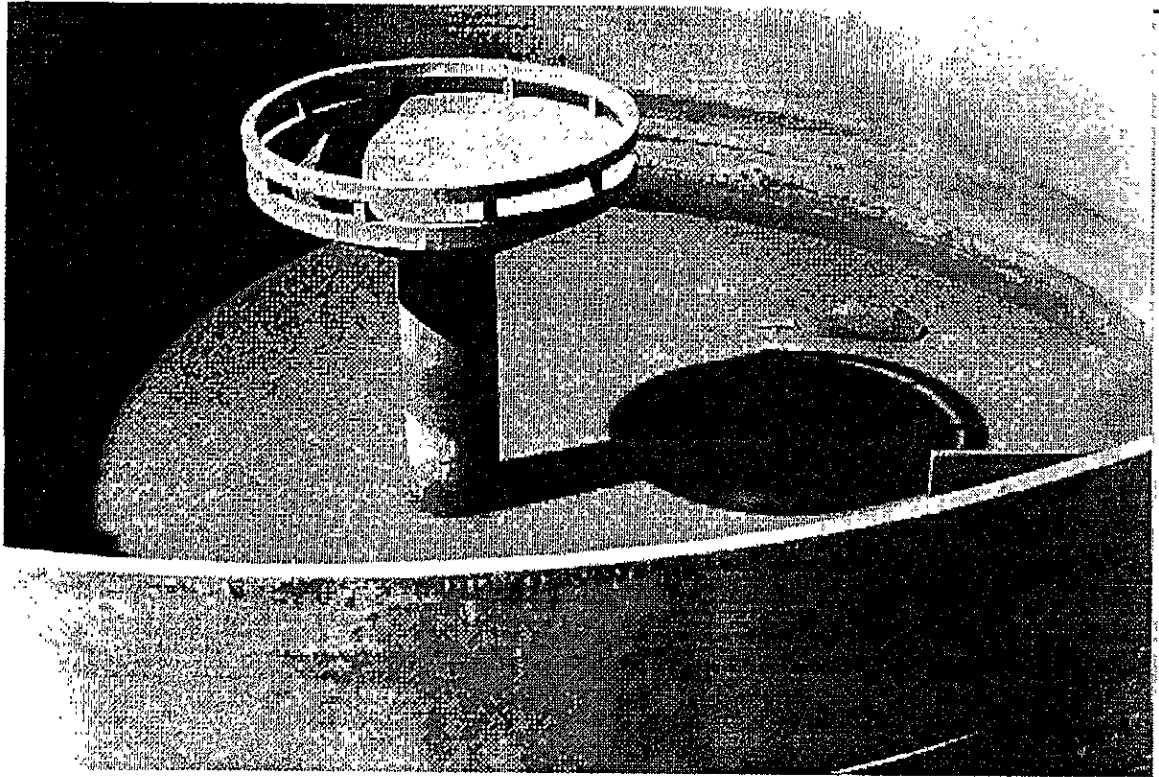


Figura 27 C. Llegada del diablo al TS2 (agua totalmente saturada del material adherido en las paredes de la tubería del acueducto).

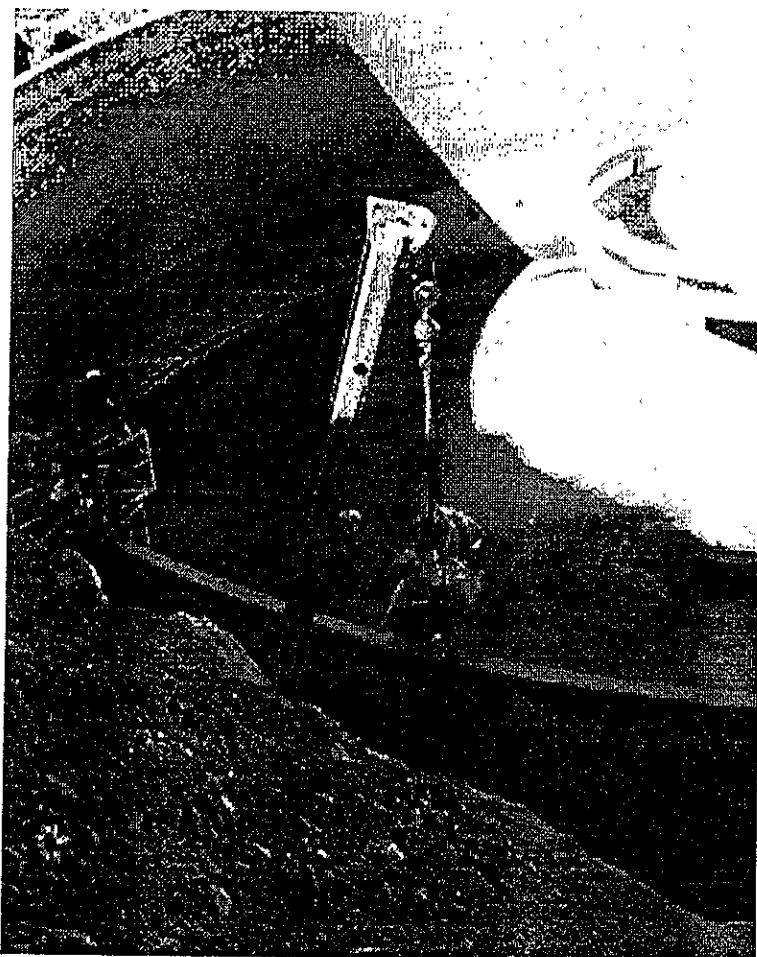


Figura 28. Extracción con grúa de los restos del diablo.

DISPOSITIVOS MAGNÉTICOS.

Otro tipo de procedimiento de limpieza de tuberías consiste en el uso de instrumentos magnéticos. El Perm-a-Core de "Superior" está hecho de múltiples imanes permanentes de polaridad reversible. Cuando el agua pasa a través de la unidad, los minerales están expuestos a una serie de campos magnéticos alternantes que resultan en un realineamiento de su orientación eléctrica por un período limitado de tiempo (alrededor de 36 horas). Durante este tiempo, cuando estos minerales están sujetos a cambios de transferencia de calor y/o de presión, seguirán precipitándose fuera de su estado disuelto. Sin embargo, en lugar de la formación de calcita sólida, tendrán una textura suave conocida como aragonita (una sustancia parecida al lodo), la cual no quedará en la forma de capa, sino que permanecerá en suspensión.

La pureza del agua no se modifica, pues la aragonita tiene la misma apariencia química que la estructura sólida de la calcita frágil.

Es muy importante el retirar estos sólidos suspendidos a través de procesos de "chupado" y/o "inflado" en cualquier tipo de sistema recirculatorio. Sin embargo, cuando el dispositivo de "Superior" se coloca en una instalación donde el agua se usa solamente una vez y luego se desaloja, los sólidos suspendidos serán también arrastrados.

Los acondicionadores de agua de la compañía "Superior" (figura 29), cambian magnéticamente las características físicas de los minerales existentes en el agua para que no se adhieran a las paredes de la tubería o la superficie de los equipos. Ninguna capa de sedimento se forma porque los minerales permanecen en una solución en polvo. Esto incrementa la eficiencia de los equipos y reduce el mantenimiento periódico y los paros de maquinaria necesarios para retirar el limo o sedimento acumulado.

Ningún químico o aditivo se usa durante este proceso. La pureza del agua, como se sabe, no se afecta, y no existe cambio ni en olor ni en sabor.

Un núcleo de aleación de cobalto mantiene una serie permanente de poderosos campos magnéticos alternantes a través de los cuales pasa el agua. No se

requiere ninguna fuente externa y las cajas de avíos están hechas de cobre para una larga duración. (Catálogo de "Superior manufacturing division magnatech corporation.", [5]).

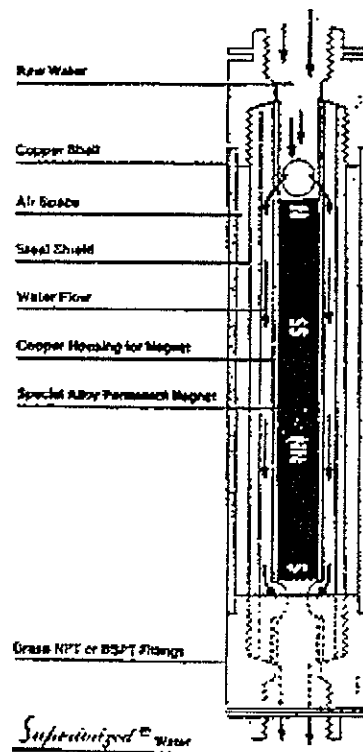


Figura 29. Acondicionador magnético de agua.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES.

El mecanismo que se ha identificado como responsable de la formación de la capa de sedimentos en las paredes del acueducto Chapala-Guadalajara es de tipo químico-biológico en forma de microorganismos y arcillas que se adhieren a ellas, sirviendo de sustrato a otros organismos que dan forma y consistencia al sedimento.

Las fuerzas de origen mecánico quedan definitivamente descartadas, debido a que no cumplen los requisitos necesarios para que den origen a los depósitos de material en las paredes. Sin embargo, no es posible descartar a los mecanismos de tipo eléctrico, pues con los datos actualmente disponibles no es posible discernir si cumplen o no un papel importante en la acumulación de sedimentos, por lo que el problema continúa abierto.

La limpieza con diablos ha mostrado ser un método muy eficiente para conservar la capacidad de conducción de los acueductos, por lo que se sugiere continuar con los arreglos y acuerdos necesarios para su aplicación en el Chapala-Guadalajara.

El estudio de la influencia de la capa límite sobre el flujo laminar, es otro de los problemas que quedan abiertos en esta investigación, así como la búsqueda de nuevos modelos físicos que permitan clasificar el tipo de flujo que existe en los acueductos estudiados.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Benton, G.S.,
"The effect of the earth's rotation on laminar flow in pipes," en
Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, marzo 1956 ;
pp. 123-127.
- [2] Bianchetti, Ronald L.,
"Corrosion and corrosion control of prestressed concrete cylinder
pipelines- A review.", en
Materials Performance, vol. 32, N° 8, Agosto 1993, pp. 62-66.
- [3] Binder, Raymond C.,
Mecánica de fluidos, t. Contin, A., Primera edición, México, D.F.,
Editorial Trillas, 1978, 494 pp., ilustr., gráficas.
- [4] Catálogo de Aqua-Pigs, T.M., Houston, 1995, Girard Industries, Inc.
- [5] Catálogo de "Superior manufacturing division magnatech
corporation", 1997.
- [6] Dabkowski, John.,
"Statistical approach to designing mitigation for induced AC voltages on
pipelines", en
Materials Performance, vol. 35, N° 8, 1996, pp. 9-12.
- [7] De Victorica A., Jorge Luis, et.al.,
"Evaluación de las posibles causas de la formación de los depósitos de
material en las paredes internas del Acueducto Chapala-Guadalajara.",
Instituto de Ingeniería, UNAM, 1997, 29 pp., ilustr., tablas.

[8] Diccionario Enciclopédico Océano Uno Color ,
Edición 1997, Barcelona,
Océano Grupo Editorial, S.A., 1784 pp., ilustr., mapas.

[9] Diccionario Enciclopédico Universal ,
10 volúmenes, Quinta edición, Barcelona,
CREDSA, Ediciones y publicaciones, 1972, ilustr., mapas, gráficas.

[10] Donovan, R.P., T. Yamamoto y R. Perisamay.,
"Particle deposition, adhesion, and removal", en
Proceedings of the 1993 Spring Meeting of the Materials Research
Society, 1993, pp. 3-22.

[11] Ellison, Denis.,
"Pipeline cathodic protection- Dispelling the misconceptions", en
Corrosion Prevention & Control, vol. 40, N° 2, 1993, pp. 29-32.

[12] Euwe, G.A., D.C. Buxton, G.M. Dowling, et. al.,
"Comprehensive overline diagnostics to determine actual pipeline and
protective coating condition", en
Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and
Arctic Engineering-OMAE, vol. 5, 1995, ASME, pp. 185-198.

[13] French, Jonathan A.,
"Pigging submarine outfalls", en
Journal of Environmental Engineering, ASCE, Mayo 1995, vol. 121, N°5,
pp. 396-401.

- [14] Gagliardi, Michael G. y Louis J. Liberatore.,
"Water systems piping", en
Piping Handbook, Nayyar, Mohinder L. (Editor), Sexta edición,
Nueva York, Mc Graw-Hill, 1992, pp. C.455-C.500.
- [15] Gandhi, Ramesh L.,
"Slurry and sludge piping", en
Piping Handbook, Nayyar, Mohinder L. (Editor), Sexta edición, Nueva
York, Mc Graw-Hill, 1992, pp. C.455-C.500.
- [16] Hall, S. e I. Mathew.,
"Cathodic protection requirements of prestressed concrete cylinder
pipe", en International Conference on Advances in Underground Pipeline
Engineering-Proceedings 1995. ASCE, pp. 168-182.
- [17] Harper, Charles A. (Editor),
Handbook of plastics and elastomers, Primera edición, Nueva York, Mc
Graw-Hill, 1975, tablas, ilustr.
- [18] Hollinderbäumer, E.W., W. Mez y U. Krämer,
"Der hydraulische transport von schlämmen und konzentrierten
suspensionen", en
Aufbereitungs-Technik, 1995, vol. 36, N° 9, pp. 403-409.
- [19] Ingard, Uno y William L. Kraushaar,
Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas,
t. Fernández, F., Barcelona, Editorial Reverté, S.A., 1972,
728 pp., ilustr., gráficas.
- [20] Jeffrey, R.C. y J.R.A. Pearson.,
"Particle motion in laminar vertical tube flow", en
Journal of Fluid Mechanics, 1965, vol. 22, pp. 721-735.

[21] Karnis, A., H.L. Goldsmith y S.G. Mason,
“The flow of suspensions through tubes. V Inertial effects.”, en
The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1966, pp. 181-193.

[22] Lawler, M.T. y P.Lu.,
“The role of lift in the radial migration of particles in a pipe flow”, en
Advances in solid-liquid flow in pipes and its applications,
Zandi, I. (Editor), Primera edición, Oxford, Pergamon Press, 1971 ;
pp. 39-57.

[23] Luna, Ambrosio S., J. Castrillón, J. Bulbulian y J.P. Ayel.,
Curso de Química, Octava edición, México, D.F., Editorial Enseñanza,
1981, 525 pp., ilust.

[24] Mitchell, James K.,
Fundamentals of Soil Behavior, Segunda edición, Nueva York,
John Wiley & Sons, 1993, 437 pp., ilust., gráficas.

[25] Mott, Robert L.,
Applied Fluid Mechanics, Cuarta edición, Englewood Cliffs, Nueva
Jersey, Prentice Hall, 1994, 581 pp., ilust., gráficas.

[26] Puig, Ignacio.,
Curso general de Química, Sexta edición, México, D.F., Editora
Nacional,S.A., 1951, 667 pp., ilust.

[27] Roberson, J.A. y C.A. Crowe.,
Mecánica de Fluidos, t. Ordóñez, C. et.al., Segunda edición, México
D.F., Mac Graw-Hill, 1991, 680 pp., ilust., gráficas.

- [28] Rubinow, S.I. y J.B. Keller.,
“The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid”, en
Journal of Fluid Mechanics, 1961, vol. 11, pp. 447-459.
- [29] Saffman, P.G.,
“The lift on a small sphere in a slow shear flow”, en
Journal of Fluid Mechanics, 1965, vol. 22, parte 2, pp. 385-400.
- [30] Saffman, P.G.,
“Corrigendum”, en
Journal of Fluid Mechanics, 1968, vol. 31, parte 3, pp. 624.
- [31] Schlichting, Hermann,
Boundary-Layer Theory, Séptima edición, Nueva York,
Mc Graw-Hill, 1979, 817 pp., ilustr., gráficas.
- [32] Schramuk, Jeffrey A. y Keith Switzer,
“Making sure cathodic protection works”, en
Water/Engineering & Management, vol. 141 N° 2, Febrero 1994, pp. 16-17.
- [33] Segré, G. y A. Silberberg.,
“Behaviour of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow”.Partes I y II, en Journal of Fluid Mechanics, 1962, vol. 14, pp. 115-157.
- [34] Soo, S.L. y C.L. Tien.,
“Effect of the wall on two-phase turbulent motion”, en
Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, Marzo 1960,
vol. 27, pp. 5-15.

- [35] Sotelo Ávila, Gilberto.,
Hidráulica General, Volumen 1. Fundamentos,
Decimotercera reimpresión, México, D.F., Editorial Limusa, 1992,
561 pp., ilustr., gráficas.
- [36] Swamee, P.K. y A.K. Jain.,
"Explicit equations for pipe-flow problems", en
Journal of the Hydraulics Division, 1976, Vol. 102(HY5), pp. 657-664.
- [37] Turnipseed, Stephen P. y Richard Mueller.,
"Cathodic protection retrofit of a 35-year-old concrete pressure
pipeline", en
International Conference on Advances in Underground Pipeline
Engineering-Proceedings 1995. ASCE, pp. 183-193.
- [38] Walmsley, H.L.,
"Electrostatic fields and potentials generated by the flow of liquid
through plastic pipes", en
Journal of Electrostatics, 1996, vol. 38, N° 3, pp. 249-266.
- [39] Zandi, Iraj.,
"Hydraulic transport of bulky materials", en
Advances in solid-liquid flow in pipes and its applications,
Zandi, I. (Editor), Primera edición, Oxford, Pergamon Press, 1971 ;
pp. 1-34.

