



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

***RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN EN UN
ACUEDUCTO MEDIANTE LIMPIEZA DE TUBERÍAS***

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
PRESENTA :**

SERGIO RAMOS TAPIA



DIRECTOR : Dr. RAFAEL CARMONA PAREDES

FEBRERO DE 1998

**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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-136/97

Señor
SERGIO RAMOS TAPIA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. RAFAEL B. CARMONA PAREDES**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

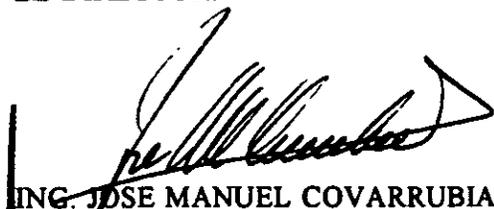
"RECUPERACION DE LA CAPACIDAD DE CONDUCCION EN UN ACUEDUCTO MEDIANTE LIMPIEZA DE TUBERIAS"

- INTRODUCCION**
- I. DESCRIPCION DE LOS PROCEDIMIENTOS DE LIMPIEZA**
 - II. MEDICION DE CAMPO PARA DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE FRICCION EN TRAMOS DEL A. R. C. T.**
 - III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS**
 - IV. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 15 de octubre de 1997.
EL DIRECTOR.



ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*lmf

RESUMEN

En el acueducto Río Colorado Tijuana, como en otros acueductos del país, se ha observado reducción en la capacidad de conducción por crecimiento del coeficiente de pérdida de carga en las tuberías.

Observaciones de campo permitieron asociar el aumento de la pérdida de carga con la presencia de material fino, adherido a la pared interior de los tubos.

Medidas en campo muestran que el coeficiente de pérdida de carga f (Darcy - Weisbach) ha alcanzado hasta 3 veces su valor esperado. Labores de limpieza con diferentes procedimientos redujeron los coeficientes de pérdida de carga entre el 30 y 50%, lo que produjo incrementos significativos en la capacidad de conducción .

En este trabajo se estudiará el funcionamiento de dispositivos de limpieza de tuberías y se reportan datos de la capacidad de conducción del acueducto Río Colorado - Tijuana antes y después de realizar labores de limpieza.

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a aquellas personas que creen que la vida, el trabajo y el éxito, son como un simple respiro ;nadie puede hacerlo por uno!

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de todo corazón a mis padres y hermanos por la confianza y apoyo que siempre me han dado, que sin ellos, jamás hubiera sido posible alcanzar esta meta.

Agradezco a Rafael Carmona y Alejandro Sánchez, por la dirección de este trabajo, a Eduardo Rodal y Amador Sámano por tanta lata que les di para llevarlo a cabo, a mis amigos del Instituto; asimismo, a Gerardo Silva por sus correcciones y recomendaciones.

ÍNDICE

RESUMEN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
INTRODUCCIÓN	1
Descripción general del Acueducto Río Colorado - Tijuana	1
Antecedentes de la reducción de capacidad de conducción	3
Estudio de calidad del agua	7
Características Físico - Químicas del agua del A.R.C.T.	7
Estudio de mecánica de suelos aplicado al material incrustado en las tuberías del acueducto	9
Inspección visual	9
Pruebas de laboratorio	11
1. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE LIMPIEZA	14
1.1 Limpieza por medio de diablos	14
1.2 Dispositivo limpiador de incrustaciones	23
2. MEDICIONES EN CAMPO PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE FRICCIÓN	28
2.1 Descripción de los equipos de medición	28
2.1.1 Manómetro de tubo de Bourdón	28
2.1.2 Manómetro diferencial con mercurio	29
2.1.3 Tubo Pitot	30

2.1.4 Medidor Annubar	32
2.1.5 Sonda eléctrica	35
2.2 Mediciones realizadas en octubre de 1996	35
2.2.1 Mediciones en PB0	37
2.2.2 Mediciones en PB1	38
2.2.3 Mediciones en PB2	39
2.2.4 Mediciones en PB3	40
2.3 Mediciones realizadas en diciembre de 1996	41
2.3.1 Mediciones en PB0	43
2.3.2 Mediciones en PB2	43
2.3.3 Mediciones en PB3	45
2.3.4 Mediciones en PB4	46
2.3.5 Mediciones en PB5	46
2.4 Mediciones junio de 1997	47
2.4.1 Mediciones en el tramo de la TO1-TS2	47
2.4.2 Mediciones durante la operación en flujo establecido con 3 equipos de bombeo por planta	54
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	56
3.1 Determinación y comparación de coeficientes de fricción antes y después de la limpieza	56
3.1.1 Factores de fricción determinados en octubre de 1996	57
3.1.2 Factores de fricción determinados en diciembre de 1996	60
3.1.3 Factores de fricción determinados en junio de 1997	61
3.2 Análisis comparativo de factores de fricción en las tres fechas de medición	64

3.3 Análisis de la recuperación de capacidad de conducción del A.R.C.T	66
3.3.1 Capacidad de conducción en diciembre de 1996	66
3.3.2 Capacidad de conducción en junio de 1997	70
5. CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	74
ANEXOS	76

INTRODUCCIÓN

Descripción general del Acueducto Río Colorado - Tijuana

El acueducto Río Colorado - Tijuana, ubicado en el estado de Baja California (Figura 1), entrega agua a la Ciudad de Tijuana, teniendo 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 (PB0). El acueducto en tubería cerrada a presión tiene una longitud total de 112.7 km, incluyendo dos túneles. El gasto de diseño es de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ y la carga dinámica total de 1136 m es proporcionada por seis plantas de bombeo cuyas características generales se describen en la Tabla 1. Cada planta cuenta con cuatro bombas en paralelo, donde una es de respaldo. En la Figura 2 se muestra un esquema en planta y perfil del tramo a bombeo del acueducto.

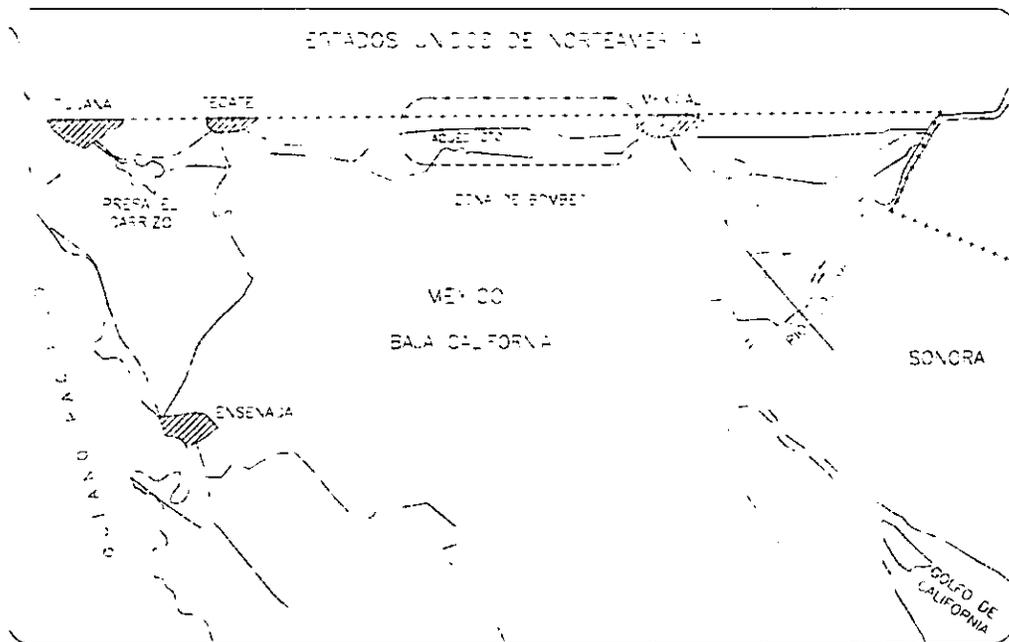


Figura 1. Ubicación del Acueducto en el Estado de Baja California.

Planta de bombeo	Bombas en paralelo	Tipo de Bomba	H _B	* Q _B	N _B
	#		(m.c.a)	(m ³ /s)	(r.p.m)
PB0	4	Vertical	53.6	1.5	890
PB1	4	Horizontal	134	1.33	1787
PB2	4	Horizontal	134	1.33	1787
PB3	4	Horizontal	140	1.4	1780
PB4	4	Horizontal	334.71	1.5	1790
PB5	4	Horizontal	334.71	1.5	1790

* El gasto normal de operación con tres equipos debe de ser de 1.33 m³/s. Los gastos anotados corresponden a los de máxima eficiencia para cada bomba

Tabla 1. Características de las bombas.

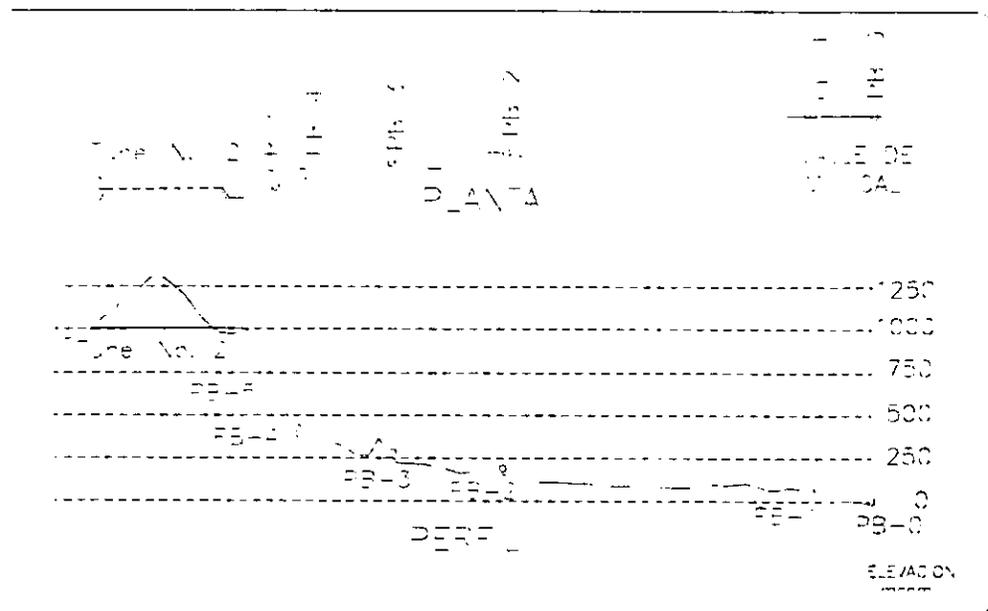


Figura 2. Croquis en planta y perfil de la zona a bombeo.

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 hacia la torre de oscilación 5 (TO5) y desde ahí el agua es conducida por gravedad, pasando por los túneles 2 y 3 hasta

descargar libremente en el arroyo "El Carrizo". El agua escurre hasta llegar a la presa "El Carrizo", ubicada a 16 km al suroeste de la Ciudad de Tecate. Desde la presa 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 desde ahí es distribuida a la Ciudad de Tijuana. En la Figura 3 se observa los tramos por bombeo y gravedad del acueducto.

Antecedentes de la reducción de capacidad de conducción

El Instituto de Ingeniería (II) ha desarrollado trabajos en el acueducto Río Colorado - Tijuana desde 1987, año en que realizó un estudio sobre el funcionamiento hidráulico del acueducto. 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 realizaron en el tramo TO1 - TS2, con la operación de un equipo de bombeo y una de las tres líneas de conducción de 48" en funcionamiento. Se estableció que el coeficiente de fricción era de 0.0133 (f en la fórmula de Darcy - Weisbach). Con este resultado se hizo el análisis del funcionamiento con tres equipos de bombeo y las tres líneas de conducción operando; el resultado permitió establecer la necesidad de sobreelevar 5 m la corona de TO1 [1].

Más tarde, en el año de 1988, el II realizó una segunda campaña de medición al acueducto dado que persistía el desbordamiento en la TO1. Los resultados obtenidos mostraron que la sobreelevación de 5 m, determinada en julio de 1987, había sido calculada en forma correcta ya que el derrame de agua que se presentaba en ese momento se debía a que el coeficiente de pérdida de carga por

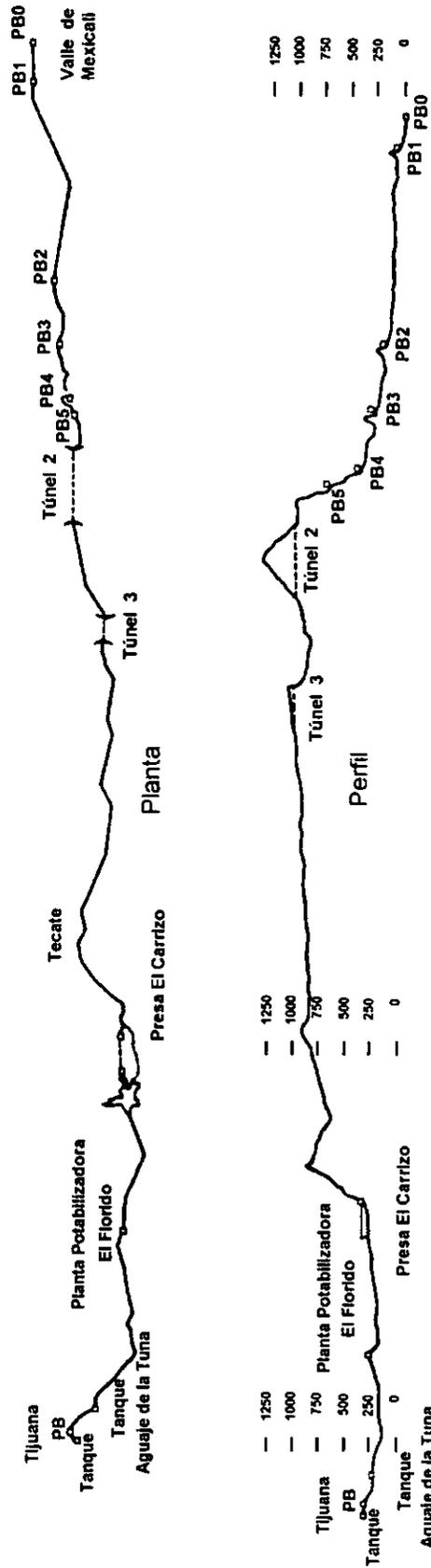


Fig 3. Planta y perfil esquemático del acueducto Río Colorado - Tijuana

fricción se había incrementado considerablemente, pasando de 0.0133 a 0.0237 (f de Darcy - Weisbach) [2].

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 de acero y concreto, así como determinar mediante pruebas de campo los valores del coeficiente de fricción de cada tramo. Los resultados mostraron, entre otros, que el coeficiente de fricción en el tramo TO1-TS2 se había incrementado de 0.0133 en julio de 1987 a 0.0367 en febrero de 1992. Esta diferencia representó un incremento del 276 % en cuatro años y medio hasta ese momento. Este crecimiento de f fue asociado con el depósito de material fino adherido en el interior de las tuberías del acueducto [3].

Mediciones recientes, efectuadas en octubre y diciembre de 1996, muestran que el coeficiente de fricción en el tramo de TO1-TS2 no ha aumentado, siendo muy próximo al medido en febrero de 1992. Lo anterior puede deberse a haber mantenido el acueducto fuera de operación durante casi tres años, pues cuando la presa Abelardo Rodríguez (ubicada cerca de planta potabilizadora "El Florido") tiene un nivel de operación suficiente para satisfacer la demanda de agua a la Ciudad de Tijuana, se suspende el funcionamiento del acueducto. Otra posibilidad, es que el factor de fricción haya alcanzado un valor estable correspondiente al equilibrio entre las fuerzas de arrastre y de sujeción de las partículas arcillosas que se depositan en la pared interior de los tubos.

En resumen, el coeficiente de pérdida por fricción en el tramo TO1-TS2 se ha incrementado fuertemente ocasionando disminución en el gasto de bombeo. Mediciones en febrero de 1992 y octubre de 1996 mostraron gastos por línea de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, estando lejos a los esperados de $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$. Igual que este tramo, existen otros que tienen el mismo problema en el acueducto.

Finalmente, como consecuencia del crecimiento de f , el gasto máximo del acueducto determinado en diciembre de 1996 fue de $3.36 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual, es mucho menor que el de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ de diseño.

De esta forma, el coeficiente de pérdida por fricción juega un papel muy importante, ya que al incrementarse causa una reducción importante en el gasto. Para resolver el problema se propuso limpiar las tuberías y medir la reducción del coeficiente de pérdida de carga y el incremento en el gasto.

Se define como capacidad de conducción de una tubería al gasto máximo que se puede hacer circular por ella. En la fórmula de Darcy - Weisbach :

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

donde:

g , constante de aceleración debida a la gravedad (m/s^2).

π , constante geométrica (adimensional).

D , diámetro de la conducción (m).

S_f , gradiente hidráulico (adimensional).

f , factor de pérdida de carga por fricción (adimensional).

Q , gasto volumétrico (m^3/s).

De la ecuación 1 se deduce que la máxima capacidad de conducción implica que el gradiente hidráulico sea el máximo posible y el coeficiente de fricción sea el mínimo posible.

En los tramos a gravedad, el máximo gradiente corresponde a la diferencia máxima entre los niveles del tanques inicial y el tanque final. De esta forma, la capacidad de conducción depende exclusivamente del factor de fricción y se ve reducida a medida que éste aumenta. En estos tramos, la capacidad de conducción

de la tubería nada tiene que ver con las características de los equipos de bombeo instalados en las plantas 1, 2 y 3.

Estudio de calidad del agua

Adicionalmente, se han desarrollado estudios para investigar mecanismos que propicien la adherencia de material fino sobre la pared interior de las tuberías, permitiendo así conocer la naturaleza de la disminución de capacidad de conducción. Una de las primeras labores fue la inspección del interior de las tuberías del acueducto, donde se encontraron depósitos de material fino adheridos en las tuberías, lo que dio lugar a realizar un estudio de la calidad del agua que llegaba por el canal de llamada de la planta de bombeo cero (PB0), y así conocer la posible causa del mecanismo de adherencia en las tuberías.

Características Físico - Químicas del agua del A.R.C.T.

Personal de la planta potabilizadora "El Florido" ha tomado muestras de agua en diferentes épocas del año en el canal de la PB0, los resultados de los análisis realizados fueron comparados con los del acueducto metropolitano de Los Angeles que no presenta problemas de este tipo [4]. De esta comparación se observó lo siguiente :

El agua que recibe el canal de la PB0 tiene un contenido mineral más alto, en comparación con los datos proporcionados por el acueducto metropolitano de Los Angeles. Los parámetros químicos más afectados son : cloruros, sulfatos, dureza total y alcalinidad total (Tabla 2). Además, en la Tabla 2 se presenta el índice de saturación de Langelier basado en el pH de la muestra. Este parámetro indica la tendencia del agua a ser incrustante o corrosiva; para valores negativos se dice que es corrosiva y para valores positivos incrustante. Los valores de este índice resultaron, para todas las mediciones, positivos, lo que indica tendencia

incrustante. En el caso del acueducto de Los Angeles a veces resulta ser incrustante y en otros casos corrosivo, pero siempre alrededor de cero [4].

Existen otros parámetros como la dureza total y la alcalinidad que pueden producir incrustaciones debido a iones de calcio y magnesio.

Otro parámetro físico con diferencias importantes fue la turbiedad, ya que se encontraron valores de 13 Unidades de Turbiedad Nefelométricas (U.T.N). La turbiedad, puede ser ocasionada por la presencia de sólidos coloidales en el líquido, partículas de arcilla o limo, debidas a descargas de agua residual o a la presencia de numerosos microorganismos [5]. Este parámetro está ligado con el alto contenido de sólidos totales y, en consecuencia, puede ser indicador de la presencia de adherencia de material en el influente al acueducto.

Las diferencias encontradas pueden tener su origen en el hecho de que, aguas abajo de la zona de Los Angeles, existen descargas al río de desechos agrícolas y de sólidos provenientes del desazolve de las presas en los EE UU.

Según Custodio [6], para predecir la naturaleza incrustante se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros : pH, conductividad, residuos sólidos, alcalinidad, dureza total y bióxido de carbono entre los más importantes. Por ejemplo, para aguas con más de 300 ppm (CO_3Ca) en su dureza, más de 250 ppm (CO_3Ca) en su alcalinidad y pH mayores de 7.5, incrementan la posibilidad de que el agua sea incrustante.

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

Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías

Determinación	Acueducto Río Colorado - Tijuana						Acueducto Metropolitano de Los Angeles (Plantas de Bombeo)					
	Fuente a PBO						Wey-Mouth	Dewer	Jensen	Skln-Ner-1	Skln-Ner-2	MBB
	Abril 1992	Junio 1992	Sept. 1992	Enero 1994	Marzo 1994	Abril 1994	Mayo 1995	Mayo 1995	Mayo 1995	Mayo 1995	Mayo 1995	Mayo 1995
Temperatura (°C)	15	20	27	17	22	20.5	18	18	13	19	20	15
PH	8.6	8.2	8.1	8.4	8.3	8.4	8.05	8.02	8.26	7.87	7.85	8.37
Turbiedad (U N T)	0.7	12	5.3	13	3.1	3	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09
Conductividad (MHOS)	-	-	-	1429	1281	1266	949	993	613	957	960	477
Dureza Total (ppm)	320	384	345	396	364	358	265	281	170	267	267	103
Dureza del calcio (ppm)	184	228	212	240	204	210	-	-	-	-	-	-
Dureza del magnesio (ppm)	136	158	134	156	160	148	-	-	-	-	-	-
Alcalinidad total (ppm)	129	142	132	142	132	133	111	117	101	112	111	72
Dóxico de carbono libre (ppm)	-	-	-	-	-	-	2	2.3	1.1	3.1	3.2	0.6
Cloruros (ppm)	141	206	143	157	136	127	91	92	60	95	94	59
Fluoruros (ppm)	0.53	0.63	0.82	0.55	0.87	-	0.17	0.17	0.2	0.2	0.2	0.11
Fosfatos (ppm)	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	-	-	-	-	-	-	-
Hierro (ppm)	< 0.20	0.45	0.28	-	< 0.20	-	-	-	-	-	-	-
Sulfatos (ppm)	292	304	284	368	332	-	231	246	105	223	223	59
Silice (ppm)	23.6	-	-	-	-	-	9.3	10	16.2	8.6	8.6	12.3
Sólidos Totales (ppm)	800	-	780	900	789	890	-	-	-	-	-	-
Sólidos Dis. Totales (ppm)	-	-	-	-	-	-	588	617	364	584	583	267
Índice de saturación de Lang	+ 0.9	-	-	+ 0.7	+ 1.0	+ 0.9	-0.003	+ 0.01	-0.011	+ 0.004	+ 0.002	-0.017

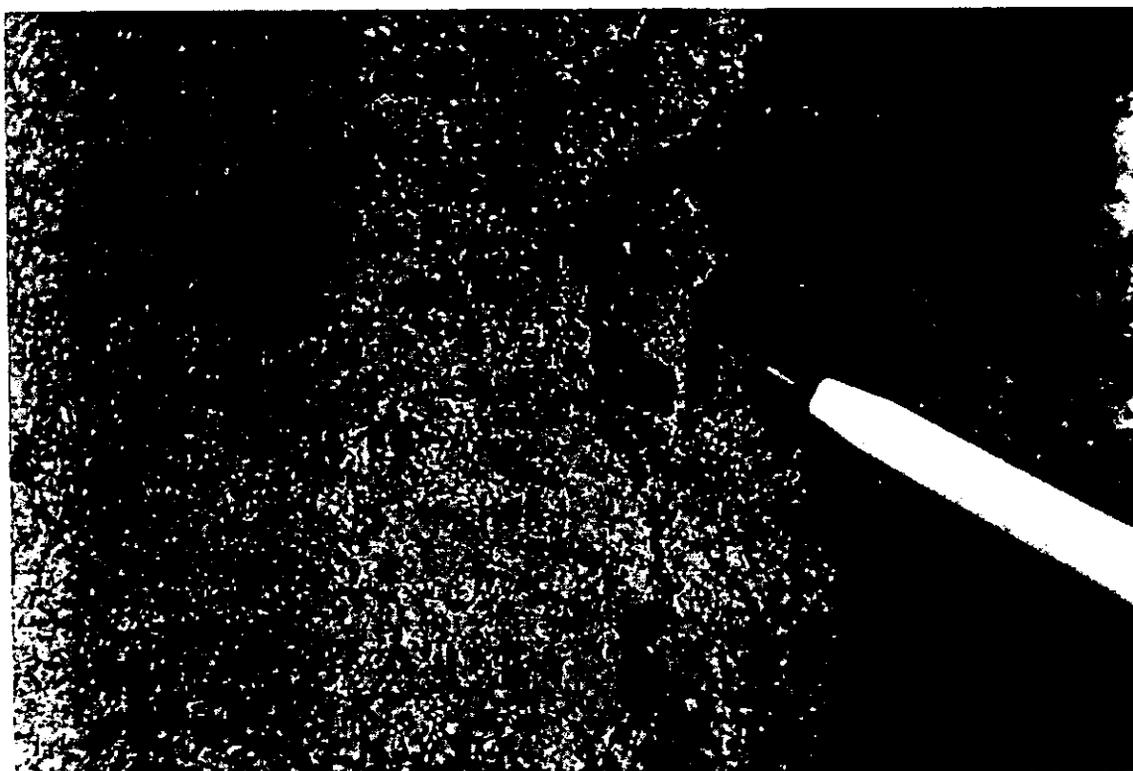
Tabla 2. Análisis Físico - Químicos en los dos acueductos [4].

Estudio de mecánica de suelos aplicado al material incrustado en las tuberías del acueducto

Otras medidas que se tomaron, para determinar la naturaleza del material adherido en el interior de la tubería, fue la inspección visual del interior de la tubería y el análisis mecánico realizado a una muestra del material adherido.

Inspección visual

Durante la última campaña de medición realizada en el mes de junio de 1997, se llevó a cabo una inspección visual al interior de la tubería del acueducto; ésta se realizó en la rampa de descenso de la TO1. En las Fotografías 1-a y 1-b se aprecia el material adherido en la tubería; su apariencia es granular de color café claro y está uniformemente distribuido en las paredes del interior de la tubería. Además, se observa que el material está formado por partículas muy finas fuertemente adheridas a las paredes; el espesor varía de 2 a 7 mm. Adicionalmente, se observan partes corroídas en el interior de la tubería, donde el material se encuentra más fuertemente adherido.



a)



b)

Fotografías 1-a y 1-b. Material adherido en las tuberías del Acueducto Río Colorado - Tijuana.

Pruebas de laboratorio

En febrero de 1996 se realizó un estudio de mecánica de suelos a una muestra de material adherido a la tubería; éste fue elaborado por el departamento de Ingeniería Experimental y Control de la C.F.E. Los resultados de laboratorio indicaron 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 %, índice plástico de 27 % y densidad de sólidos de 2.62. Asimismo, se realizó una prueba de contenido de iones solubles, encontrándose que posee un 0.0511 % en peso de cationes y 0.0892 % de aniones (ver Tabla 3) . En la sección de anexos se muestra la hoja de resultados de la Comisión Federal de Electricidad.

Con base en sus límites de consistencia y en el análisis granulométrico combinado se determinó que la actividad, desde el punto de vista geotécnico, resultó ser de 2.7. Esto indica que la fracción fina de la muestra está constituida por minerales de arcilla activos con fuerzas de atracción electrostáticas altas, lo que podría explicar su adherencia a la pared interior del acueducto. Sin embargo, este resultado se debe tomar con reserva ya que la muestra de material se tomó totalmente seca, lo que pudo haber influido en sus propiedades plásticas y granulométricas.

PRUEBAS QUÍMICAS A MUESTRAS DE SUELO			
ANÁLISIS DE SALES SOLUBLES EN AGUA %			
CATIONES EN FORMA DE:		ANIONES EN FORMA DE :	
CATIONES	%	ANIONES	%
CaO (Óxido de calcio)	0.02	HCO ₃ (Bicarbonatos)	0.07
MgO (Óxido de magnesio)	0.01	CO ₃ (Carbonatos)	0
Na ₂ O (Óxido de sodio)	0.01	OH (Hidróxidos)	-
K ₂ O (Óxido de potasio)	0.01	SO ₄ (Sulfatos)	0
		Cl (Cloruros)	0.02
		NO ₃ (Nitratos)	-
Observaciones:	La muestra presenta bajo contenido en sales solubles.		

Tabla 3. Análisis químico realizado a la muestra de suelo.

Además, puede suponerse que las arcillas limosas son transportadas por el canal hasta la PB0, ya sea en solución o como partículas en suspensión, y pueden adherirse a la tubería por la acción de fuerzas de atracción electrostáticas sobre los minerales de arcilla; este análisis es una primera visión del problema, por lo que se debe tomar con reserva.

Por otra parte, aunque se tienen estanques de presedimentación en la PB0, al parecer son ineficientes para evitar el arrastre de material fino al interior de la tubería. Por lo tanto, se han iniciado pruebas de limpieza con diferentes dispositivos.

Finalmente, con base en los antecedentes presentados del acueducto y analizando los problemas que se han suscitado durante los últimos años, se ha encontrado que las alternativas seleccionadas de limpieza hacen más eficiente la capacidad de conducción del acueducto.

El presente trabajo, que lleva por título “Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías”, dividido en cuatro capítulos, describe, analiza y evalúa a detalle las soluciones planteadas anteriormente.

En el primer capítulo se describen dos procedimientos empleados durante la limpieza del acueducto; el primer dispositivo es el “diablo” o “pig” impulsado por el mismo flujo del agua, el segundo es el dispositivo limpiador de incrustaciones diseñado por el Ing. Salvador Trujillo.

El segundo capítulo trata de las mediciones de campo llevadas a cabo para determinar coeficientes de fricción en el acueducto, con la descripción del equipo

más utilizado en dichas mediciones; además, se detalla como se realizaron las tres campañas de medición, así como los resultados obtenidos.

El tercer capítulo retoma los resultados obtenidos en el capítulo dos, con los cuales se determina y analiza los coeficientes de fricción; además, se realizan análisis de capacidad de conducción antes y después de la limpieza para conocer el beneficio obtenido.

En el capítulo cuatro se plantean las conclusiones y recomendaciones finales de este trabajo.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE LIMPIEZA

En este capítulo se describen dos procedimientos empleados durante la limpieza de tuberías en el Acueducto Río Colorado - Tijuana. Primero se presenta los dispositivos conocidos como “diablos” o “pigs” y, después, el limpiador de incrustaciones diseñado por el Ing. Salvador Trujillo. La limpieza por medio de diablos se llevó a cabo sobre la línea dos en el tramo de la torre de oscilación uno (TO1) al tanque de sumergencia dos (TS2), mientras que el dispositivo limpiador de incrustaciones se utilizó sobre las dos líneas en paralelo del tramo comprendido entre la torre de oscilación dos (TO2) y el tanque de sumergencia tres (TS3).

1.1 Limpieza por medio de diablos

Los diablos son dispositivos que tienen como principal aplicación la rehabilitación de tuberías.

Estos diablos tienen forma de bala, con base cóncava, y están hechos de espuma de poliuretano de alta calidad en su interior, con densidades de 2 lb/pie³, 5 lb/pie³ y 8 lb/pie³, según la aplicación. Además, presentan una cubierta plástica también de poliuretano, que puede tener cepillos para incrementar el efecto carazivo (ver la Fotografía 1.1).

Los diablos se mueven a través de las tuberías junto con el flujo mientras van limpiando, sin interrumpir la operación continua del sistema. Cuando al diablo se le aplica presión neumática o hidráulica en la base cóncava, se expande provocando una acción de sellado y raspado en la tubería, lo que elimina las protuberancias y retira el material adherido. Además, la presión hidráulica creada sobre el diablo lo comprime longitudinalmente, incrementando el arrastre por

fricción y la acción raspadora. Después de su aplicación, la calidad del agua puede mejorar, mientras que el gasto tiende a aumentar al reducirse la rugosidad.

Los diablos tienen una longitud aproximada de dos veces el diámetro de la tubería a fin de reducir la posibilidad de que se vuelquen dentro de la misma (ver Fotografía 1.1). Su diámetro es ligeramente mayor que el de la tubería con el objeto de ejercer un arrastre por fricción entre la superficie exterior del diablo y la pared del tubo.



Fotografía 1.1. Diablo utilizado en la limpieza del Acueducto Río Colorado - Tijuana.

Una característica en la clasificación de los diablos es la dureza de su material, la cual utiliza la escala del durómetro A empleada para medir la dureza

de plásticos parecidos al caucho. Por ejemplo, según Harper [7], una dureza que varía entre 30 y 40 corresponde a una liga de hule; entre 50 y 60 a una llanta de automóvil y a 70 un tacón de zapato.

Los diablos típicos presentan en su cubierta de base una dureza de 90 A según la escala del durómetro A (ver Figura 1.1), la cual proporciona una superficie selladora trasera para las fuerzas propulsoras del agua transportada.

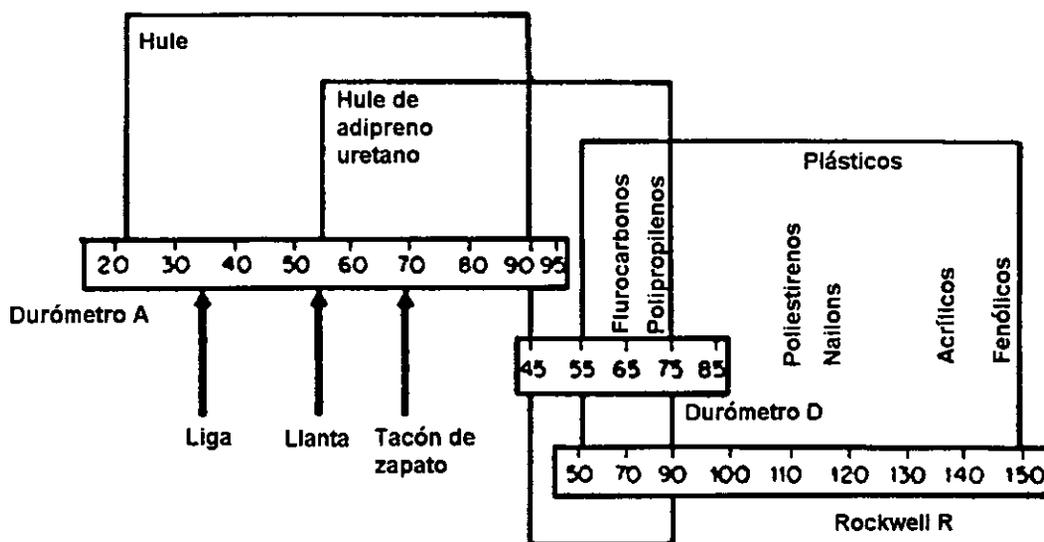


Figura 1.1 Escala del durómetro.

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

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 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 adelante del diablo,

conforme éste avanza a través de la tubería. Sin embargo, algo de sedimento queda detrás del diablo, el cual podrá ser limpiado por los siguientes diablos que sean lanzados o por el mismo flujo que circula dentro de la tubería. En la Figura 1.2 se presenta un esquema de la operación del diablo.

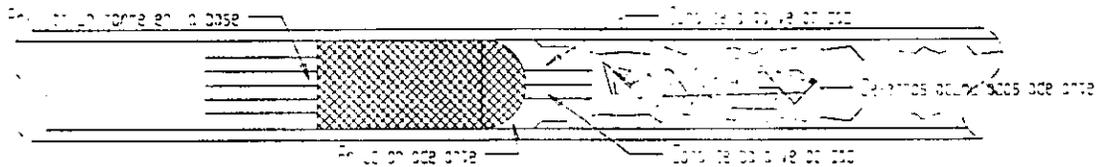


Figura 1.2. Limpieza del diablo en el interior de la tubería.

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. A falta de experiencia en este tipo de maniobras, se atienden las recomendaciones del fabricante.

Según French [8] el procedimiento para limpieza con diablos, debe tomar en cuenta lo siguiente :

1) Se debe proponer la serie de pasos de limpieza. El primer paso debe ser un diablo 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 diablos más rígidos y/o de mayor diámetro. Es importante que el ingeniero valore el progreso alcanzado a través de mediciones de carga y gasto, 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) Establecer un límite para el número de corridas, reduciendo así la posibilidad de daño a la tubería (si el daño existiera).

3) El último paso de la limpieza sugiere el lanzamiento de un diablo cilíndrico (sin punta) para limpiar cualquier resto de sedimento suelto acumulado en la tubería.

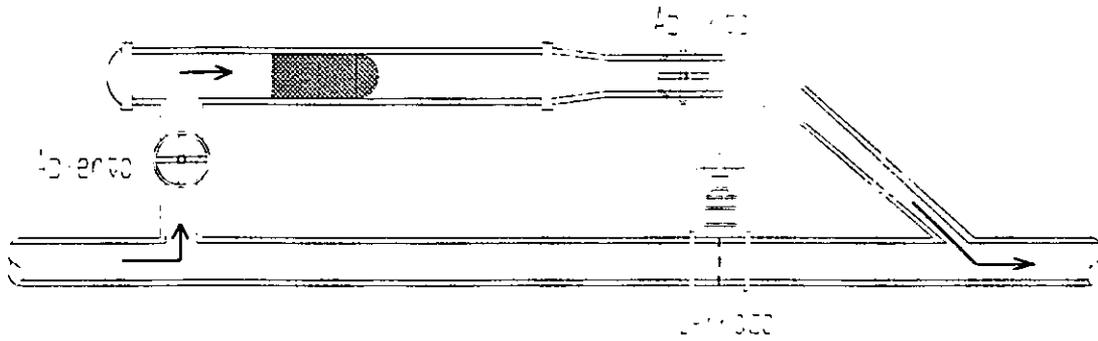
4) Mantener el flujo a toda su capacidad después de cada corrida para limpiar los restos de sedimento y para prevenir que las partículas más pesadas regresen a la tubería.

5) Las estructuras lanzadiablos deben estar bien localizadas.

6) Las operaciones para retirar los diablos de la tubería deben estar bien definidas. 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.

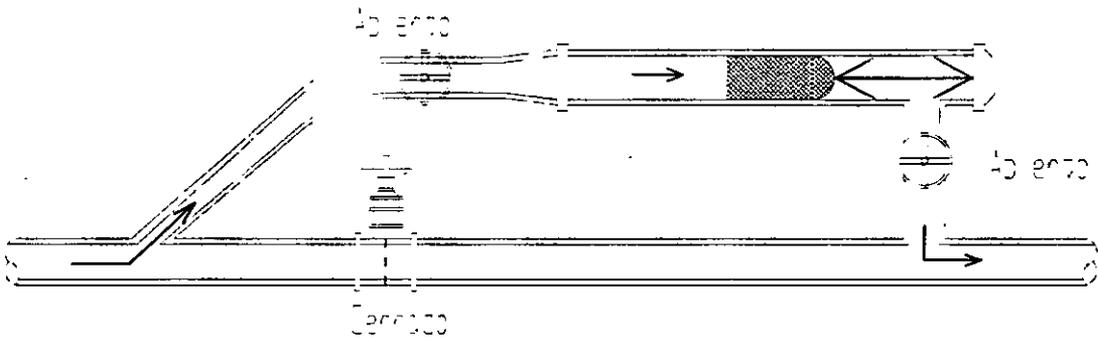
7) Se sugiere planear y establecer bien las operaciones una vez que el diablo es lanzado dentro de la tubería.

Según el catálogo de Aqua-Pigs [9], para que los diablos sean colocados 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 la las Figuras 1.3-a y 1.3-b.



Vertice convergente de
de abastecimiento

Figura 1.3-a. Estructura de entrada.



Vertice convergente de
de recepción

Figura 1.3-b. Estructura de salida.

Las esclusas de entrada pueden ser de varios tipos :

1) En forma de hidrante. (Figura 1.4-a)

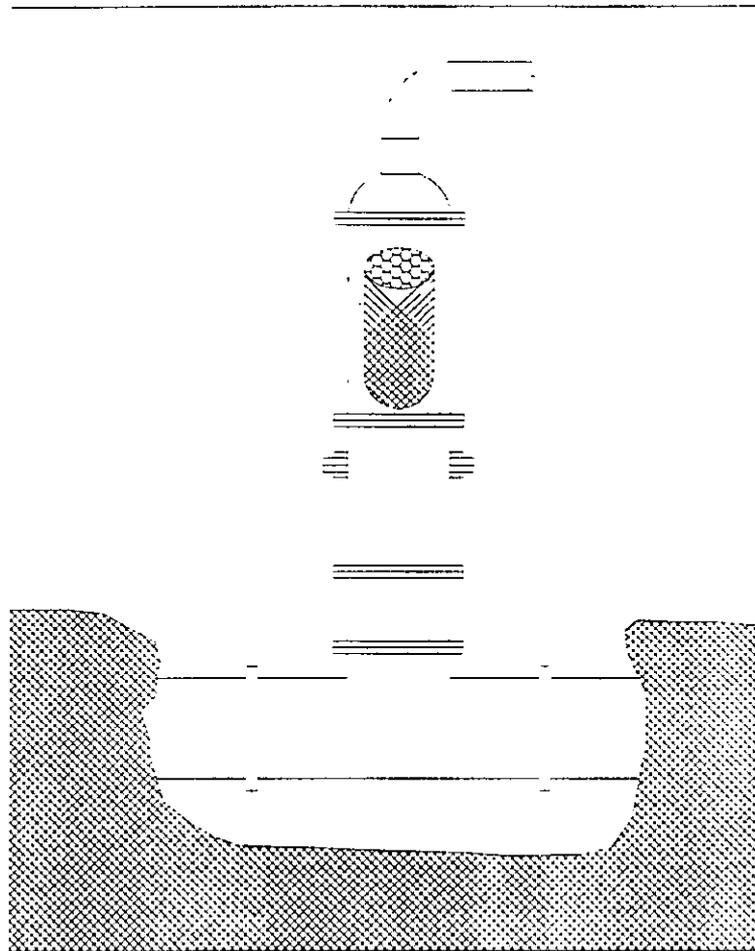


Figura 1.4-a . En forma de hidrante.

2) En forma de "Y". (Figura 1.4-b)

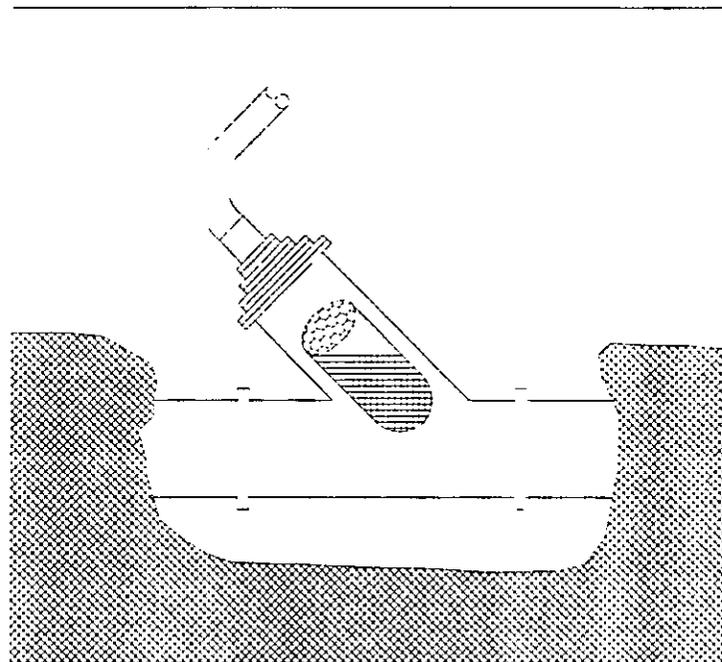


Figura 1.4-b. En forma de "Y".

3).- Sección de tubería especialmente adaptada. (Figura 1.4-c)

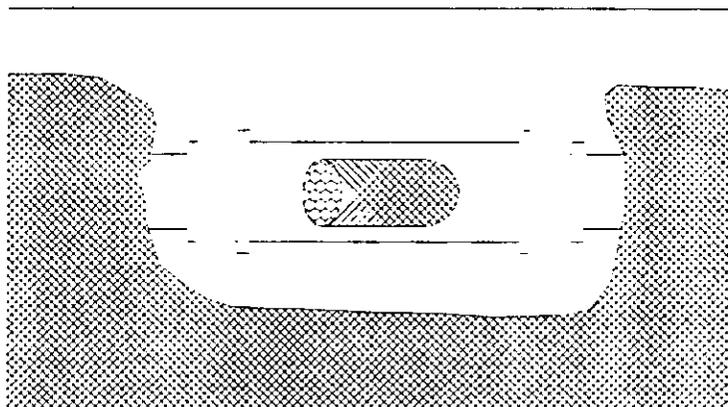
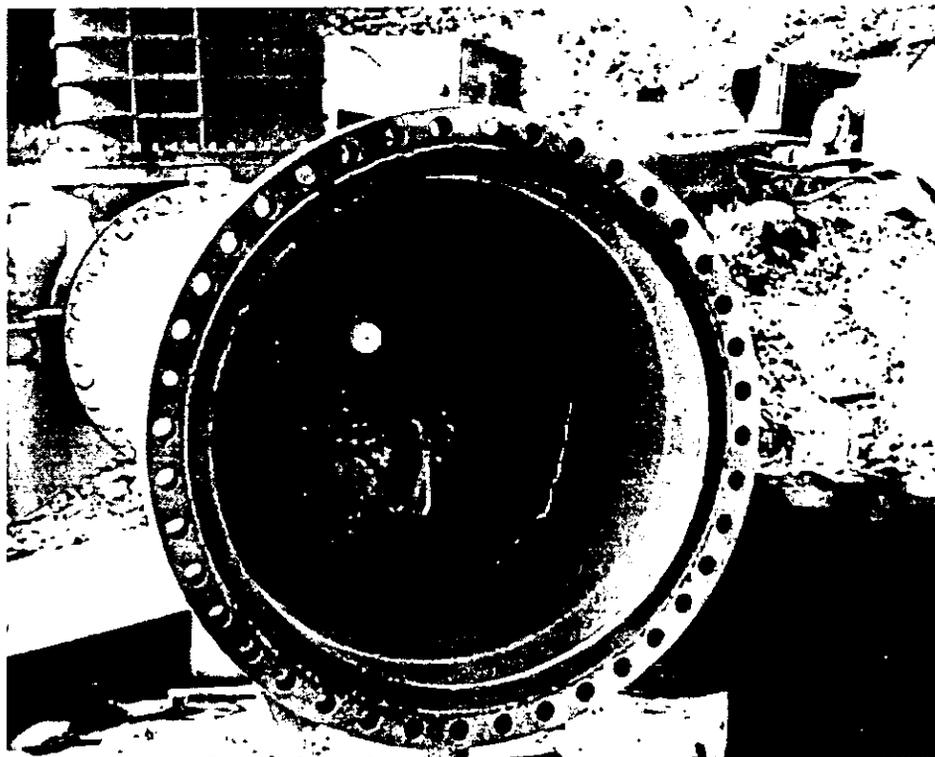


Figura 1.4-c. Esclusa de entrada especialmente adaptada en tuberías.

Para que los diablos puedan pasar a través de las válvulas, éstas deben ser de compuerta [9].

A fin de monitorear el avance de los diablos a través de la línea, se utiliza el sistema rastreador de diablos. Este consiste en un transmisor instalado en el interior del diablo, una antena rastreadora y un receptor. Las señales electrónicas de baja frecuencia del transmisor indican la localización del diablo. Si un diablo ha encontrado un obstáculo inesperado en la tubería y no llega al sitio deseado, su localización puede ser ubicada caminando, en paralelo a la tubería, con la antena rastreadora y el receptor hasta que sean captadas las señales del transmisor. En la Fotografía 1.2 se observa la ubicación de una pequeña tapa en la parte posterior del diablo donde va insertado el transmisor [9].



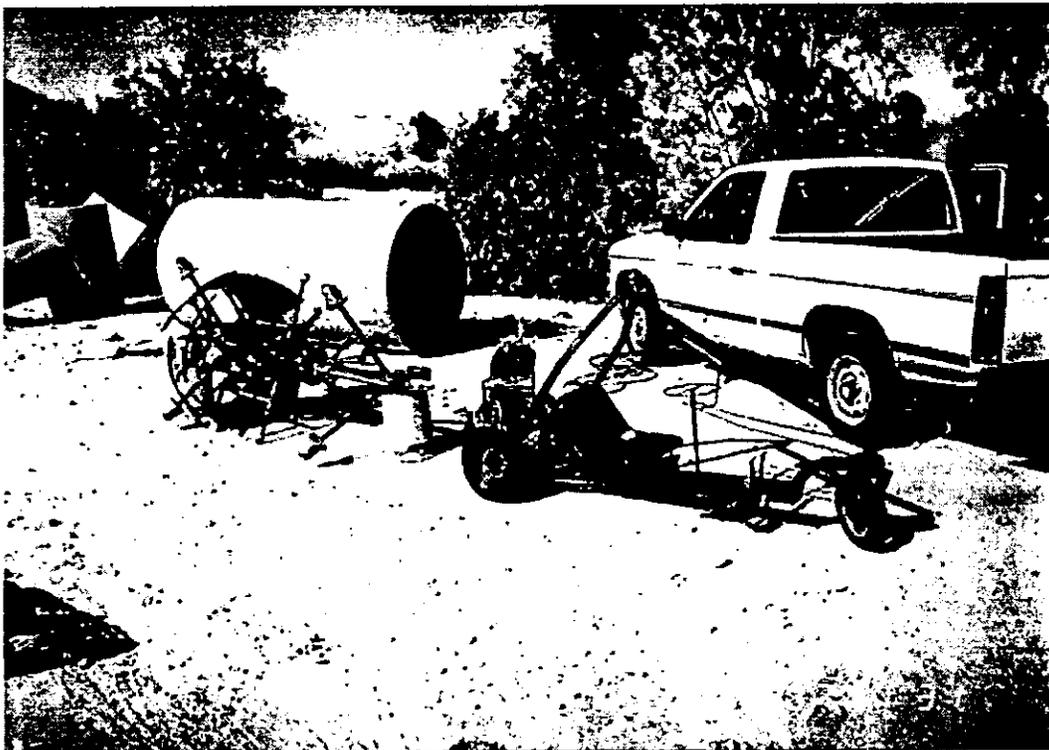
Fotografía 1.2. Diablo antes de ser lanzado. Se observa la tapa donde va el transmisor.

1.2 Dispositivo limpiador de incrustaciones

Este dispositivo fue diseñado por el Ing. Salvador Trujillo para limpiar adherencias en tuberías de gran diámetro.

El dispositivo fue construido especialmente para limpiar las tuberías de 48" del acueducto Río Colorado - Tijuana. Permite remover el material siempre y cuando no esté demasiado adherido a la tubería y, en caso donde estuviera muy adherido, retira el mayor volumen posible y alisa la superficie, disminuyendo la rugosidad del tubo.

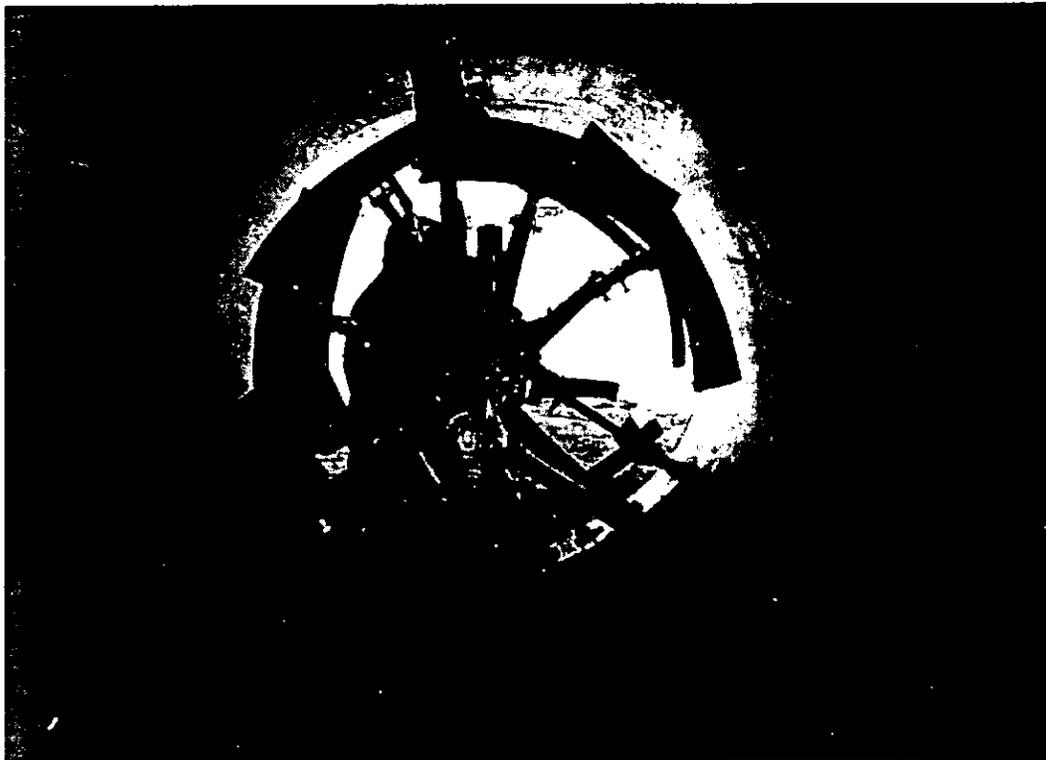
Este dispositivo es introducido dentro de la tubería (vacía), apoyando sus láminas de acero retráctiles, montadas en el cuerpo del dispositivo, sobre la pared de la tubería. Al ser arrastrado por un tractor, el dispositivo proporciona la limpieza (ver Fotografía 1.3).



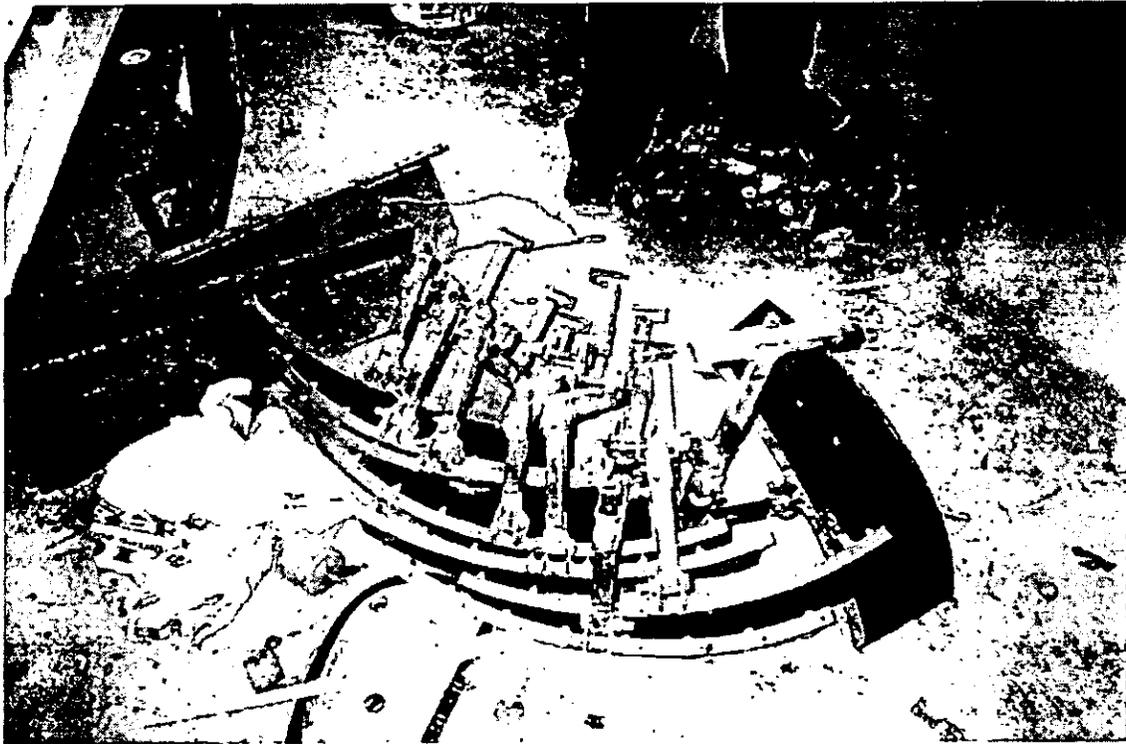
Fotografía 1.3. Dispositivo limpiador y tractor.

El tractor utilizado tiene motor eléctrico, con una suspensión formada por 3 ruedas; una delantera y dos traseras. Además, tiene una cuarta rueda pequeña, en la parte superior, que se ajusta en el interior del lomo de la tubería para proporcionar mayor tracción a las ruedas, evitando así que patinen en la superficie mojada de la tubería (en caso de estarla) cuando avanza el tractor. Asimismo, tiene un malacate que conecta el dispositivo al tractor como se observa en la Fotografía 1.3.

Las láminas de acero se ajustan en el interior de la tubería y, cuando se presenta un obstáculo, se retraen permitiendo el paso del dispositivo. Una vez librado el obstáculo, regresa a su ajuste original. En la Fotografía 1.4 se observa ajustándose el dispositivo, mientras que en la Fotografía 1.5 se muestran las láminas de acero del mismo.



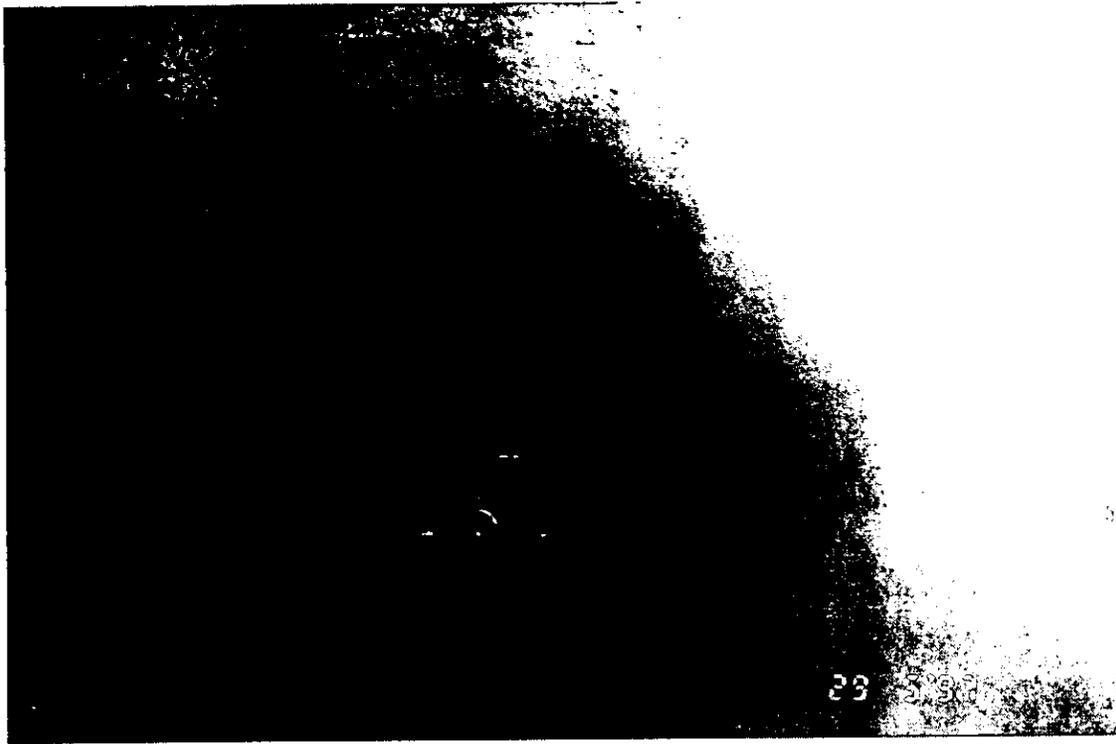
Fotografía 1.4. Ajuste de láminas limpiadoras dentro de la tubería.



Fotografía 1.5. Se observan las láminas de acero que van montadas en el dispositivo.

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

La limpieza en la tubería se realizó por tramos cortos a lo largo de la línea (de 100 m, aproximadamente). La maniobra consistió en anclar fuertemente el tractor dentro de la línea con ayuda de su cuarta rueda a 100 m de distancia del dispositivo limpiador. Después, se accionaba el malacate localizado en el tractor y el dispositivo avanzaba limpiando las paredes de la tubería. En la Fotografía 1.6 se observa el tractor antes de realizar la maniobra.



Fotografía 1.6. Tractor preparándose para hacer la limpieza.

Las maniobras de limpieza pueden ser realizadas estando secas o mojadas las paredes de las tuberías. El material producto de la limpieza fue desalojado por medio de ventanas (inserciones en la tubería) a cada 60 m sobre la línea, la Fotografía 1.7 muestra el material removido durante la limpieza. Cabe señalar que el tractor trabajó con espejos de agua hasta de 30 cm en la tubería.

El rendimiento máximo del dispositivo fue de aproximadamente 1000 m diarios. Éste se vio afectado por el tipo de adherencia que encontró en el camino; por ejemplo, en partes donde el recubrimiento interior de la tubería estaba corroído el material se adhirió más, bajando los rendimientos hasta 500 m diarios.

Cabe mencionar que este dispositivo limpiador de incrustaciones, diseñado por el Ing. Salvador Trujillo, está en trámite de patente.



Fotografía 1.7. Material depositado por efectos de limpieza.

CAPÍTULO 2

MEDICIONES EN CAMPO PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE FRICCIÓN

En este capítulo se realiza una breve descripción de los dispositivos utilizados en las campañas de medición para determinación de los coeficientes de fricción de las tuberías del acueducto Río Colorado - Tijuana. Posteriormente, se presentan resúmenes de los resultados obtenidos durante distintas campañas en el acueducto.

2.1 Descripción de los equipos de medición

Durante las mediciones de campo realizadas en el acueducto Río Colorado - Tijuana, fueron utilizados los siguientes equipos:

2.1.1 Manómetro de tubo de Bourdón

El manómetro de tubo de Bourdón tiene como principal aplicación la medición de presión estática. Los manómetros de tubo de Bourdón generalmente presentan una sección transversal elíptica y una configuración en forma de "C". Su funcionamiento consiste en aplicar una presión a la entrada del tubo y como consecuencia se presenta una deformación elástica, la cual es idealmente proporcional a la presión aplicada.

El grado de linealidad depende de la calidad del tubo. Un extremo del tubo se conecta a un sistema de relojería que, además de amplificar el desplazamiento, lo transforma en una rotación angular que se detecta mediante una aguja sobre una carátula escalada. El acoplamiento entre el tubo de Bourdón y el sistema de relojería se construye de tal manera que se pueda ajustar la operación del mecanismo para producir una linealidad óptima y minimizar los efectos de

histéresis; asimismo, sirve para compensar los efectos que se pueden ocasionar por desgaste. Además, el manómetro de tubo de Bourdón tiene una precisión de 0.1 % de la escala total, por lo que resulta muy confiable. Se ofrecen comercialmente en muchos tamaños (de 1 a 16" de diámetro de la carátula) y rangos (2 a 42 kg/cm²). En la Figura 2.1-a se muestra una fotografía del manómetro y en la Figura 2.1-b un esquema de las partes que forman un manómetro [10].

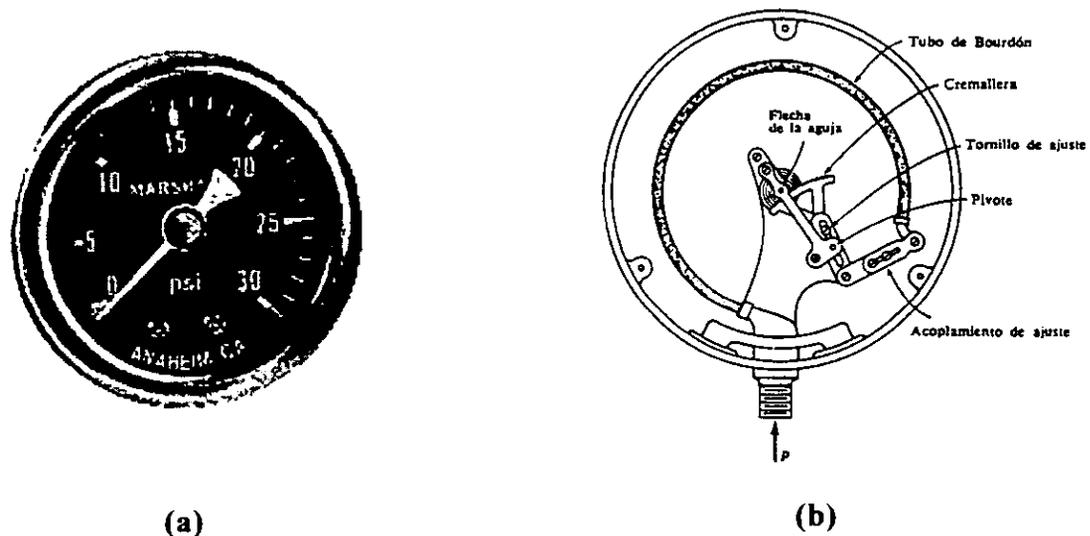


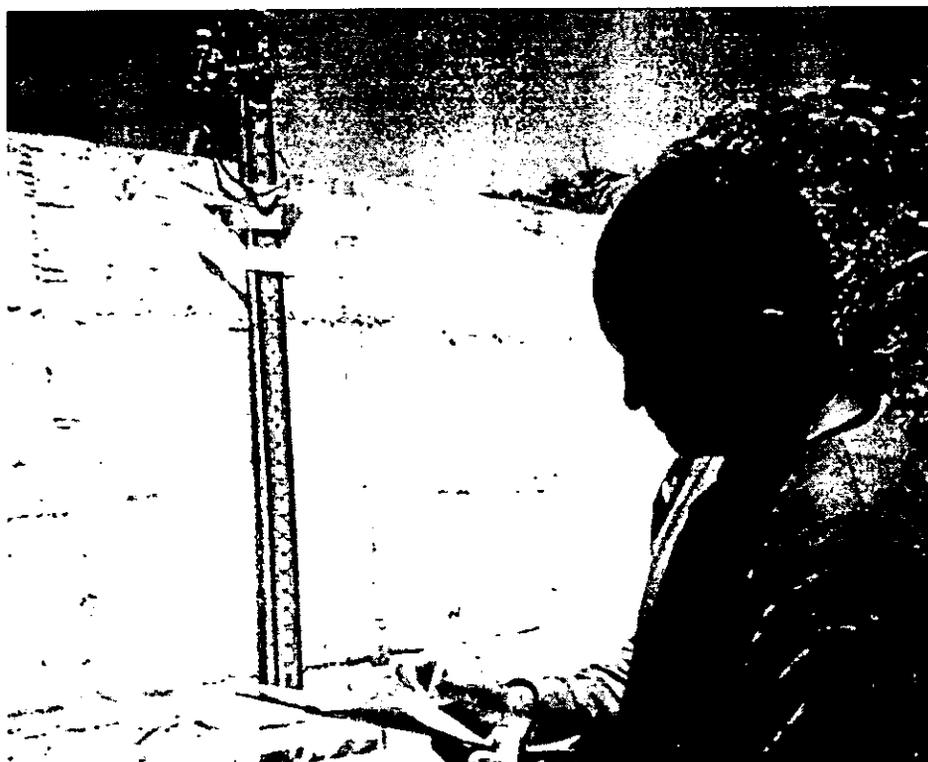
Figura 2.1. Aspectos externos e internos de un manómetro de Bourdón y sus partes constitutivas.

2.1.2 Manómetro diferencial

Este manómetro es un dispositivo que se utiliza para la determinación de las diferencias de presión. Consiste en un tubo en forma de "U", parcialmente lleno de un líquido con peso específico distinto del agua (comúnmente mercurio). Este

dispositivo se utiliza como complemento de otros equipos, ya sea para instrumentar tubos Pitot o medidores Annubar (más adelante se describen estos dispositivos).

La apariencia que presenta un manómetro diferencial ya instalado en el Acueducto Río Colorado - Tijuana, se muestra en la Fotografía 2.1.



Fotografía 2.1. Manómetro diferencial instalado en la succión de PB4 en el Acueducto Río Colorado - Tijuana.

2.1.3 Tubo Pitot

El tubo Pitot es un dispositivo que permite medir las presiones estática y dinámica y, por consecuencia, la carga de velocidad en un determinado punto en el interior de un fluido. Este sistema es muy sencillo; consiste en un tubo de dos cámaras, el cual se inserta en la tubería. El tubo Pitot registra, como ya se dijo, dos tipos de presiones: una, llamada presión alta o de estancamiento, que se

presenta en la punta del tubo (en contraflujo); la otra es la llamada presión baja que se presenta en una cara lateral al tubo Pitot. La diferencia de presión alta y baja se registra mediante un manómetro diferencial de mercurio, y es proporcional a la carga de velocidad en un determinado punto multiplicada por una constante del tubo Pitot. En la Fotografía 2.2 se observa este arreglo.

Durante las mediciones en el acueducto, las diferencias de presión en las terminales del tubo Pitot fueron registradas con ayuda de una celda diferencial, en un voltímetro digital. Con la diferencia de presión, traducida en el voltaje, se calcula la velocidad; esta se encuentra con la siguiente ecuación :

$$V = C_T \sqrt{2gmV_M} \quad (2.1)$$

donde:

C_T , constante del Tubo Pitot (adimensional).

m , constante del transductor (m/V).

V_M , voltaje medido (V).

g , aceleración debida a la gravedad (m/s^2).

V , velocidad en (m/s).

El gasto volumétrico se obtiene mediante integración de un perfil de velocidades registrado a lo largo de un diámetro en una sección transversal.



Fotografía 2.2. Arreglo para mediciones de gasto, mediante tubo Pitot, celda diferencial y manómetro diferencial con mercurio.

2.1.4 Medidor Annubar

El medidor Annubar es otro dispositivo utilizado para medir gasto, su principio de funcionamiento es similar al del tubo Pitot (en el registro de diferencias de presiones). En este caso la diferencia de presión se registra con ayuda de un sensor con múltiples orificios en sección diamante .

Las medidas de presión diferencial tienen dos componentes: la presión alta P_A y la presión baja P_B (ver Figura 2.2).

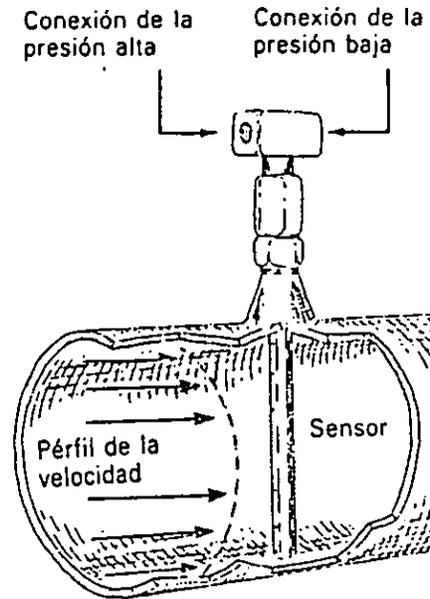


Figura 2.2. Conexiones de un medidor Annubar.

Por tanto, la diferencia de presión está dada como:

$$P_D = P_A - P_B \quad (2.2)$$

La presión alta se produce por el impacto del perfil de velocidades sobre la parte frontal del sensor. Los múltiples orificios detectan la presión de impacto promedio de la sección transversal

Cuando el perfil de velocidades continúa su paso alrededor del sensor, crea un perfil de baja presión en los orificios localizados en la parte posterior del sensor (opuestos a los de alta presión). Igual que en el lado de alta presión, en la cámara de baja presión se obtendrá una presión promedio [11]. El funcionamiento aquí descrito se muestra de manera esquemática en la Figura 2.3.

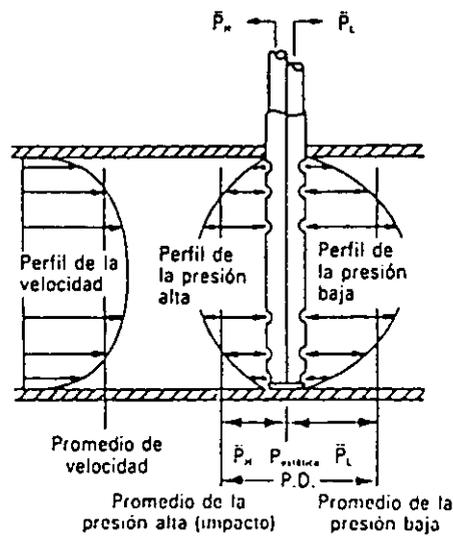


Figura 2.3. Perfil de velocidad y perfiles de alta y baja presión producidas en un medidor Annubar.

La diferencia de presión es medida como en el tubo Pitot, ya sea con manómetros diferenciales de mercurio o con transductores (dispositivo electrónico). Conocida la diferencia de presión, el fabricante del Annubar proporciona una ecuación para calcular el gasto. En este caso:

$$Q = 1.1 * 10^{-7} K D^2 \sqrt{P_D} \quad (2.3)$$

donde:

Q , gasto en m^3/s .

K , coeficiente de caudal (dado por el tipo de sensor y diámetro).

D , diámetro interior de la tubería en mm.

P_D , presión diferencial en mm de columna de agua.

Es importante observar que el Annubar a utilizar debe corresponder al diámetro de la tubería, pues los orificios para registro y promedio de presiones tiene ubicación fija a lo largo del diámetro de la sección.

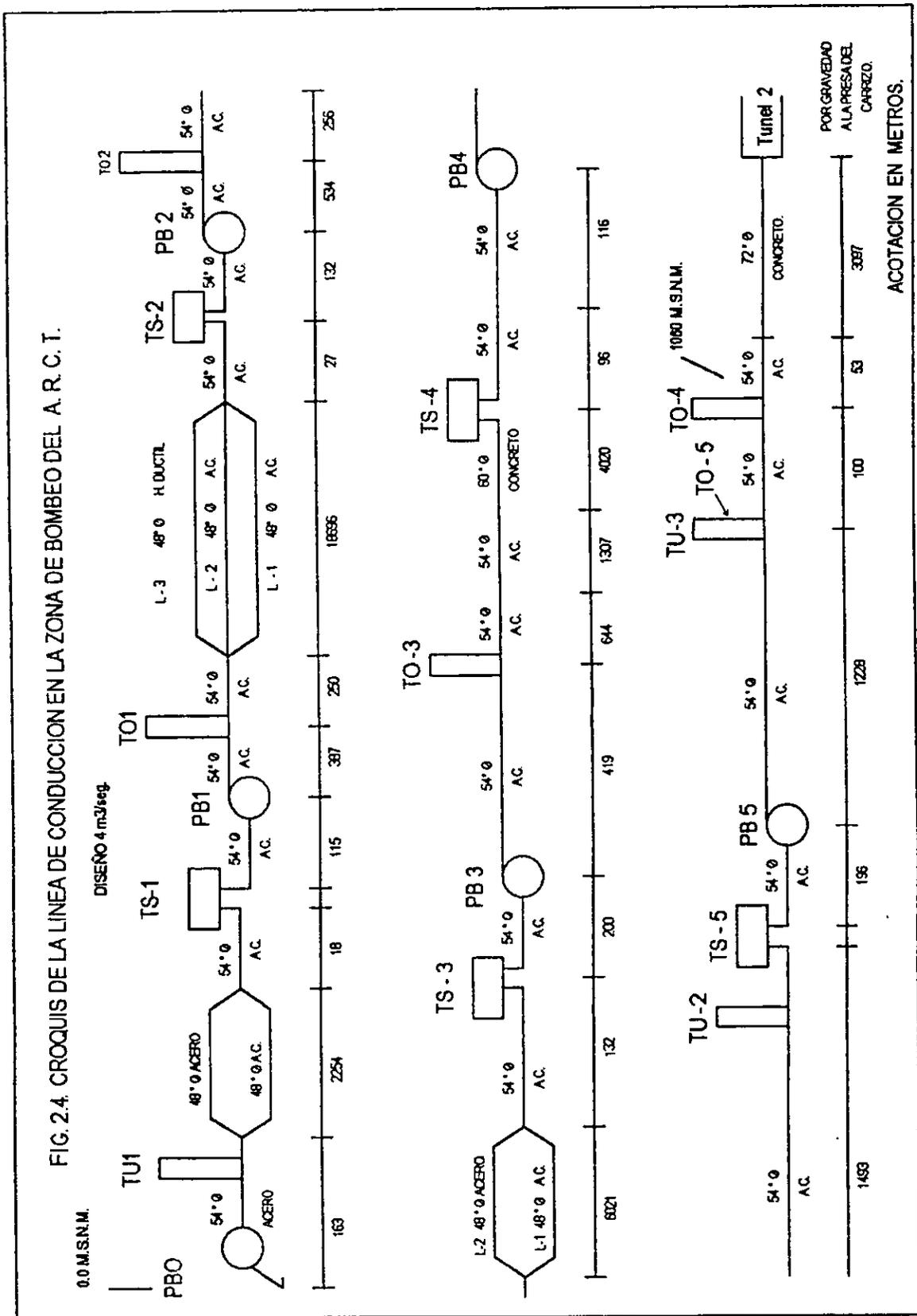
2.1.5 Sondas eléctricas

Las sondas eléctricas sirven para medir tirantes de agua en estructuras tales como tanques de sumergencia o torres de oscilación. La sonda está formada por un cable duplex graduado. En un extremo del cable se tiene un zumbador y en el otro extremo una masa metálica.

La toma de lecturas con la sonda consiste en situarse en la corona de la torre o tanque y bajar la masa de metal conectada al cable, hasta que toque la superficie del agua, de tal forma que cierre el circuito y suene el zumbador; posteriormente, se procede a la toma de lectura en el cable graduado.

2.2 Mediciones realizadas en octubre de 1996

Los días 14 y 15 de octubre de 1996 se efectuaron mediciones en el acueducto Río Colorado - Tijuana con la operación de 2 equipos de bombeo por planta, en los tramos comprendidos entre las plantas de bombeo PB0, PB1, PB2 y PB3. El objetivo de esta campaña fue la determinación de la capacidad de conducción de las tuberías en el tramo a bombeo, una vez que el acueducto empezó a trabajar nuevamente en septiembre de 1996, luego de permanecer fuera de operación durante dos años. En la Figura 2.4 se muestran los arreglos para las líneas de conducción y estructuras de la zona a bombeo del acueducto.



Durante estas mediciones se determinó el gasto volumétrico, con la operación simultánea de dos equipos de bombeo por planta, así como el coeficiente de pérdida de carga por fricción (f), con ayuda de la fórmula de Darcy - Weisbach.

Para la determinación del gasto se utilizó un tubo Pitot, insertado en una válvula tipo Mueller, en algún punto sobre la línea de conducción.

Por otra parte, se determinaron niveles con sondas eléctricas en tanques de sumergencia y en torres de oscilación de las plantas 1, 2 y 3; además, se instalaron manómetros a lo largo de las líneas de conducción en las plantas 0, 1 y 2 para determinar un gradiente hidráulico S_f , con el cual se estableció el factor de fricción (fórmula de Darcy - Weisbach).

Durante las pruebas se tomaron las mediciones de nivel y presión en manómetros cada 5 minutos por un período de tiempo prolongado; las mediciones de gasto se tomaron con tubo Pitot, cuando el flujo se había establecido.

2.2.1 Mediciones en PB0

En el tramo PB0-TS1 las mediciones se efectuaron con la operación de 2 equipos de bombeo a través de sus dos líneas de acero paralelas de 48" de diámetro.

En este tramo se colocó un manómetro en el múltiple de descarga de la PB0, otro al pie del tanque unidireccional 1 antes de la bifurcación de las dos líneas y un último en la llegada de la TS1. Se registraron lecturas de presión en manómetros y niveles en el TS1 y en el cárcamo de succión de la PB0; por último, se realizaron 2 aforos con tubo Pitot en cada una de las líneas.

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en esta campaña.

**Acueducto Río Colorado - Tijuana
PB0 - Bombeo con 2 equipos 14/oct/96**

Cadenamiento (m)	Elevación (msnm)	Presión (mca)	Piezométrica (msnm)	Aforo Línea 1 (m ³ /s)	Aforo Línea 2 (m ³ /s)	Aforo Total (m ³ /s)
0	-1.08	57.85	56.77	1.151	1.08	2.231
148	0.49	54.94	55.43			
2435	44.37	8.10	52.47			

Tabla 2.1

2.2.2 Mediciones en PB1

El tramo TO1-TS2 cuenta con 3 líneas de conducción en paralelo de 18,696 m de longitud y 48" de diámetro. Las líneas 1 y 2 son de acero y la 3 es de hierro dúctil.

Estas mediciones se llevaron a cabo durante la operación con dos equipos de bombeo en PB1, manteniendo abiertas las líneas en paralelo 2 y 3. Se instalaron manómetros a lo largo de estas líneas y se midieron los tirantes en la TO1 y la TS2.

Se realizaron dos aforos con tubo Pitot; un sobre la rampa de descenso de la TO1 (gasto total) y otro sobre la línea 2. El gasto en la línea 3 se obtuvo como diferencia del gasto total menos el gasto en la línea 2. Las condiciones en flujo establecido de la prueba en PB1 se resumen en la Tabla 2.2.

**Acueducto Río Colorado - Tijuana
PB1 - Bombeo con 2 equipos 14/oct/96**

Línea #	Cadenamiento VAEA (m)	Elevación (msnm)	Presión (mca)	Piezométrica (msnm)
2	4385	74.2	115.2	189.4
3	4385	73.4	118.11	191.51
2	5280	93.73	94.75	188.48
3	5280	92.64	96.2	188.84
2	7620	121.06	64.87	185.93
3	7620	120.18	65.92	186.1
2	9660	102.41	80.54	182.95
3	9660	101.86	80.96	182.82
2	12220	91.26	89.43	180.69
3	12220	91.48	89.18	180.66
2	16620	123.26	50.48	173.74
3	16620	122.95	52.03	174.98
2	21340	119.78	49.98	169.76
3	21340	119.05	50.83	169.88
2	22750	161.22	8.07	169.29
3	22750	161.22	8.07	169.29

Gastos		
Q _{TOTAL} (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	Q ₃ (m ³ /s)
2.353	1.003	1.35

Tabla 2.2.

2.2.3 Mediciones en PB2

Las mediciones en PB2 se llevaron a cabo también con el funcionamiento de 2 equipos de bombeo, en el tramo comprendido entre la TO2 y el TS3. Este tramo tiene dos tuberías en paralelo de acero de 48" de diámetro.

En este tramo se colocaron manómetros a lo largo de las líneas de conducción; adicionalmente, se instalaron manómetros en la succión y descarga de la PB2, además de tomar lecturas de nivel en la TO2 y en los tanques de sumergencia 2 y 3. También se efectuaron mediciones de gasto con tubo Pitot en

Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías

cada una de las líneas de conducción. En la Tabla 2.3 se resumen las cargas piezométricas obtenidas para cada punto de instalación de manómetro.

Acueducto Río Colorado - Tijuana PB2 - Bombeo con 2 equipos 14/oct/96

Línea #	Cadenamiento VAEA (m)	Elevación (msnm)	Presión (mca)	Piezométrica (msnm)
1	25060	188.34	108.18	296.52
2	25060	189.50	109.04	298.54
1	25300	187.57	108.18	295.75
2	25300	187.16	108.18	295.34
1	28530	211.64	78.41	290.05
2	28530	211.64	79.26	290.90

Estructura	Cadenamiento (m)	Corona (msnm)	Bordo libre (m)	Piezométrica (msnm)
TS3	29871	291.62	-3.79	287.83

Gastos		
Q ₁ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	Q _{TOTAL} (m ³ /s)
1.272	1.278	2.55

Tabla 2.3.

2.2.4 Mediciones en PB3

En la PB3 las mediciones se efectuaron en el tramo TO3 - TS4. Este tramo se divide en dos: el tramos TO3-CT (cambio de tubería) formado por tubería de acero de 54" de diámetro, y el CT-TS4 de tubería de concreto de 60" de diámetro.

De manera similar, se instalaron manómetros en la succión y descarga de la planta, además de tomarse lecturas en manómetros y niveles tanto en la torres de oscilación (TO3) como en el tanque de sumergencia 4 (en este caso no se tuvieron

diferencias en las lecturas de presión y nivel durante la prueba). Durante la prueba se determinó el gasto con tubo Pitot en la rampa de descenso de la TO3.

Esta prueba se desarrolló con flujo establecido, con la operación de 2 equipos de bombeo trabajando en PB3. En la Tabla 2.4 se muestra el nivel en la torre de oscilación 3 y en el tanque de sumergencia 4, además del gasto aforado en la rampa de descenso de la TO3.

**Acueducto Río Colorado - Tijuana
PB3 - Bombeo con 2 equipos 15/oct/96**

Presión en PB3 (mca)		N _{TO3} (msnm)	N _{TS4} (msnm)	Q _{TO3} (m ³ /s)
Succión	Descarga			
63.768	201.833	420.55	410.45	2.49

Tabla 2.4.

2.3 Mediciones realizadas en diciembre de 1996

Los días 9, 10 y 11 de diciembre de 1996, se llevaron a cabo mediciones en el acueducto en los tramos comprendidos entre las plantas de bombeo PB0, PB2, PB3, PB4 y PB5 (se excluye la planta de bombeo uno, ya que una de sus líneas de conducción se encontraba fuera de servicio por mantenimiento). El objetivo fue determinar la capacidad de conducción del acueducto con tres equipos de bombeo por planta. Cabe mencionar que cada prueba se realizó estando lleno el tanque de sumergencia de la planta y vacío el tanque subsecuente. Estas mediciones se realizaron en forma independiente en los siguientes tramos :

- Mediciones en PB0
 - Planta de Bombeo 0 - Tanque de Sumergencia 1 (PB0-TS1)

- Mediciones en PB2
 - Tanque de Sumergencia 2 - Tanque de Sumergencia 3 (TS2-TS3)
- Mediciones en PB3
 - Tanque de Sumergencia 3 - Tanque de Sumergencia 4 (TS3-TS4)
- Mediciones en PB4
 - Tanque de Sumergencia 4 - Tanque de Sumergencia 5 (TS4-TS5)
- Mediciones en PB5
 - Tanque de Sumergencia 5 - Torre de Oscilación 4 (TS5-TO4)

En los tramos anteriores se determinó el gasto volumétrico con 3 equipos de bombeo así como el coeficiente de pérdida de carga por fricción.

Para la determinación del gasto se utilizó un tubo Pitot, insertado en una válvula tipo Mueller. Además, personal de operación del acueducto proporcionó apoyo en las lecturas del gasto mediante un medidor de ultrasonido. Los resultados estimados con el ultrasonido resultaron muy similares a los aforados con tubo Pitot.

Las mediciones de gasto con el equipo de ultrasonido permitieron conocer el gasto aforado en cualquier momento; en este caso se tomaron lecturas cada 5 minutos durante las pruebas.

También se instalaron manómetros de carátula, previamente calibrados, localizados en la succión y descarga de las plantas de bombeo; simultáneamente se realizaron mediciones de niveles con sondas eléctricas, localizadas en las torres de oscilación y tanques de sumergencia.

Las mediciones de presión y nivel también se tomaron cada 5 minutos por un período de tiempo prolongado durante las pruebas. Para efecto de los análisis se consideran las lecturas de presión y niveles correspondientes al momento de realizar la medición de gastos con el ultrasonido.

2.3.1 Mediciones en PB0

Las mediciones se efectuaron en el tramo PB0-TS1 con la operación de 3 equipos de bombeo a través de las dos líneas de acero en paralelo de 48”.

En este tramo se colocó un manómetro en el múltiple de descarga de PB0, al mismo tiempo que se midieron niveles en el TS1 y en el cárcamo de succión de la planta; también se realizaron aforos con el ultrasonido y con tubo Pitot. Las principales mediciones se muestran en la Tabla 2.5.

**Acueducto Río Colorado - Tijuana
Pruebas en PB0, 3 equipos de bombeo 11/12/96**

Hora hh:mm	Gasto $Q_{\text{ULTRASONIDO}}$ (m ³ /s)	Piezométrica			Observaciones
		N_{SUC} (msnm)	H_{DESC} (msnm)	N_{TS1} (msnm)	
17:32		-1.77	59.42	48.09	Arranca 3er equipo
17:37	3.83	-1.77	59.42	48.57	
17:42	3.84	-1.77	60.12	49.08	Aforo pitométrico: $Q = 3.85 \text{ m}^3/\text{s}$
17:47	3.79	-1.78	60.12	49.52	
17:52	3.76	-1.79	60.83	50.10	
17:57	3.75	-1.80	60.83	50.52	
18:02	3.69	-1.80	61.18	50.94	
18:07	3.70	-1.81	61.18	51.33	
18:12	3.66	-1.82	61.53	51.76	
18:17	3.63	-1.83	62.23	52.22	
18:22	3.62	-1.84	62.23	52.67	

Tabla 2.5.

2.3.2 Mediciones en PB2

En el tramo de la TS2-TS3 se efectuaron mediciones cuando funcionaban las dos tuberías de acero en paralelo de 48” de diámetro, comprendidas en el tramo de la TO2-TS3.

Se instalaron manómetros en la succión y descarga de la PB2, se tomaron lecturas de nivel en la TO2 y en los tanques de sumergencia 2 y 3; asimismo, se efectuaron mediciones de gasto con tubo Pitot y con el ultrasonido .

Al comenzar las mediciones se encontraban dos equipos de bombeo con sus válvulas de descarga estranguladas (120 vueltas liberadas) y un tercer equipo liberado al 100 % (750 vueltas). Para establecer la máxima capacidad de conducción, posteriormente se procedió a liberar los dos equipos restantes. Cabe mencionar que durante la prueba la TO2 no derramó, pero se llegaron a determinar bordos libres cercanos a los 50 cm. En la Tabla 2.6 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

**Acueducto Río Colorado - Tijuana
Pruebas en PB2, 3 equipos de bombeo 11/12/96**

Hora	Gasto	Presión		Piezométrica			Observaciones
		H _{auc}	H _{desc}	N _{Ta2}	N _{To2}	N _{Ta3}	
hh:mm	Ultrasonido	(psi)	(psi)	(msnm)	(msnm)	(msnm)	
12:10	3.50	27	219	169.32	295.80	285.38	Arranca 3er equipo
12:15	3.42	27	221	169.01	300.30	285.51	2 equipos estrangulados 120 vueltas
12:20	3.30	27	222	168.64	301.50	285.77	1 equipo liberado al 100%
12:25	3.29	27	222	168.27	302.10	286.04	
12:30	3.24	27	222	167.96	302.30	286.35	
12:35	3.25	27	222	167.71	302.46	286.61	
12:40	3.20	26	222	167.43	302.60	286.80	
12:45	3.23	25	222	167.05	302.80	287.10	
12:50	3.23	25	223	166.79	303.10	287.32	
12:55	3.25	25	223	166.48	303.40	287.58	Aforo pitométrico: Q = 3.50 m ³ /s
13:00	3.26	25	224	166.17	303.65	287.85	2 equipos liberados
13:05	3.23	24	224	165.87	303.92	288.10	
13:10	3.24	24	224	165.54	304.01	288.36	3 equipos liberados
13:15	3.22	23	225	165.28	304.09	288.60	
13:20	3.20	22	226	165.02	304.14	288.82	
13:25	3.18	22	226	164.73	304.25	289.06	
13:30	3.15	22	226	164.49	304.35	289.30	Aforo pitométrico: Q = 3.39 m ³ /s
13:35	3.13	22	226	164.22	304.42	289.50	

Tabla 2.6.

2.3.3 Mediciones en PB3

Aquí también se instalaron manómetros en la succión y descarga de la planta, y se tomaron lecturas en manómetros y niveles tanto en la torres de oscilación (TO3) como en tanques de sumergencia 3 y 4. Durante la prueba se determinó el gasto con tubo Pitot y con el ultrasonido.

Esta prueba se desarrolló en un principio con los 3 equipos de bombeo estrangulados, pero sólo fue posible liberar uno de ellos porque se presentó el desbordamiento de la TO3. La Tabla 2.7 muestra los resultados obtenidos .

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Pruebas en PB3, 3 equipos de bombeo 10/12/96

Hora hh:mm	Gasto Ultrasonido (m ³ /s)	Presión		Piezométrica			Observaciones
		H _{suc} (psi)	H _{desc} (psi)	N _{rs3} (msnm)	N _{ros} (msnm)	N _{rs4} (msnm)	
15:42	2.99	95	282	289.72	415.70		
15:45		96	285	289.52	418.30	405.68	Arranca 3er equipo. Válvulas de descarga estranguladas
15:50	2.95	96	289	289.32	419.65	405.79	
15:55	3.10	92	290	289.12	421.42	405.95	Equipo 3 liberado al 100%
16:00	3.30	91	291	288.82	422.95	406.15	
16:05	3.25	90	294	288.52	424.10	406.40	
16:10	3.35	90	295	288.17	425.35	406.67	
16:15	3.51	89	299	287.82	426.65	406.94	
16:20	3.59	89	300	287.42	427.55	407.22	Derrama TO3
16:25	3.44	88	300	287.02	427.55	407.62	
16:30	3.42	88	300	286.72	427.55	407.92	
16:35	3.30	88	300	286.42	427.55	408.19	
16:40	3.24	87	299	286.17	427.47	408.49	
16:45	3.28	87	299	285.87	427.47	408.77	Aforo pitométrico: Q = 3.15 m ³ /s
16:50	3.29	87	299	285.57	427.55	409.02	
16:55	3.24	87	299	285.32	427.55	409.27	
17:00	3.20	86	299	285.07	427.55	409.53	
17:05	3.18	86	299	284.82	427.55	409.77	

Tabla 2.7.

2.3.4 Mediciones en PB4

El tramo TS4-TS5 está constituido por tubería de acero de 54". De igual forma, como en las pruebas anteriores, se determinaron presiones en la succión y descarga de la planta, y se contó con lecturas de presión en el hidroschock. Igualmente se determinaron gastos en la línea y niveles en las estructuras.

Las mediciones se iniciaron con los tres equipos de bombeo liberados al 100%. La Tabla 2.8 presenta un resumen de estos resultados.

Acueducto Río Colorado - Tijuana								
Pruebas en PB4, 3 equipos de bombeo 10/12/96								
Hora hh:mm	Gasto Ultrasonido (m ³ /s)	Presión			Piezométrica			Observaciones
		H _{suc} (psi)	H _{desc} (psi)	H _{hidroschock} (kg/cm ²)	N _{TS4} (msnm)	N _{TSZ} (msnm)	N _{TS5} (msnm)	
11:10			525	20.50		737.27	736.52	Arranca 3er equipo
11:15	3.83	44	524	20.50	410.15	737.88	737.02	Todos los equipos con válvulas
11:20	3.85	43	524	20.50	409.92	738.43	737.42	al 100%
11:25	3.81	42	524	20.60	409.43	738.96	737.82	
11:30	3.81	40	524	20.60	408.87	739.45	738.22	
11:35	3.72	39	525	20.70	408.58	739.99	738.67	
11:40	3.72	38	525	20.75	408.17	740.41	739.02	Aforo pitométrico: Q = 3.40 m ³ /s
11:45	3.70	37	525	20.75	407.76	740.76	739.47	
11:50	3.65	37	526	20.75	407.45	741.11	739.77	
11:55	3.63	37	526	20.75	407.06	741.46	740.17	
12:00	3.60	36	527	20.75	406.65	741.81	740.52	
12:05	3.58	36	527	-	406.38	742.13	740.82	
12:10	3.54	36	528	20.00	406.04	742.46	741.17	

Tabla 2.8.

2.3.5 Mediciones en PB5

El tramo TS5-TO4 cuenta con una línea de conducción de acero de 54" de diámetro.

Las mediciones se desarrollaron de forma similar a los tramos anteriores, pero con la diferencia de que se presentó desbordamiento de la TO4 al estar

Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías

liberados los tres equipos de bombeo, por lo cual se procedió al estrangulamiento de las válvulas de descarga de los equipos de bombeo de la PB5. La Tabla 2.9 muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Acueducto Río Colorado - Tijuana Pruebas en PB5, 3 equipos de bombeo 9/12/96						
Hora	Q	Presión		Piezométrica		Observaciones
hh:mm	Ultrasonido	H _{SUC}	H _{DESC}	N _{TS}	N _{TO4}	
	(m ³ /s)	(psi)	(psi)	(msnm)	(msnm)	
15:31	2.48	58	530	741.07	1061.5	Arranca 3er equipo
15:41	3.86	55	535	740.26	1066.1	Todos los equipos con válvula al 100%
15:51	3.76	55	536	739.50	1067.1	Desborda TO4
16:01	3.73	54	536	738.82	1067.1	
16:11	3.74	53	535	737.97	1067.1	Aforo pitométrico: Q = 3.64 m ³ /s
16:21	3.66	52	535	737.22	1067.1	Quiebracargas liberados
16:31	3.64	51	535	736.47	1066.4	
16:41	3.60	50	534	735.82	1066.3	

Tabla 2.9.

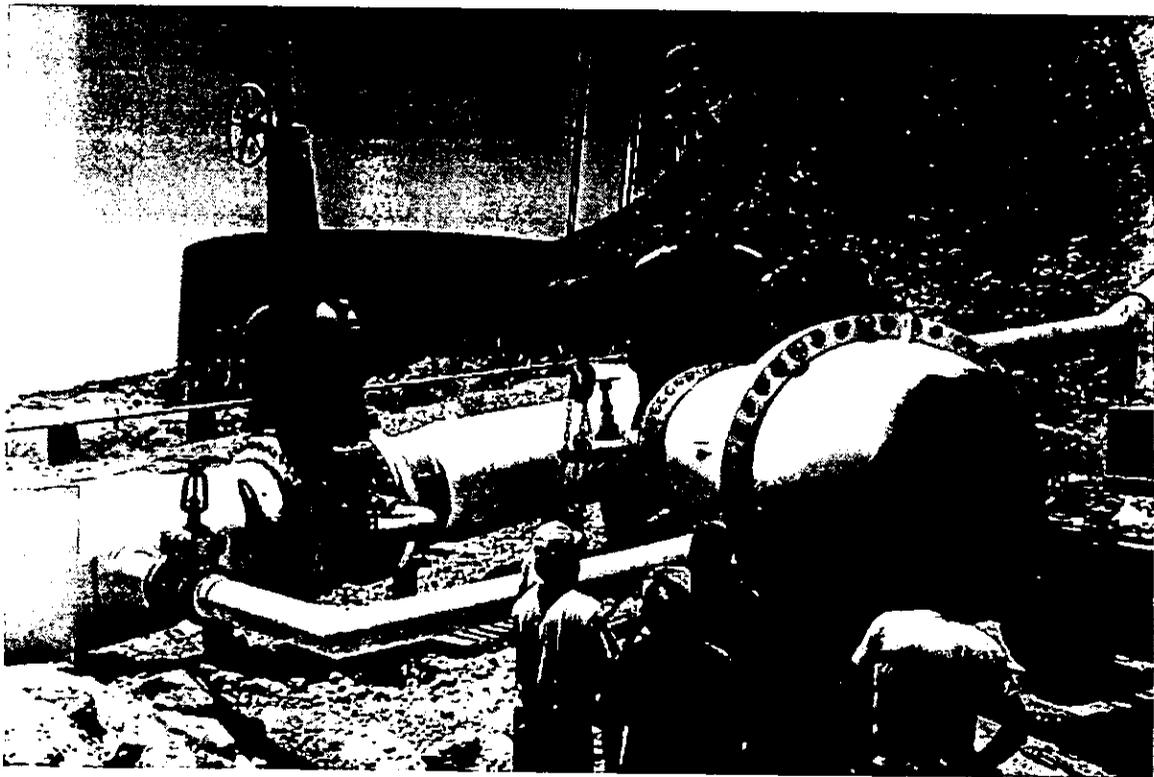
2.4 Mediciones en junio de 1997

Los días 25 y 27 de junio, se realizaron mediciones para determinar el beneficio de la limpieza de tuberías sobre la capacidad de conducción. Las mediciones fueron realizadas, primero sobre la línea 2 del tramo TO1-TS2, después de haber pasado dos diablos de limpieza y, posteriormente, al operar con tres equipos en cada una de las plantas de bombeo con flujo establecido.

2.4.1 Mediciones en el tramo de la TO1-TS2

Las mediciones en este tramo, descrito anteriormente, se efectuaron el 25 de junio sobre la línea 2, después de haber realizado limpieza por medio de 2 diablos de baja densidad. A continuación se describe, en primer término, como se realizó esta limpieza y, después, la descripción de las mediciones.

El día 23 de junio de 1997 se realizó el primer lanzamiento de uno de los diablos de baja densidad; éste fue lanzado por medio de una esclusa, localizada sobre la rampa de ascenso a la TO1 de 54"; la esclusa se insertó en forma de "Y" con la tubería como se ilustra en la Fotografía 2.3. En la fotografía se pueden apreciar las dos válvulas de compuerta de 48" con su respectivo by-pass (que facilita la apertura de las válvulas). Además, cuenta con un by-pass de mayor longitud y diámetro que conecta la línea principal a la esclusa de lanzamiento; esta esclusa tiene una tapa semiesférica con un vástago interior en forma de cruceta que es removida al insertar los diablos.



Fotografía 2.3. Estructura lanzadiablos en la rampa de ascenso a la TO1.

La maniobra de lanzamiento se realizó con la operación de un equipo de bombeo en la PB1, desarrollándose de la siguiente forma:

- a) Se tenían cerradas las válvulas de compuerta de la esclusa y del by-pass principal.

- b) Se removió la tapa semiesférica de la esclusa y se procedió a insertar el diablo con ayuda de una grúa. Ver Fotografía 2.4.



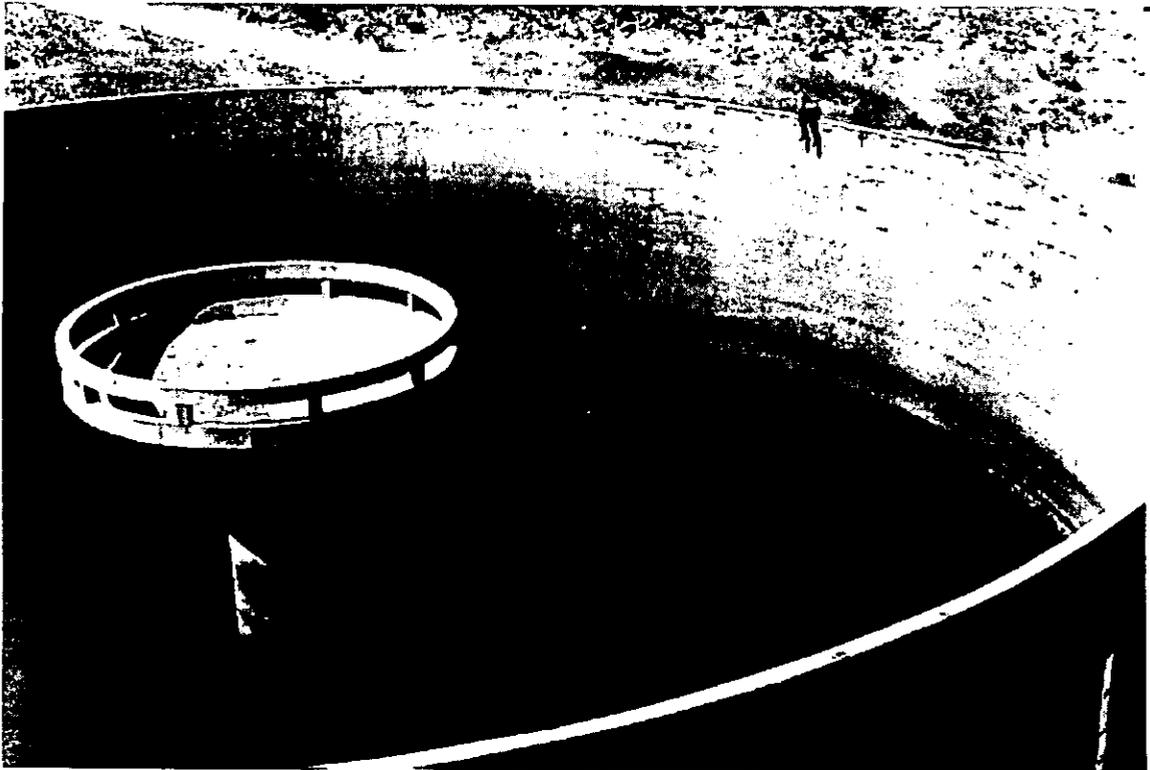
Fotografía 2.4. Maniobra de colocación del diablo en la esclusa con ayuda de la grúa.

- c) Una vez colocada la tapa en la esclusa, se abrió el by-pass de la línea principal y se presurizó la esclusa; adicionalmente, se tuvo una válvula en la parte superior de la esclusa que sirvió para purgar el aire atrapado en ella.
- 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 el diablo de la esclusa. La diferencia de presión fue de 7 psi, registrada por un manómetro insertado en la esclusa.

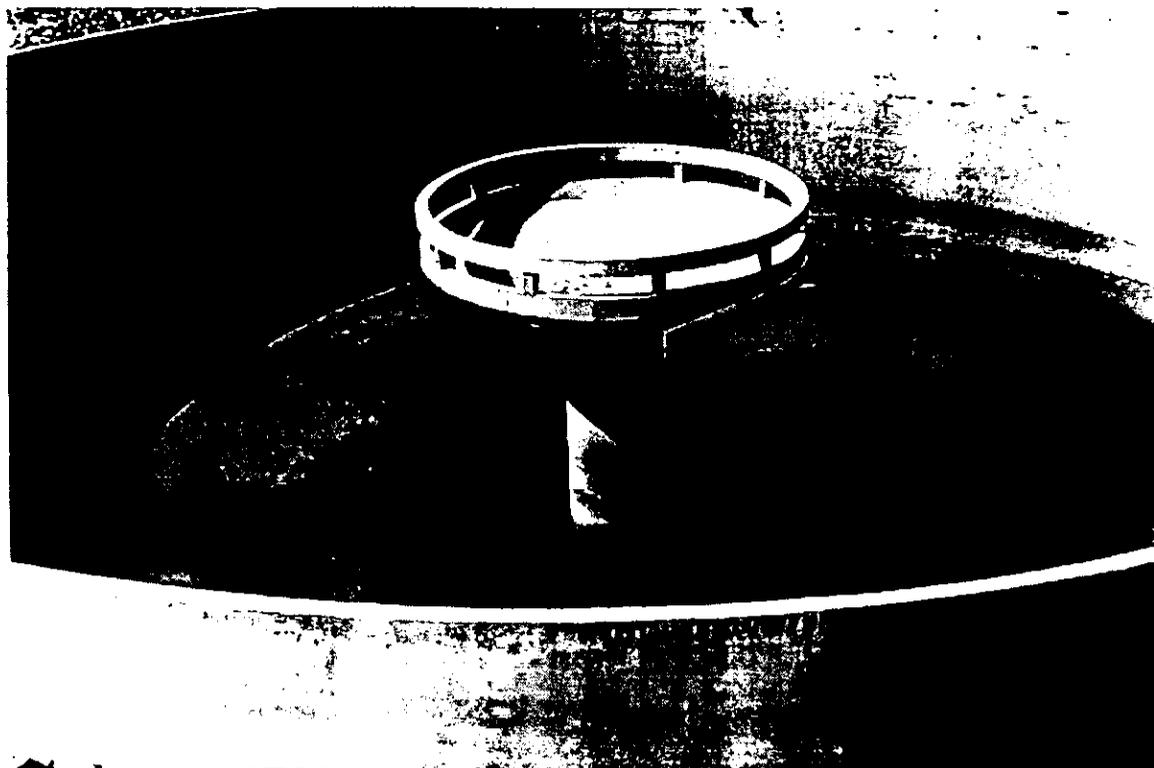
El recorrido del diablo hasta el tanque de sumergencia 2 duró aproximadamente 5 horas, con una velocidad cercana a 1 m/s. Para detectar la posición del diablo fue necesario insertar un dispositivo en él, que permitiera conocer su ubicación en cualquier momento hasta su llegada al TS2.

Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías

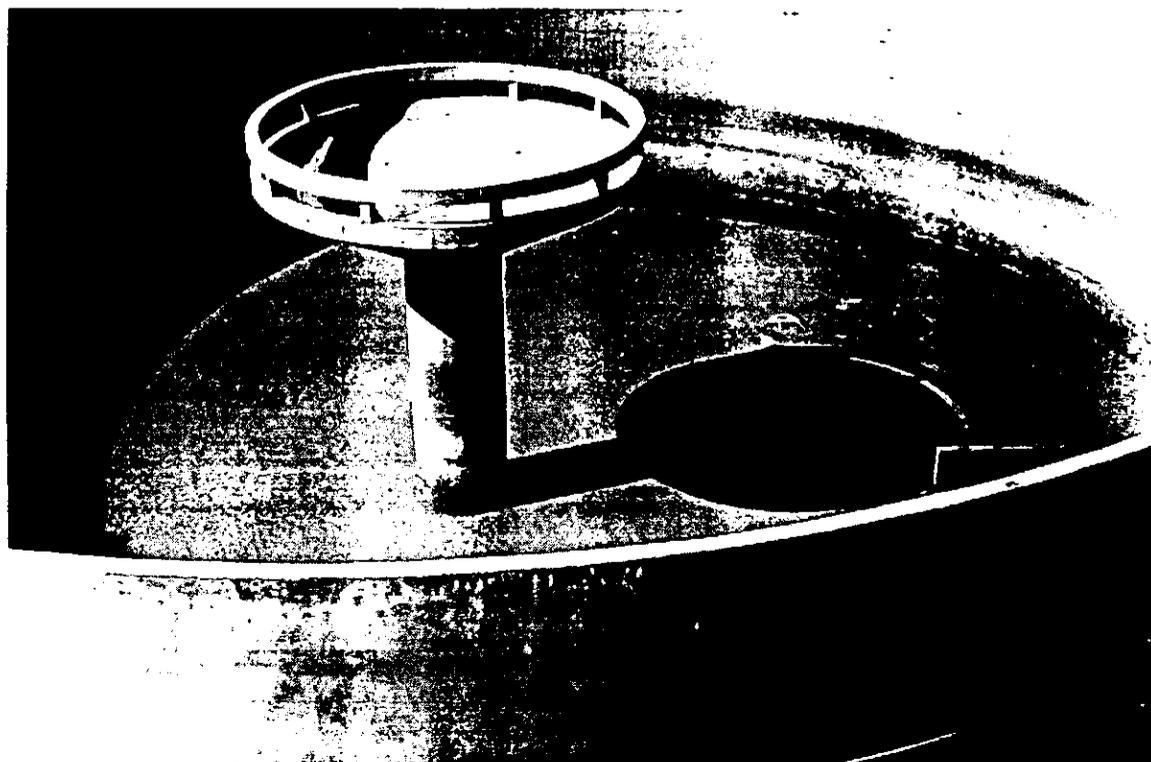
De esta misma forma se realizó el lanzamiento de un segundo diablo, similar al anterior. En las Fotografías 2.5, 2.6 y 2.7 se muestra la llegada del segundo diablo al TS2 (obsérvese cómo se incrementa la turbiedad del agua en el interior del tanque, producto de la limpieza de material en la tubería).



Fotografía 2.5. En espera de la llegada del diablo a la TS2 (agua clara).



Fotografía 2.6. Manchas de material en el interior del TS2.



Fotografía 2.7. Llegada del diablo a la TS2, el agua esta completamente turbia.

Una vez que llegó el segundo diablo al TS2, se iniciaron las maniobras para sacar los dos diablos con la ayuda de una grúa. En la Fotografía 2.8 se observa la grúa extrayendo parte de uno de los diablos. Los diablos llegaron en malas condiciones por lo que tuvieron que ser sacados por partes con ayuda de la grúa.



Fotografía 2.8. Maniobras para sacar el diablo del TS2.

Se realizaron intentos de lanzar dos diablos más con densidad mayor que los anteriores, pero se tuvieron problemas, por lo que se determinó suspender las maniobras de limpieza.

Suspendidas las maniobras de limpieza, se realizaron mediciones en este tramo durante la operación con dos equipos de bombeo en PB1, manteniendo

abiertas las líneas en paralelo 2 y 3. Asimismo, se aforó el gasto de la línea 2 en la llegada al TS2, utilizándose un tubo de Pitot.

Por otra parte, se colocaron manómetros en la succión y descarga de la PB1; adicionalmente, se instalaron manómetros a lo largo de la línea 2 para determinar, como se verá en el capítulo 3, un gradiente hidráulico S_f , con el cual se estableció el factor de fricción en la fórmula de Darcy - Weisbach. Se determinaron niveles con sondas eléctricas en los tanques de sumergencia (1 y 2) y en la torre de oscilación uno (TO1).

Las mediciones de presión y nivel se efectuaron cada 10 minutos por un tiempo prolongado, mientras que la medición de gasto se realizó una vez que el flujo se había establecido en el tramo. En la Tabla 2.10 se muestra los resultados obtenidos en las mediciones. Para efectos de análisis se consideraron las lecturas de presión y nivel correspondientes al momento de realizar la medición de gasto.

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Pruebas en el tramo TO1-TS2 con 2 equipos en operación en PB1
Línea 2 (25/06/97)

Gasto aforado 1.36 m ³ /s		Presiones						
TO1	TS2	PB1 equipo 4		PB1	VAEA	VAEA	VAEA	VAEA
Bordo libre	Tirante	Succión	Descarga	Mul. Des	4+385	9+660	16+620	21+340
(m)	(m)	psi	psi	psi	psi	psi	psi	psi
4.61	4.67	25	220	222	170	122	80	79
Piezométricas								
TO1	TS2	PB1 equipo 4		PB1	VAEA	VAEA	VAEA	VAEA
		Succión	Descarga	Mul. Des	4+385	9+660	16+620	21+340
(msnm)	(msnm)	(msnm)	(msnm)	(msnm)	(msnm)	(msnm)	(msnm)	(msnm)
185.69	165.89	48.1825	186.404	185.8214	191.279	185.4614	176.812	172.222

Tabla 2.10

2.4.2 Mediciones durante la operación en flujo establecido con 3 equipos de bombeo por planta

Las mediciones se efectuaron el día 27 de junio durante la operación con flujo establecido, con tres equipos en cada una de las seis plantas de bombeo. En este caso, se midieron las presiones con manómetros de carátula en los múltiples de succión y descarga de todas las plantas, así como los niveles con sondas eléctricas en todas las torres de oscilación y tanques de sumergencia del acueducto; lo anterior, cada 10 minutos durante el tiempo de prueba. Adicionalmente, se efectuó un aforo con tubo Pitot en la descarga de la PB2 y el registro de gasto en los medidores Annubar de las plantas de bombeo 4 y 5. En la Tabla 2.11 se muestran los valores de los gastos promedio aforados durante un período de observación de 2 horas.

AFORO	Tubo Pitot (PB2)	Annubar (PB4)	Annubar (PB5)
GASTO (m³/s)	3.54	3.59	3.51

Tabla 2.11

Como se observa en esta Tabla, el gasto aforado oscila entre 3.5 y 3.6 m³/s. Cabe señalar que durante las pruebas no hubo variación del nivel del agua en el cárcamo de PB0 y, por la apertura de compuertas en el canal principal del acueducto y en un canal de apoyo, el gasto entregado a PB0 se estimó en 3.6 m³/s.

Para los efectos de este análisis se ha tomado como representativo el promedio de los gastos de la Tabla 2.11, es decir, $Q = 3.55 \text{ m}^3/\text{s}$; se consideró el promedio de presiones de succión y descarga en cada planta de bombeo y niveles de operación en torres y tanques. En la Tabla 2.12 se observan las cotas de la línea de cargas piezométricas registradas durante las mediciones; asimismo, en la Figura 2.5 se representan gráficamente.

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Pruebas con 3 equipos de bombeo (27/06/97)
Tabla de cargas piezométricas en estructuras y en plantas de bombeo

PB0		PB1		PB2		PB3		PB4		PB5	
Canal	Des	Suc	Des	Suc	Des	Suc	Des	Suc	Des	Suc	Des
(msnm)		(msnm)		(msnm)		(msnm)		(msnm)		(msnm)	
-1.4046	61.529	51.261	187.61	167.1	302.96	283.94	435.1	406.81	746.32	736.53	1079.4

TO1	TO2	TO3	TO4	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5
(msnm)		(msnm)		(msnm)		(msnm)		
186.33	300.16	429.45	1065.9	52.505	169.14	287.04	408.72	738.55

Tabla 2.12

Acueducto Río Colorado - Tijuana
 Línea piezométrica establecida con 3 equipos de bombeo por planta (27/06/97)

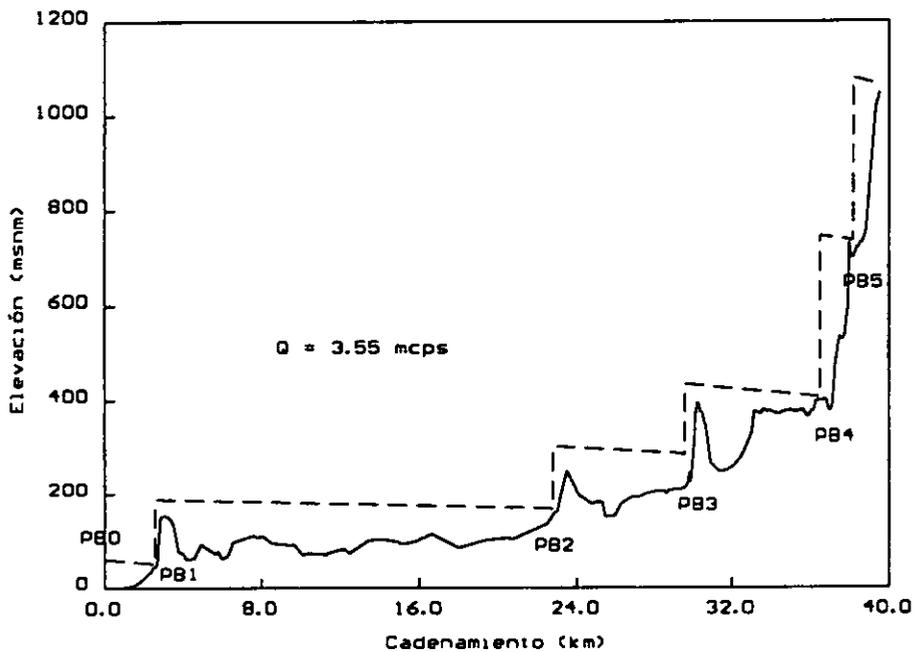


Figura 2.5

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Determinación de coeficientes de fricción antes y después de la limpieza

Este capítulo ha sido dividido en tres partes; en cada una de ellas se detalla cómo se llevó a cabo la determinación de los coeficientes de fricción, para las diferentes campañas de medición descritas en el capítulo anterior.

Según la fórmula de **Darcy - Weisbach**, el factor de fricción de un conducto a presión de sección circular está dado por :

$$f = \frac{g\pi^2 D^5 S_f}{8Q^2} \quad (3.1)$$

donde :

g , aceleración debida a la gravedad (m/s^2).

π , constante geométrica (adimensional).

D , diámetro de la conducción (m).

S_f , gradiente hidráulico (adimensional).

Q , gasto volumétrico (m^3/s).

Por lo tanto, dado el diámetro de la conducción, para determinar f sólo es necesario conocer Q y S_f .

3.1.1 Factores de fricción determinados en octubre de 1996

En el capítulo anterior se presentaron los gastos aforados en las líneas de PB0, PB1 y PB2, así como las cotas de la línea piezométrica en determinados puntos. Con esta información se pudo conocer Q y S_f ; el gradiente S_f se calculó mediante un ajuste lineal, por mínimos cuadrados, a partir de las mediciones de carga piezométrica a lo largo de los tramos PB0-TS1, TO1-TS2 y TO2-TS3. Las Figuras 3.1 a, b y c muestran las cargas medidas y el gradiente hidráulico correspondiente, mientras que en la Tabla 3.1 se presenta el resultado del cálculo de f para las mediciones de cada uno de estos tramos.

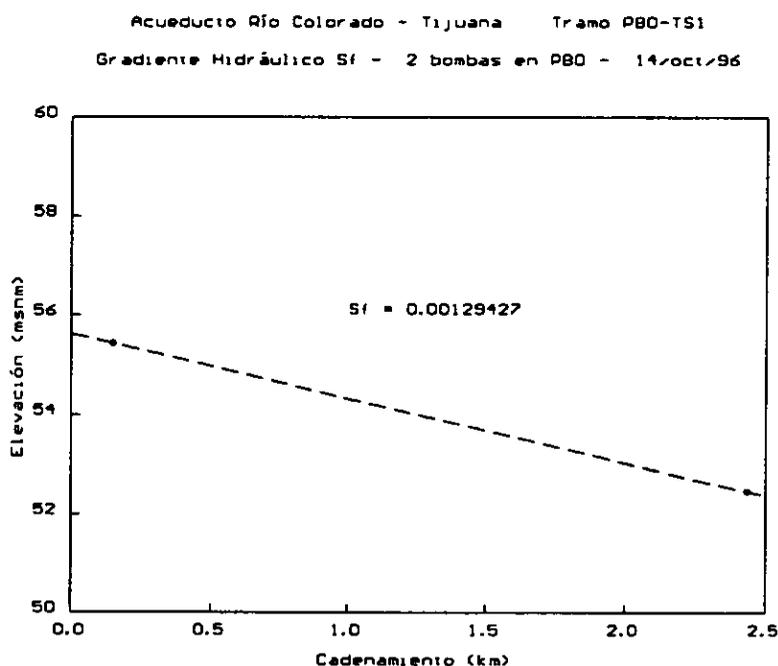


Figura 3.1-a

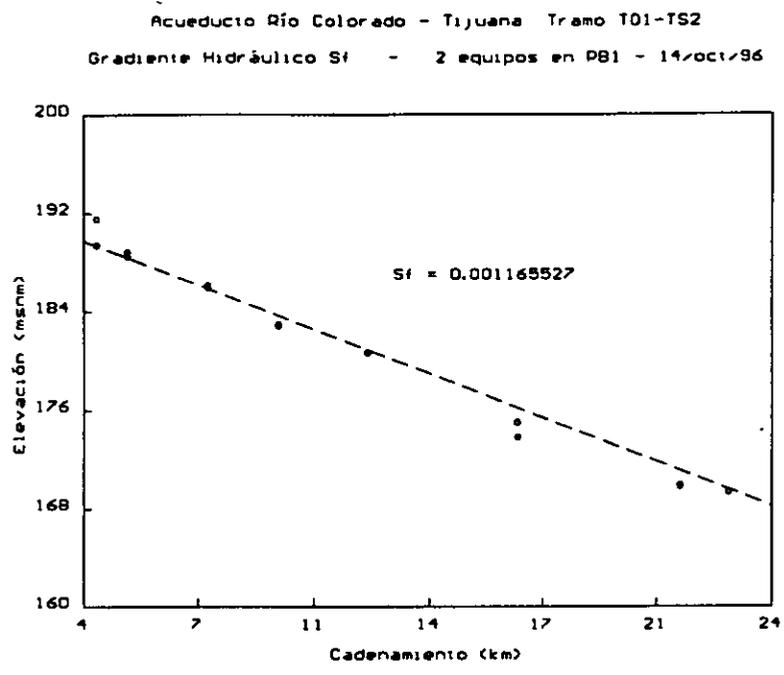


Figura 3.1-b

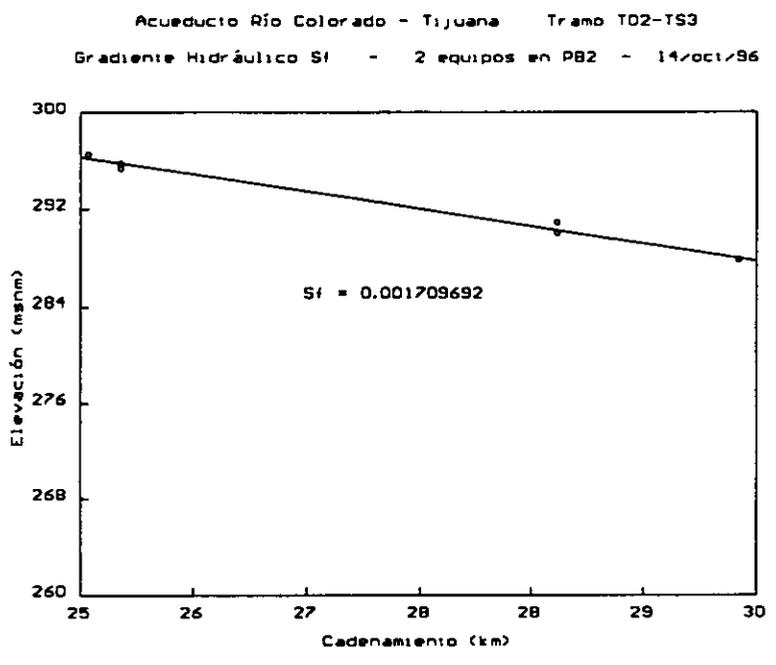


Figura 3.1-c

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Coefficiente de pérdida de carga en PB0, PB1 y PB2 - Bombeo con 2 equipos - 14/oct/96

Planta #	Tramo	Material	Diámetro (in)	Gasto _{PARCIAL} (m ³ /s)	S _f	f
PB0	TU-INT 1	acero	48	1.151	0.00129427	0.0319
	TU-INT 2	acero	48	1.080	0.00129427	0.0362
PB1	INT-INT 2	acero	48	1.003	0.00116553	0.0378
	INT-INT 3	hierro dúctil	48	1.350	0.00116553	0.0209
PB2	INT-INT 1	acero	48	1.272	0.00170969	0.0345
	INT-INT 2	acero	48	1.278	0.00170969	0.0341

Tabla 3.1

Tal como se observa en la Tabla 3.1, el valor del coeficiente de fricción para las tuberías de acero antes de la limpieza es alto; en cambio, la tubería de hierro dúctil, con pocos meses de operación, es mucho menor, presentando un gasto 1.35 m³/s que es significativamente mayor que el de la tubería de acero de ese mismo tramo.

Para el cálculo del coeficiente de fricción en el tramo de la PB3 se utilizó un procedimiento iterativo, debido a que en este tramo se tienen tuberías de dos diferentes diámetros. Debemos recordar que el coeficiente f depende del número de Reynolds (Re) asociado al flujo y de la rugosidad equivalente de los tubos (ϵ). Su valor puede calcularse con las expresiones (3.2) y (3.3) [12], según sea el caso, o puede obtenerse del ábaco de Moody. El valor de Re se determinó considerando una viscosidad cinemática para el agua de 1.0×10^{-6} m/s².

Se debe notar que el cálculo se hace de forma iterativa, ya que se conoce la diferencia de niveles entre torre de oscilación y tanque de sumergencia en dicho tramo, es decir, que la diferencia de niveles indican la pérdida por fricción, las pérdidas locales y la pérdida por salida al tanque (las pérdidas locales y por salida representan un porcentaje pequeño de las pérdidas por fricción, por lo que son incluidas en éstas). Una vez conocida la pérdida por fricción, sólo se varía la

rugosidad equivalente hasta encontrar los valores de f de Darcy que igualen la pérdida ya conocida. En la Tabla 3.2 se observan los resultados de los cálculos del coeficiente de fricción.

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{para } Re < 2000 \quad (3.2)$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{para } Re > 4000 \quad (3.3)$$

D , diámetro de la tubería en (m).

ε , rugosidad relativa en (m).

Re , número de Reynolds (adimensional).

f , coeficiente de pérdida por fricción (adimensional).

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Coefficiente de pérdida de carga en PB3 - Bombeo con 2 equipos - 15/oct/96

Tramo	Tubería	Diámetro (in)	Longitud (m)	Gasto (m ³ /s)	Re	e (mm)	f
TO3-CT*	Acero	54	1951	2.49	2311437	2.279	0.0224
CT-TS4	Concreto	60	4020	2.49	2080293	2.279	0.0219

*Cambio de tubería

Tabla 3.2

3.1.2 Factores de fricción determinados en diciembre de 1996

En esta sección se muestra la determinación de los coeficientes de fricción medidos para las pruebas con 3 equipos por planta en diciembre de 1996.

Para aquellos casos en los cuales el tramo por analizar incluía por lo menos un cambio de diámetro, el factor de fricción se calculó utilizando el mismo

procedimiento iterativo descrito al final del inciso anterior. En el capítulo 2 se hace mención que el gasto utilizado para estos cálculos fue el del ultrasonido, ya que aunque también se aforo con tubo Pitot en cada una de la pruebas, se vio que ambos gastos no difirieron considerablemente. Así, el gasto del ultrasonido, junto con niveles en torres de oscilación y tanques de sumergencia se conoció cada 5 minutos, lo que permitió calcular coeficientes de fricción también cada 5 minutos durante toda la prueba. En la Tabla 3.3 se presenta un resumen de coeficientes de fricción promedio para cada tramo de la prueba.

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Resumen de resultados para la mediciones de "f" de diciembre de 1996

Planta #	Tramo	Diámetro (in)	Longitud (m)	ϵ (mm)	Re	f
PB0	PB0-TU	54	163	10.93	3459729	0.0352
	TU-INT(1y2)	48	2254	10.93	1946097	0.0366
	INT-TS1	54	18	10.93	3459729	0.0352
PB2	TS2-TO2	54	666	-	-	0.0276
	TO2-INT	54	256	5.19	2968847	0.0280
	NT-INT (1y2)	48	6021	5.19	1669977	0.0290
	INT-TS3	54	132	5.19	2968847	0.0280
PB3	TS3-TO3	54	619	-	-	0.0660
	TO3-CT	54	1951	3.16	2979264	0.0244
	CT-TS4	60	4020	3.16	2681338	0.0237
PB4	TS4-TU2	54	1555	5.45	3437759	0.0279
	TU2-TS5	54	150	-	-	0.0286
PB5	TS5-T04	54	1524	6.74	3446600	0.0298

Tabla 3.3.

3.1.3 Factores de fricción determinados en junio de 1997

Esta sección inicia con la determinación del coeficiente de fricción f en el tramo TO1-TS2 el día 25 de junio, para conocer el beneficio que se obtuvo con la limpieza de los dos diablos. Posteriormente, se presenta el cálculo de los coeficientes de fricción hallados el día 27 de junio con la operación de tres

Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías

equipos de bombeo por planta, una vez realizada la limpieza con diferentes dispositivos en sus respectivos tramos.

Cálculo del coeficiente de fricción en el tramo TO1-TS2 (pruebas realizadas el 25 de junio)

Una vez concluidas las maniobras de limpieza se efectuaron mediciones para determinar el coeficiente de fricción en este tramo con la operación simultánea de dos equipos de bombeo, de la misma manera que, para los tramos de la PB0, PB1 y PB2 en octubre de 1996.

En la Figura 3.2 se muestra las cargas piezométricas en el tramo y el gradiente hidráulico estimado, mientras que en la Tabla 3.4 se presenta el resultado del cálculo de f para las mediciones del tramo.

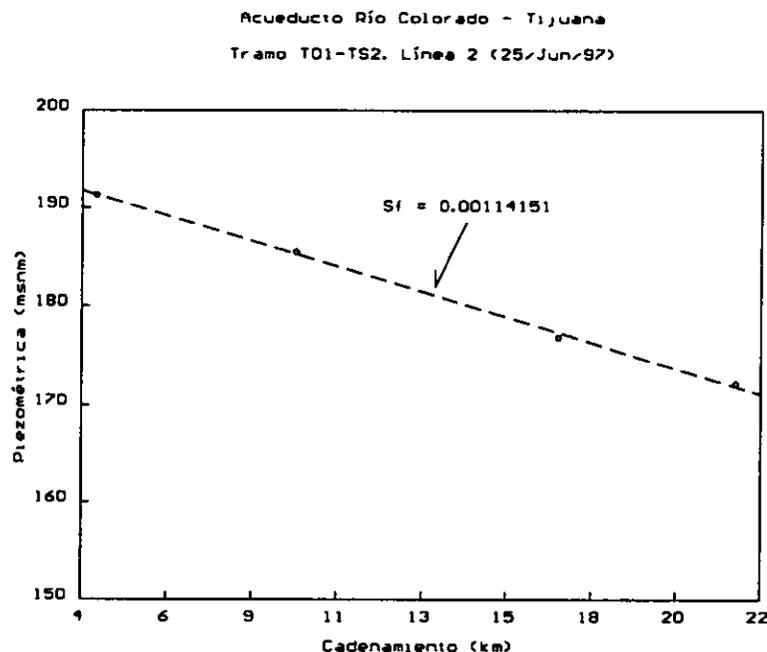


Figura 3.2

**Acueducto Río Colorado - Tijuana
Prueba con 2 equipos de bombeo en PB1. 25/jun/97**

Tramo	Línea	Diámetro	Material	Gasto de la línea	S_r	f
	#	(in)		(m ³ /s)		
TO1-TS2	2	48	Acero	1.36	0.00114151	0.0185

Tabla 3.4.

Como se observa en la Tabla 3.4 el factor de fricción de la línea 2 es de 0.0185. Dicho factor disminuyó en un 50% respecto del medido en octubre de 1996 (0.0378), lo que representa una notable mejora en la capacidad de conducción. Esto representó un incremento en el gasto por la línea 2 de 0.36 m³/s, ya que en octubre de 1996 el gasto era de 1 m³/s.

Conviene recordar que la limpieza en el tramo PB1-TS2 se hizo con la corrida de sólo 2 diablos de baja densidad, ya que existieron problemas para el lanzamiento de más diablos, por lo que aún podría mejorarse la capacidad de conducción efectuando las corridas programadas con diablos de mayor densidad.

Cálculo de coeficientes de fricción en el acueducto (pruebas realizadas el 27 de junio)

Los coeficientes de fricción para esta fecha se calcularon con el procedimiento descrito para análisis de las pruebas de octubre de 1996 en el tramo de la PB3. Los cálculos se hicieron con el gasto promedio de 3.55 m³/s aforado en todo el acueducto (sección 2.4.2). En la Tabla 3.5 se observa el resumen de los coeficientes de fricción obtenidos.

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Resumen de resultados para la mediciones de "f" de junio de 1997

Planta #	Tramo	Diámetro (in)	Longitud (m)	ϵ (mm)	Re	f
PB0	PB0-TU	54	163	8.081	3296211	0.0320
	TU-INT(1y2)	48	2254	8.081	1854118	0.0332
	INT-TS1	54	18	8.081	3296211	0.0320
PB1	TS1-TO1	54	502	-	-	0.0234
	TO1-INT	54	250	1.225	3296211	0.0193
	INT-INT (1)	48	18696	1.225	1236079	0.0200
	INT-INT (2)	48	18696	1.225	1236079	0.0200
	INT-INT (3)	48	18696	1.225	1236079	0.0200
PB2	INT-TS2	54	27	1.225	3296211	0.0193
	TS2-TO2	54	666	-	-	0.0338
	TO2-INT	54	256	1.202	3296211	0.0192
	INT-INT (1y2)	48	6021	1.202	1854118	0.0198
	INT-TS3	54	132	1.202	3296211	0.0192
PB3	TS3-TO3	54	619	-	-	0.0659
	TO3-CT	54	1951	2.376	3296211	0.0226
	CT-TS4	60	4020	2.376	2966590	0.0221
PB4	TS4-TU2	54	1555	-	-	0.0265
	TU2-TS5	54	150	-	-	0.0265

Tabla 3.5.

3.2 Análisis comparativo de factores de fricción en las tres fechas de medición

Con la finalidad de realizar un análisis comparativo se elaboró la Tabla 3.6, donde se han incluido los valores de los factores de fricción obtenidos en una campaña realizada en febrero de 1992 y los valores obtenidos durante las tres campañas de medición descritas previamente.

En las campañas anteriores a las mediciones de junio de 1997, en todos los casos las medidas muestran valores de f mayores que los esperados para tuberías de acero y de concreto (0.012 en acero y 0.015 en concreto, considerando tuberías limpias). En forma consistente se observan valores de f más grandes para los primeros tramos de bombeo, y en los tramos de PB0, PB1 y PB2 se obtiene

prácticamente el mismo valor de f para las tres fechas de medición. Esto indica que el material depositado sobre la pared interior de las tuberías no fue removido durante el proceso de puesta en servicio, efectuado en septiembre de 1996 (el acueducto suspendió su funcionamiento en 1994 porque la presa Abelardo Rodríguez tenía volumen suficiente para satisfacer la demanda de la Ciudad de Tijuana).

Finalmente, en la cuarta campaña de medición se observa reducción importante en los factores de fricción de las líneas de los tramos PB1-PB2 y PB2-PB3, limpiadas con distintos procedimientos, mientras que no se observa cambio en los coeficientes de las líneas de los tramos PB0-PB1, PB3-PB4 y PB4-TS5. La disminución de coeficiente de fricción en el tramo PB1-TS2 fue muy cercano al 50%, mientras que en el tramo TO2-TS2 disminuyó en un 30% respecto a diciembre; esta disminución garantiza, en cualquier caso, un aumento en su capacidad de conducción.

ACUEDUCTO RÍO COLORADO - TIJUANA						
COEFICIENTES DE PÉRDIDA DE CARGA MEDIDOS EN DISTINTAS CAMPAÑAS						
			27y28/FEB/92	14y15/OCT/96	10.11y12/DIC/96	25 y 27/JUN/97
			1 bomba	2 bombas	3 bombas	3 bombas
			en operación	en operación	en operación	en operación
TRAMO	LONGITUD	DIÁMETRO	f	f	f	f
	(m)	(in)				
PB0-TU	163	54			0.0352	0.0320
TU-INT(1y2)	2,254	48	0.036 (1)	0.0339*	0.0366*	0.0332*
INT-TS1	18	54			0.0352	0.0320
TS1-TO1	502	54				0.0234
TO1-INT	250	54				0.0193
INT-INT (1)	18,696	48	0.0367 (1)			0.02*
INT-INT (2)	18,696	48		0.0378		0.02*
INT-INT (3)	18,696	48		0.0209		0.02*
INT-TS2	27	54				0.0193
TS2-TO2	666	54			0.0276	0.0338
TO2-INT	256	54			0.0280	0.0192
INT-INT (1y2)	6,021	48	0.0305	0.0343*	0.029*	0.0198*
INT-TS3	132	54			0.0280	0.0192
TS3-TO3	619	54			0.0660	0.0659
TO3-CT	1,951	54	0.0310	0.0224	0.0244	0.0226
CT-TS4	4,020	60	0.0178	0.0218	0.0237	0.0221
TS4-TU2	1,555	54	0.0361		0.0279	0.0265
TU2-TS5	150	54			0.0286	0.0265
TS5-T04	1,524	54			0.0298	

* Promedio

Tabla 3.6

3.3 Análisis de la recuperación de capacidad de conducción del A.R.C.T

3.3.1 Capacidad de conducción en diciembre de 1996

Esta sección se describe el análisis de la capacidad de conducción del acueducto al mes de diciembre de 1996. Para este efecto se elaboró la Tabla 3.7, donde se muestran los gastos máximos medidos en esta campaña de mediciones, al

operar tres bombas por planta. En la misma tabla se muestra el gasto de operación calculado para cada tramo, suponiendo tirantes de 5 m en cada tanque de sumergencia. Las diferencias entre gastos medidos y gastos de operación calculados se debe a que las mediciones fueron realizadas bajo condiciones de flujo no establecido, correspondientes al arranque del tercer equipo en el tramo en observación, mientras que en los otros se mantenía la operación con 2 bombas, además de permitir cierta estrangulación en las válvulas de descarga de algunos equipos de bombeo, necesaria para reducir el derrame por la corona de torres de oscilación.

En la tabla puede verse que el gasto bombeado por las plantas 4 y 5 alcanza los 4 m³/s y el de PB0 está próximo a ese valor, pero el gasto de operación de las plantas 1, 2 y 3, es significativamente menor que el de diseño. Aún más, en PB2 y PB3, el gasto en los tramos entre tanque de sumergencia y torre de oscilación supera al gasto por gravedad de la torre de oscilación al tanque de sumergencia siguiente, imponiendo el derrame de agua, como se observó en TO3 durante las mediciones.

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Gastos máximos calculados con condiciones actuales en la tubería. Diciembre 1996.

	GASTO	GASTO	GASTO A	NIVEL	OBSERVACIONES
	MÁXIMO	BOMBEADO	GRAVEDAD	TO	
	MEDIDO		TO - TS		
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(msnm)	
PB0	3.85	3.957		-	
PB1		3.586	3.586	186.58	calculado con l línea limpia
PB2	3.50	3.509	3.454	304.80	alcanza la corona de TO2
PB3	3.59	3.890	3.361	427.55	alcanza la corona de TO3
PB4	3.85	4.048	4.048	739.12	
PB5	3.86	4.109		1067.10	calculado al nivel de la corona de TO4

Tabla 3.7.

Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías

En la tabla además se muestra el gasto máximo de operación del acueducto que está limitado por el tramo a gravedad entre la torre de oscilación de la planta 3 (TO3) y el tanque de sumergencia de la planta 4 (TS4), con capacidad máxima de $3.36 \text{ m}^3/\text{s}$ calculados del nivel de la corona de TO3 a la mitad del tirante de TS4. En los cálculos se supuso que una de las tres líneas de conducción del tramo TO1-TS2 trabajaría como tubería nueva.

Para evitar los derrames de agua en torres de oscilación, en las condiciones de la tubería prevalecientes en diciembre de 1996, hubiera sido necesario realizar la sobreelevación en las torres TO1, TO2 y TO3 en 1.80 m, 5.40 m y 8.90 m, respectivamente. Aún así, el gasto máximo de operación del acueducto sería de $3.49 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al tramo de PB2. Los cálculos se realizaron suponiendo que una de las tres líneas de conducción del tramo TO1 - TS2 trabaja como tubería nueva y considerando el tirante máximo en los tanques de sumergencia. En la Tabla 3.8 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Sobreelevaciones en torres de oscilación para evitar derrames en condiciones actuales. Diciembre de 1996.

	Q _B	TORRE DE OSCILACIÓN			OBSERVACIONES
		NIVEL	CORONA	BORDO	
Planta de bombeo	(m^3/s)	(msnm)	(msnm)	LIBRE (m)	
PB0	3.957	-			
PB1	3.586	190.58	189.80	-0.78	
PB2	3.489	309.17	304.80	-4.37	
PB3	3.676	435.47	427.55	-7.92	
PB4	4.048	743.12	744.91	1.79	TU2
PB5	4.109	1067.10	1067.10		gasto calculado contra la corona de TO4

Tabla 3.8.

En resumen, según las mediciones realizadas en diciembre de 1996, la capacidad de conducción máxima del acueducto estaba limitada en el tramo a

gravidad de la TO3 con un gasto de 3.36 m³/s. Si sólo se elevaran las torres sin realizar labores de limpieza (estructuralmente no es posible sobreelevar algunas torres por problemas en la cimentación), el gasto estaría limitado por la PB2 a 3.49 m³/s. Por lo tanto, para acercarse más al gasto de diseño de 4 m³/s la solución no era sobreelevar torres de oscilación, sino proceder a realizar labores de limpieza en las tuberías, además de proponer medidas para tratamiento del agua en el cárcamo de succión de la PB0.

Adicionalmente a este análisis, se realizó otro que permitiera estimar la capacidad de conducción si se llegaran a limpiar todas las tuberías del acueducto, hasta reducir el coeficiente de pérdida de carga a valores del orden de $f = 0.015$. El cálculo del gasto se realizó considerando tirantes máximos en tanques de sumergencia, determinándose además el nivel del agua en la torre de oscilación. El gasto máximo estaría limitado por las plantas PB1 y PB2 a caudales del orden de 3.9 m³/s y el agua no alcanzaría la corona de las torres de oscilación, excepto en la TO3 cuando el tanque de sumergencia siguiente (TS4) trabajara lleno. En la Tabla 3.9 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Acueducto Río Colorado - Tijuana
Gastos máximos estimados para tuberías limpias ($f = 0.015$)

	GASTO		TORRE DE OSCILACIÓN			OBSERVACIONES
	BOMBEADO	GRAVEDAD	NIVEL	CORONA	BORDO	
	(m ³ /s)	TO - TS	(msnm)	(msnm)	LIBRE	
		(m ³ /s)			(m)	
PB0	4.362		-			
PB1	3.917	3.917	185.97	190.3	4.33	
PB2	3.897	3.897	302.64	304.37	1.73	
PB3	4.079	4.079	429.94	427.55	-2.39	
PB4	4.265	4.265	742.64	744.91	2.27	TU2
PB5	4.331		1067.10	1067.10		gasto calculado contra la corona de TO4

Tabla 3.9.

Con base en los resultados anteriores, en enero de 1996 se recomendó llevar a cabo la sobreelevación de la TO3 en una altura de 3.5 m. Sin embargo, debe

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de resultados de las campañas de medición realizadas en forma previa a la limpieza del acueducto Río Colorado - Tijuana permite establecer las siguientes conclusiones:

- a) Los valores del coeficiente de pérdida de carga por fricción (f) medidos en campo son mayores que los valores esperados para tuberías de acero y de concreto (0.012 en acero y 0.015 en concreto, considerando tuberías limpias).
- b) En forma consistente se observan valores de f más grandes para los primeros tramos de bombeo, mientras que en los tramos de PB0, PB1 y PB2 se obtiene prácticamente el mismo valor de f para las mediciones realizadas antes de la limpieza de la tubería. Esto indica que el material depositado sobre la pared interior de las tuberías no fue removido durante el proceso de puesta en servicio, efectuado en septiembre de 1996.
- c) Según las mediciones realizadas en diciembre de 1996, el gasto máximo calculado del acueducto era de $3.36 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual se determinó en el tramo a gravedad entre la TO3 y el TS4.
- d) Las sobreelevaciones de las torres TO1, TO2 y TO3, según el análisis de diciembre, deberían ser de 1.80, 5.40 y 8.90 m, respectivamente, a fin de evitar derrames en estas estructuras. Sin embargo, esto sólo permitiría alcanzar un gasto máximo de $3.49 \text{ m}^3/\text{s}$, limitado ahora por la PB2, y que podría reducirse si se incrementa aún más el coeficiente de pérdida de carga.

- e) Adicionalmente, con los resultados de diciembre se determinó que, de llevarse a cabo la limpieza en las tuberías del acueducto y de llegar a obtenerse valores en el coeficiente de fricción muy cercanos a 0.015, se entregaría un gasto estimado de $3.90 \text{ m}^3/\text{s}$, que es muy próximo al de diseño ($4.0 \text{ m}^3/\text{s}$). Con base en estas consideraciones, sólo sería necesario sobreelevar la TO3 en 3.50 m para evitar derrames cuando TS4 trabaje lleno.
- f) Finalmente, se estableció que es necesario realizar labores de limpieza que permitan reducir la pérdida de carga en las tuberías del acueducto. Los trabajos de limpieza deberían enfocarse primero a los tramos de bombeo correspondientes a PB1, PB2 y PB3.

El análisis de las mediciones realizadas en junio de 1997, luego de realizarse la limpieza de las tuberías, permite establecer las siguientes conclusiones:

- a) En junio de 1997 se observó una reducción importante en los coeficientes de pérdida de carga en los tramos TO1-TS2 y TO2-TS3, limpiados con distintos procedimientos, mientras que no se observa cambio en los coeficientes de las líneas de los tramos PB0-PB1, PB3-PB4 y PB4-TS5. La disminución del coeficiente de fricción en el tramo TO1-TS2 fue muy cercana al 50 %, mientras que en el tramo TO2-TS2, disminuyó en un 30 % respecto a diciembre; esta disminución permitió un aumento de su capacidad de conducción.
- b) Esta limpieza permitió establecer un gasto en todo el acueducto de $3.55 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que, en términos de la capacidad de conducción, las medidas realizadas en diciembre de 1996 indicaron que el gasto bombeado por PB2 estaría limitado a $3.45 \text{ m}^3/\text{s}$ al alcanzar la corona de TO2, por lo que la limpieza de las tuberías permitió incrementar el gasto en $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$ y mantener un bordo libre de 4.2 m. en TO2.

c) En el tramo TO3-TS4 se consiguió un aumento en la capacidad de conducción, pero éste corresponde a la sobreelevación de 3.50 m en la corona de TO3; esto se realizó con base en el estudio de capacidad de conducción de diciembre de 1996. Durante la operación con 3 bombas se mantuvo un bordo libre de 1.6 m, lo que indica que el nivel de operación ocupó 1.9 m de la sobreelevación de dicha torre. Así, el límite de 3.36 m³/s determinado con las pruebas de diciembre de 1996 ha sido superado por 0.19 m³/s, gracias a la limpieza de los dos tramos y a la sobreelevación de la TO3.

Con base en estos resultados se establecen las siguientes recomendaciones:

- a) Realizar la limpieza de la tubería del tramo PB3-PB4 para mejorar la capacidad de conducción y para atender la recomendación de reducir el nivel de operación en TO3 por razones estructurales de comportamiento ante sismo.
- b) Además, deberá programarse la instalación de estructuras que permitan introducir los diablos en los otros tramos de bombeo para realizar limpieza de las tuberías y establecer frecuencia de corrida de diablos para conservación de la capacidad de conducción.
- c) Los resultados anteriores muestran que es posible mejorar considerablemente la capacidad de conducción del acueducto mediante la limpieza de sus tuberías.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

[1] R. Carmona P., Y. Guevara G. y L. Sánchez B.
Funcionamiento Hidráulico del Acueducto Río Colorado - Tijuana,
elaborado para la SARH en noviembre de 1987, Instituto de Ingeniería
UNAM.

[2] R. Carmona P., A. Sánchez H., Y. Guevara G., G. Castillo H., E.
Rodal C. y A. Sámano G.
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,
elaborado para la SARH en octubre de 1988, Instituto de Ingeniería de la
UNAM.

[3] R. Carmona P., A. Sánchez H. y A. Sámano G.
Estudio del problema de alta resistencia al flujo en las tuberías de acero
del Acueducto Río Colorado - Tijuana , elaborado para la CNA en abril de
1992, Instituto de Ingeniería de la UNAM.

[4] COSAE, CNA, CESPT y CESPM.
Efectos corrosivos en las tuberías de acero en el Acueducto Río Colorado
- Tijuana , julio de 1995.

[5] Tebbutt
Fundamentos de control de la calidad del agua, Limusa 1990.

[6] Custodio E. y M. R. Llamas
Hidrología Subterránea, 2^{da} Edición, Editorial Omega, vol. 1 1976 - vol. 2
1983.

[7] Harper, Charles A. (Editor)
Handbook of plastics and elastomers, Primera edición, Nueva York,
McGraw - Hill, 1975.

[8] French, Jonathan A.
"Pigging submarine outfalls", en

Journal of Environmental Engineering, ASCE, Mayo 1995, vol. 121, N°5,
pp. 396-401

[9] Catálogo de Aqua-Pigs, T.M., Houston, 1995, Girard Industries, Inc.

[10] Holman J.P

Métodos Experimentales para Ingenieros, Agosto 1979, McGraw - Hill
pp. 192-193

[11] Catálogo Dieterich Standard - Sensores de Caudal Annubar -
Diamond II, Productos Industriales.

[12] Mott, Robert L.

Applied Fluid Mechanics, 1994, Prentice Hall Career & Technology
Englenwood Cliffs, New Jersey 07632, pp 248.

ANEXOS

OTM

GERENCIA DE INGENIERIA EXPERIMENTAL Y CONTROL
 SUBGERENCIA DE GEOTECHIA Y MATERIALES
 DEPARTAMENTO DE MATERIALES
 LABORATORIO QUIMICO

IFORME No: --- ANEXO No. 1
 OBRA: ACUEDUCTO RIO COLORADO - TIJUANA
 FECHA: 23-11-96

PRUEBAS QUIMICAS A MUESTRAS DE SUELO

CONCEPTOS		RESULTADOS			
IDENTIFICACION	Muestra No.	96-007			
	Procedencia	ACUEDUCTO RIO COLORADO			
	Fecha de muestreo	14-11-96			
	Sillo de obtención	ACUEDUCTO TIJUANA			
	Profundidad	MUESTRA OBTENIDA DE LAS PAREDES DEL ACUEDUCTO			
ANALISIS DE SALES SOLUBLES EN AGUA. %	CATIONES EN FORMA DE:	CaO (Oxido de calcio)	0.02		D 511
		MgO (Oxido de magnesio)	0.01		D 511
		Na ₂ O (Oxido de sodio)	0.01		D 428
		K ₂ O (Oxido de potasio)	0.01		D 428
	ANIONES EN FORMA DE:	HCO ₃ ⁻ (Bicarbonatos) + CO ₃ ⁻	0.07		D 513
		CO ₃ ⁻ (Carbonatos)	0		D 513
		OH ⁻ (Hidroxidos)			D 513
		SO ₄ ⁻ (Sulfatos)	0		D 515
		Cl ⁻ (Cloruros)	0.02		D 512
		NO ₃ ⁻ (Nitratos)			D 992
	Sólidos disueltos (a través de la medida de conductividad)	---			
	Materia Orgánica en la muestra Integral (Pérdida a 600 °C), %	---			
	pH	7.45			D 1293
Humedad (En el momento de la prueba), %	---				

Observaciones: La muestra presenta bajo contenido en sales

Revisado: 11/11/96

