

01162



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

1
29.

MODULO EXPERIMENTAL "CANAL DE PENDIENTE VARIABLE"
INFRAESTRUCTURA PARA INVESTIGACION HIDRAULICA

TESIS

PRESENTADA POR

RICARDO ANDRES ALVAREZ BRETON

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERIA
DE APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS**

265687

CIUDAD UNIVERSITARIA

MEXICO
1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi esposa Julieta

A mis hijos

Adriana Julieta

y

Ricardo Adrian

*Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Un reconocimiento especial a la Directiva
por el apoyo a la consecución
de éste Proyecto.*

INDICE

INTRODUCCION

ANTECEDENTES

OBJETIVO

1. CONCEPTUALIZACION	1
<i>1.1 Usos de la instalación experimental</i>	1
<i>1.2 Requerimientos para la instalación experimental</i>	2
<i>1.3 Características de otras instalaciones similares en operación</i>	5
<i>1.3.1. Canal de pendiente variable de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M.</i>	5
<i>1.3.2. Canal de pendiente variable de la División de Estudios de Posgrado F.I. U.N.A.M.</i>	7
<i>1.3.3. Canal de pendiente variable del Instituto de Ingeniería U.N.A.M.</i>	9
<i>1.3.4. Canal de pendiente variable del Instituto de Ingeniería U.N.A.M.</i>	11
<i>1.3.5. Canal de pendiente variable del Centro Interamericano de Recursos del Agua C.I.R.A. F.I.</i>	12
<i>1.3.6. Canal de pendiente variable de la DEPMI Campus Morelos U.N.A.M.</i>	15
<i>1.3.7. Canal de pendiente variable del National Water Research Institute Hydraulics Laboratory</i>	17
<i>1.3.8. Canal de pendiente variable del National Water Research Institute, Hydraulics Laboratory</i>	19
<i>1.4 Aspectos operativos</i>	21
<i>1.5 Especificaciones para diseño y operación</i>	22
2. DESARROLLO DEL PROYECTO	26
<i>2.1 Cálculo de la altura de la sección de trabajo del canal y velocidad máxima.</i>	31
<i>2.1.1 Cálculo de perfiles de flujo.</i>	34
<i>2.2. Cálculo del canal Rehbock (Tanque de salida).</i>	40
<i>2.3. Diseño estructural.</i>	44
<i>2.3.1. Análisis de cargas de diseño.</i>	44
<i>2.3.2. Cálculo estructural del bastidor que soportará la sección de trabajo.</i>	45
<i>2.3.3. Cálculo estructural de arriostramientos del bastidor.</i>	48
<i>2.3.4. Cálculo de los elementos de los módulos de la sección de trabajo.</i>	51
<i>2.4. Cálculo del tanque de llamada.</i>	55
<i>2.5. Integración del proyecto ejecutivo.</i>	58
3. INSTALACION Y PRUEBAS DEL MODULO EXPERIMENTAL	85
<i>3.1. Modificaciones.</i>	87
<i>3.1.1. Modificaciones al tanque de llamada.</i>	87
<i>3.1.2. Modificaciones a la ubicación de los cilindros o pistones elevadores</i>	89
<i>3.1.3. Modificaciones de los soportes guía.</i>	90
<i>3.1.4. Modificaciones al apoyo articulado y al marco soporte al extremo de la viga.</i>	91

<i>3.1.5. Adaptación del tanque canal Rehbock como cárcamo de bombeo.</i>	92
3.2. Características de operación.	93
<i>3.2.1. Medida de la pendiente del fondo del canal en sus condiciones extremas.</i>	93
<i>3.2.2. Aforo en la estación pitométrica para el canal de pendiente variable.</i>	96
<i>3.2.3. Levantamiento longitudinal del perfil de fondo.</i>	100
<i>3.2.4. Medición de la flecha de la viga.</i>	102
<i>3.2.5. Planos complementarios.</i>	103
4. INSTRUMENTACION BASICA.	120
4.1. Medición de tirantes o niveles.	120
4.2. Medición de presiones.	122
<i>4.2.1. Piezómetro.</i>	123
<i>4.2.2. Manómetro de Bourdon.</i>	124
<i>4.2.3. Celdas de presión.</i>	125
4.3. Medición de velocidad.	126
4.4. Medición del gasto.	129
5. APLICACIONES.	131
5.1. Salto hidráulico.	131
<i>5.1.1. Objetivo de la práctica</i>	132
<i>5.1.2. Metodología</i>	132
<i>5.1.3. Instalación.</i>	133
<i>5.1.4. Desarrollo.</i>	134
5.2. Caracterización de micromolinetes mecánicos.	137
6. RECOMENDACIONES.	145
7. CONCLUSIONES.	147
BIBLIOGRAFIA.	

INTRODUCCION

Los canales de pendiente variable son un elemento básico para la investigación experimental en hidráulica. Por esta razón, continuamente se elaboran mejores y nuevos diseños que faciliten su operación, permitiendo ampliar la gama de experimentos, así como el control adecuado de las variables en estudio y su medición.

En éste trabajo se presentan varios canales de pendiente variable ya en operación y considerando los requerimientos específicos de la investigación moderna, se proponen ciertos cambios estructurales para innovar tanto el diseño como la operación en su conjunto. La evidencia obtenida al aplicar estas propuestas en un módulo experimental han dando como resultado una instalación versátil y de fácil construcción.

Este módulo experimental se desarrolló en el laboratorio de hidráulica "Enzo Levi" del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, donde desde sus inicios, se tenía instalado un canal de pendiente nula de cuarenta metros de longitud, en el que se realizan diversas pruebas y experimentos de flujo a superficie libre. Sin embargo, siempre estuvo presente la necesidad y la inquietud de ampliar el intervalo de condiciones de flujo para dichas pruebas y experimentos, considerando la variación de la pendiente del fondo del canal.

En el primer capítulo se presenta una recopilación de material fotográfico para comparar diversas estructuras ya en operación, observando sus ventajas y desventajas, los usos y requerimientos de esta instalación experimental así como las limitaciones encontradas.

En el segundo capítulo se exponen los detalles innovativos introducidos, así como el procedimiento de cálculo; planos generales y de detalle del proyecto ejecutivo donde se observan los componentes principales del sistema, que son: tanque de llamada, sección de pruebas con su sistema de elevación y el tanque de salida; las especificaciones para construcción y el catálogo de conceptos.

Una vez construido el módulo experimental, se procedió a realizar pruebas para definir sus intervalos reales de operación. Estos resultados son expuestos en el capítulo tres.

En el capítulo siguiente, se hace una breve exposición de los instrumentos básicos de medición que se emplean normalmente en este módulo experimental para medir tirantes, gastos, velocidades y presión.

Con el fin de ilustrar algunas aplicaciones prácticas del canal de pendiente variable, en el capítulo cinco se presenta una práctica de laboratorio enfocada al salto hidráulico y también el procedimiento y los resultados de la caracterización de molinetes mecánicos.

Por último se dan las conclusiones y las recomendaciones que se estimaron pertinentes.

Es importante hacer notar que este desarrollo será de utilidad tanto a instituciones docentes, como de investigación en nuestro país, que se enfrentan al problema de contar con instalaciones de laboratorio para apoyar el desarrollo académico y de investigación en hidráulica, en temas por demás importantes, como la hidráulica de canales; ya que llevando el desarrollo de éste proyecto a la escala requerida, de acuerdo a la disponibilidad de espacio y de financiamiento, podrán contar en poco tiempo con una estructura similar a bajo costo, pues el empleo de materiales, equipos y mano de obra que se encuentra en el mercado nacional reduce la inversión, si fuera el caso de compararlo contra el costo inicial y de mantenimiento que representa adquirirlo en el extranjero, que sería la alternativa comparable.

ANTECEDENTES

Desde siempre, el manejo y el aprovechamiento del agua ha sido una tarea común para el hombre; sin embargo, captar el agua, conducirla y emplearla eficientemente, requiere de la formación de profesionales que dedicados al estudio, la investigación y el desarrollo de la tecnología del agua puedan hacer frente a los problemas que en su conjunto representa el uso del vital líquido.

En México, se destina más del 60% del total de los aprovechamientos de agua para uso agrícola y normalmente estos grandes volúmenes son manejados desde la obra de captación hasta las zonas de distribución a través de canales, por lo tanto el estudio de la conducción del agua a superficie libre es uno de los temas sobresalientes en el área de hidráulica.

La hidráulica como área de estudio de la mecánica de fluidos, a pesar de siglos de estudios y avances no es aún una disciplina exacta ya que hay una infinidad de variables que no se pueden controlar y es preciso recurrir a hipótesis simplificadoras al hacer un diseño o al estudiar una estructura en particular. Y la hidráulica de canales no es la excepción de la regla, por ello desde sus inicios y hasta la actualidad el estudio de los flujos a superficie libre o sea la hidráulica de canales se ha efectuado con el apoyo de instalaciones experimentales que permitan validar los modelos físico-matemáticos propuestos, que pretenden explicar el comportamiento del agua dentro de sus fronteras, dadas por las estructuras que le dan cauce.

En la mayor parte de las instituciones de educación superior que cuentan con laboratorio de hidráulica, las instalaciones que más se requieren, son las empleadas para fines demostrativos o de experimentación del flujo en canales, donde se tienen las facilidades para reproducir ciertos fenómenos en particular. Pero no es sencillo adquirir una instalación de este tipo aún y cuando en el mercado internacional existen varios proveedores, y es por el costo de inversión que esto implica.

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, se tiene instalado desde los inicios de operación del laboratorio de hidráulica, un canal de pendiente nula de cuarenta metros de longitud, y sección rectangular de noventa por sesenta centímetros.(fig.A.1) En él se han realizado diversas pruebas y

experimentos de flujo a superficie libre, sin embargo, como ya se comentaba anteriormente, siempre estuvo presente la necesidad de ampliar el intervalo de condiciones para dichas pruebas y experimentos, considerando la variación de la pendiente del fondo del canal, de aquí la necesidad de contar con un módulo experimental más versátil.

Por estas razones se llevó a cabo el diseño del canal de pendiente variable; los criterios de diseño adoptados involucran el proceso de medición de los parámetros de interés y las facilidades que se requieran de la infraestructura así como aspectos económicos que permitan que la instalación en su conjunto resulte con una aceptable relación de beneficio-costos.



Fig. A.1. Instalación experimental Canal de usos múltiples de pendiente nula en el laboratorio de hidráulica "Enzo Levi" IMTA.

OBJETIVO

Con base en lo anterior, se estableció el siguiente objetivo como parte fundamental de éste trabajo.

Elaborar un proyecto integral para un canal de pendiente variable con características muy versátiles, que permita hacer de esta instalación no sólo un módulo experimental como infraestructura de investigación y desarrollo de alto nivel, sino también una instalación que a escala, sea aplicable a la formación de estudiantes en la hidráulica de canales.

1. CONCEPTUALIZACION

Una instalación experimental que permita múltiples usos y sea fácilmente adaptable a las diversas condiciones que impone la investigación, resultará más económica que aquella que solo se diseña para un solo propósito.

Por esto, antes de llegar al diseño definitivo del canal de pendiente variable, se analizaron tanto los usos y requerimientos básicos así como las ventajas y desventajas de diversas instalaciones similares ya en operación, para que de acuerdo con los resultados de ese análisis, se estuviera en posibilidad de introducir detalles innovativos que permitan la conceptualización de una instalación económica, versátil y funcional.

1.1 Usos de la instalación experimental.

El canal de pendiente variable como instalación experimental se ha empleado para facilitar tanto las labores docentes como en las actividades de investigación y desarrollo de tecnología en la hidráulica. Su uso no se limita únicamente al estudio de canales prismáticos sino también ha sido empleado para el estudio de la hidráulica fluvial en temas como el arrastre de sedimentos y análisis de formaciones de fondo, se estudian también efectos de oleaje e interacción de fronteras sólidas-líquidas y líquidas-gaseosas, tal es el caso de los efectos por viento sobre la superficie libre del agua en conducciones abiertas o cuerpos de agua.

Hay diversos experimentos que pueden implementarse en el canal de pendiente variable, por ejemplo:

- Determinación de coeficientes de rugosidad.
- Determinación de la celeridad de una onda.
- Efectos en el flujo por cambios de forma.
- Salto hidráulico como dissipador de energía.

-Aforo en canales empleando diversos métodos:

- Molinetes.
- Vertedores de pared gruesa.
- Vertedores de pared delgada.
- Dispositivos tipo Parshall.
- Reducciones de sección.

- Estudio de efectos por pilas de puente.
- Descarga de compuertas y control de gastos.
- Estudio de cimacios y otras estructuras hidráulicas.
- Ensaye de perfiles de flujo tipo A. Pendiente adversa.
- Ensaye de perfiles de flujo tipo H. Pendiente nula.
- Ensaye de perfiles de flujo tipo M. Pendiente suave.
- Ensaye de perfiles de flujo tipo C. Pendiente crítica.
- Ensaye de perfiles de flujo tipo S. Pendiente pronunciada.
- Flujos transitorios en canales.
- Oleaje y sus efectos sobre estructuras.

1.2 Requerimientos para la instalación experimental.

Para estudiar el comportamiento del flujo a superficie libre, la instalación del canal de pendiente variable debe contar con la posibilidad de efectuar cambios en la profundidad o tirante del flujo (y) y en la velocidad (V), ya que la propagación de un disturbio o perturbación en el flujo a lo largo de un canal, depende del valor del número de Froude (F_r) ya que:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad \dots\dots (1.1)$$

donde

- | | |
|-----|----------------------------------|
| V | velocidad [L, T ⁻¹] |
| g | gravedad [L, T ⁻²] |
| y | tirante hidráulico [L] |

Además, en contraste con el flujo a través de un conducto cerrado, donde el movimiento es ocasionado básicamente por una diferencia de presión, la fuerza principal que actúa en un flujo a través de un canal es la de gravedad. De esta forma si se cambia la altura en uno de los extremos del canal, el efecto de la gravedad se hace presente, al cambiar la posición relativa de la superficie del flujo entre dos puntos. La pendiente del canal está dada por:

$$S = \frac{\Delta H}{L} \dots\dots (1.2)$$

donde

- | | |
|------------|--|
| S | pendiente [adimensional] |
| ΔH | $H_2 - H_1$ diferencias de alturas entre dos puntos a lo largo del canal [L] |
| L | Longitud entre los puntos 1 y 2 [L] |

La fuerza de gravedad tiene como oponente a la fuerza de fricción que se presenta en las fronteras sólidas del canal. Cabe mencionar que los valores de los coeficientes de rugosidad empleados en las ecuaciones de resistencia que permiten definir el comportamiento del flujo dentro de sus fronteras cuando una de ellas está en contacto con la atmósfera y el resto es sólido, se han determinado experimentalmente.

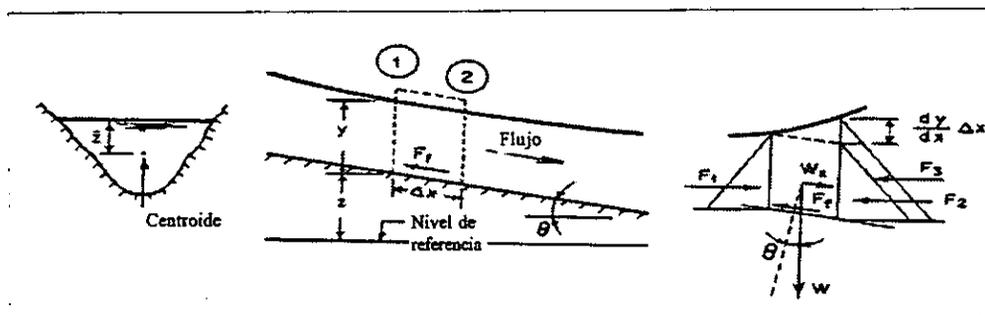


Fig 1.1 Esquema empleado para definir la ecuación de fricción: $V = C \sqrt{RS_f}$

Por lo anterior, en un el canal de pendiente variable se debe considerar la posibilidad de cambiar la rugosidad de las paredes y el fondo, adicionando material granular empleando diferentes métodos, desde pegar el material granular directamente sobre la superficie del cuerpo del canal por donde

circulará el agua, o bien, pegando el material sobre placas metálicas o de madera terciada (triplay) que posteriormente se coloquen dentro del canal, ya sea conservando la misma geometría o modificándola según se requiera.

Normalmente, en los canales se manejan grandes volúmenes de agua, de tal manera que al calcular el número de Reynolds, su valor corresponde a un flujo turbulento bien desarrollado.

La excepción es el caso en que se quieren hacer estudios de capa límite laminar o en la zona de transición.

$$R_e = \frac{V R_h}{\nu} \quad \dots\dots (1.3)$$

donde

R_e	No. de Reynolds [adimensional]
R_h	radio hidráulico [L]
V	velocidad del flujo [LT^{-1}]
ν	viscosidad cinemática [TL^{-2}]

El flujo en canales naturales raramente es laminar, sin embargo debe considerarse la posibilidad de generarlo en el canal de pendiente variable.

1.3 Características de otras instalaciones similares en operación

1.3.1. Canal de pendiente variable de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M.

Marca: Plint and Partners U.K.

Longitud de la sección de trabajo: 12 m

Ancho de plantilla: 0.20 m

Altura útil del canal: 0.50 m

Máxima pendiente negativa: - 0.00420

Máxima pendiente positiva: 0.02083

Gasto máximo: 75 lt/s

Suministro de agua: recirculación
con dos bombas de 7.5 HP c/u

Almacenamiento: 9.6 m³

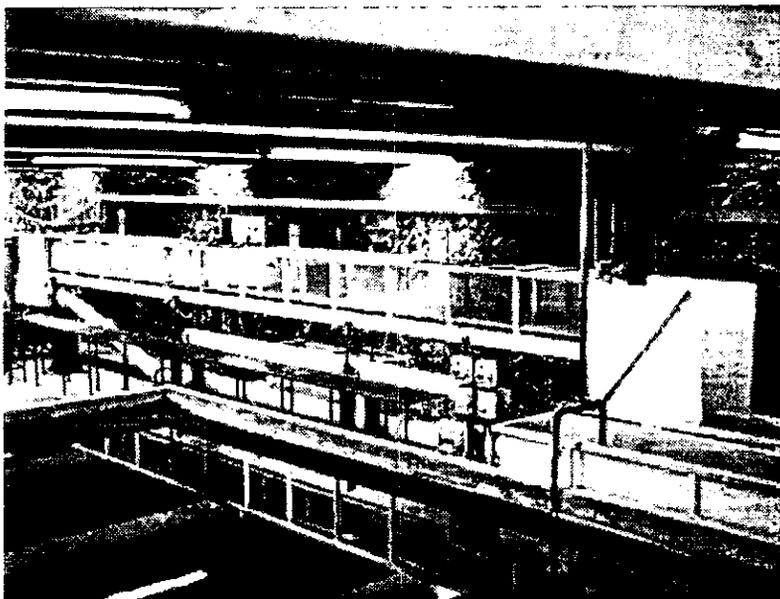


Foto 1.1 Canal de pendiente variable adquirido por la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. para el laboratorio de hidráulica.

El sistema se compone de las siguientes partes:

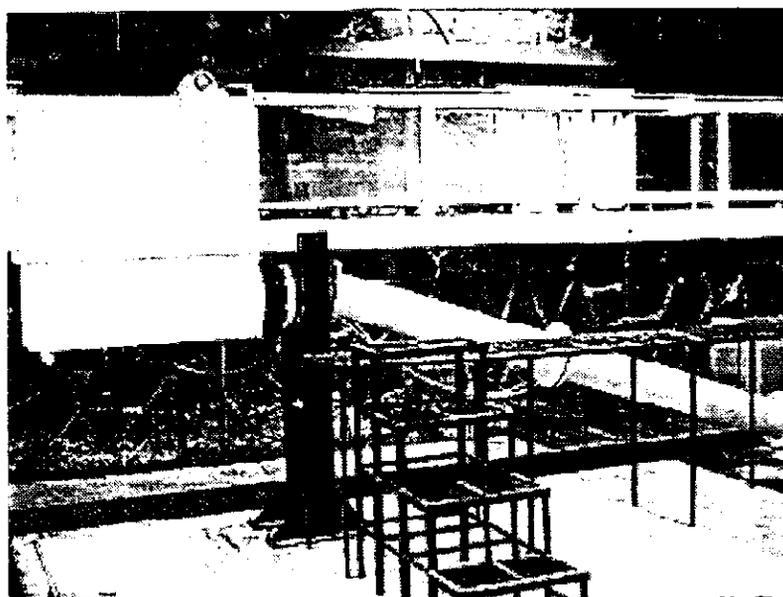


Foto 1.2 Se observa la junta flexible entre la brida del tubo y el fondo del tanque.

Tanque de llamada.

El tanque de llamada es basculante, con tranquilizadores en su interior; la tubería de suministro se une al tanque por medio de una junta flexible bridada. Sobre el tanque hay un par de chumaceras de una compuerta oscilante o batidor que permite emplear la instalación como canal de olas.

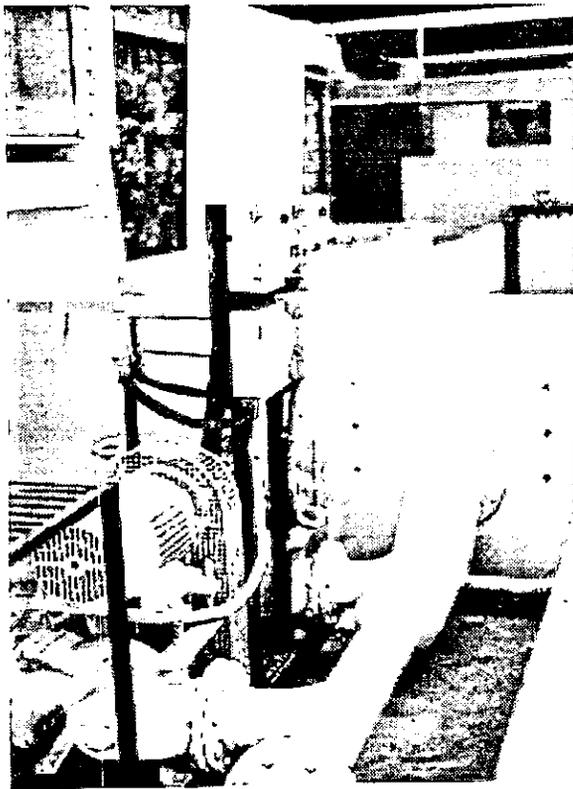


Foto 1.3 Los tanques se encuentran interconectados. Las bombas están dispuestas en paralelo.

Tanques de salida y recirculación

Estos tanques permiten el almacenamiento de agua, lo que hace que el módulo no dependa de un tanque de carga constante. La recirculación se lleva a cabo con tubería de 8" \varnothing , dos bombas de 7.5 HP c/u, válvula de compuerta para controlar el gasto y una tobera para aforar el gasto.

Cuerpo del canal

La sección rectangular es de paredes de vidrio y fondo de acero inoxidable, la estructura del canal rectangular forma una sola pieza con la viga de sección tubular cuadrada que dá la rigidez necesaria, formando tres módulos de 4 m que se unen con juntas bridadas.

No hay posibilidad de mover los vidrios que forman las paredes para efectuar algún tipo de ajuste si fuera necesario; lo que sería una limitación importante para lograr precisión experimental.

La viga se soporta y articula en su inicio, con un perno a un apoyo doblemente anclado al piso y la variación de la pendiente se logra con tres pares de elevadores mecánicos de tornillo, sincronizados por medio de una cadena de distribución que permite accionar los elevadores con el mismo mando. Cada par de elevadores tiene un paso diferente, ya que el par del

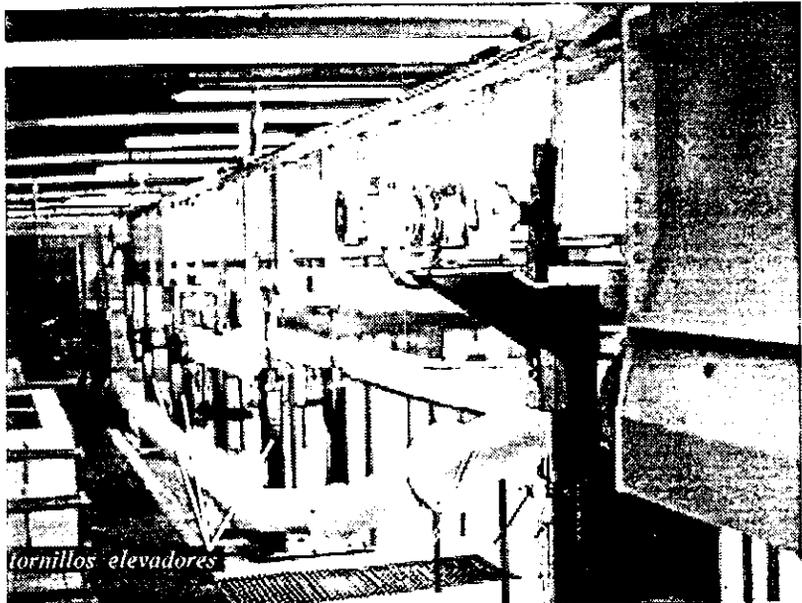


Foto 1.4 Los tornillos elevadores están sincronizados a través de una cadena de distribución.

extremo debe tener una carrera mayor que los otros dos pares.



Foto 1.5 Control de nivel.

La compuerta a la salida del canal, permite controlar el tirante dentro del canal y descargar como orificio o como vertedor. Se posiciona con un volante manual de transmisión formada por engranes y cremalleras.

1.3.2. Canal de pendiente variable de la División de Estudios de Posgrado F.I. U.N.A.M.

Marca: Armfield Technical Education, Hampshire England.

Longitud de la sección de trabajo: 12 m

Ancho de plantilla: 0.30 m

Altura útil del canal: 0.50 m

Máxima pendiente negativa: - 0.0050

Máxima pendiente positiva: 0.0240

Gasto máximo: 30 lt/s

Suministro de agua: recirculación con una bomba de 7.5 HP



Foto 1.6 Estructura instalada en el laboratorio de hidráulica de la D.E.P.F.I. U.N.A.M.

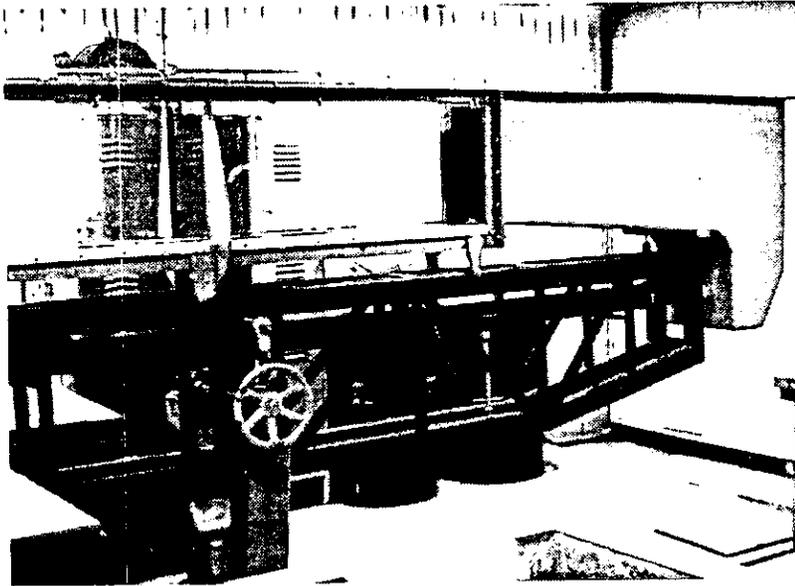


Foto 1.7 El tanque es de fibra de vidrio y la tubería de recirculación de pvc, ambos materiales muy ligeros.

Almacenamiento: 5.4 m³

El sistema se compone de las siguientes partes:

Tanque de llamada

El tanque de llamada es basculante, con tranquilizadores en su interior, la tubería de llenado se une directamente al tanque ya que tanto la tubería como el tanque suben y bajan con la viga que dá soporte al canal.

Tanque de salida

Sobre el tanque de salida se observa un mecanismo oscilante o batidor que permite emplear la instalación como canal de olas. El tanque tiene una válvula que permite mantener lleno el canal al nivel requerido.

Tanques de almacenamiento y recirculación.

Ubicados lateralmente, sirven también como andador de trabajo. Este almacenamiento permite que el módulo no dependa de la alimentación de un tanque de carga constante. La recirculación se efectúa con tubería de 3"Ø y una bomba de 7.5 HP cuya descarga se conecta a la tubería mediante un tubo flexible con abrazaderas; una válvula de compuerta se emplea para controlar el gasto y un medidor de inserción tipo propela

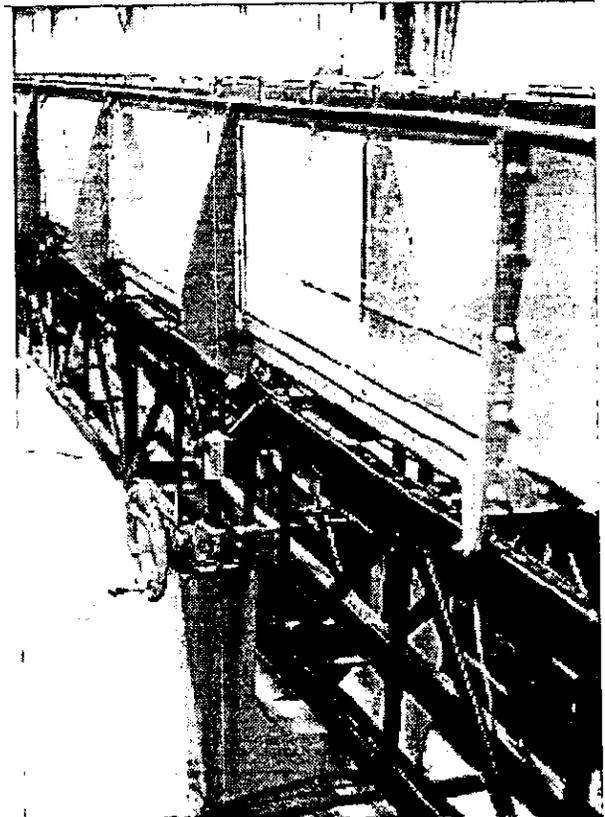


Foto 1.8 La estructura cambia su pendiente con un sistema mecánico manual.

para aforar el flujo.

Cuerpo del canal.

La sección rectangular es de paredes de vidrio y fondo de lámina protegida con pintura anticorrosiva, la estructura del canal rectangular está sobrepuesta a la viga tipo armadura de 0.70 X 0.30 m que dá la rigidez necesaria. La viga está formada por tres módulos de 4 m que se unen con tornillería, pero el tipo de soportes laterales hacen que la estructura de observación del canal parezca continua. Hay posibilidad de mover los vidrios que forman las paredes para efectuar algún tipo de ajuste a todo lo largo si fuera necesario.

La viga se articula en una base anclada al piso y la variación de la pendiente se logra con un par de elevadores de tipo tornillo, sincronizados por medio de una barra de distribución que permite accionar los elevadores con el mismo mando. (Foto 1.8). Estos apoyos dan un claro a la viga de 10 m.

1.3.3. Canal de pendiente variable del Instituto de Ingeniería U.N.A.M.

Marca: s/m

Longitud de la sección de trabajo: 29 m

Ancho de plantilla: 0.80 m

Altura útil del canal: 0.90 m

Máxima pendiente negativa: variable
en dos secciones

Máxima pendiente positiva: variable
en tres secciones

Gasto máximo: 150 lt/s

Suministro de agua: sistema de
tanque elevado

Almacenamiento: cisternas de gran
capacidad.

El sistema se compone de las
siguientes partes:

Tanque de llamada.



Foto 1.9 Esta instalación se ha empleado para estudios de arrastre de fondo, entre otros.

El tanque de llamada tiene disipadores de turbulencia y direccionadores para la entrada del canal, la tubería de llenado que conduce el agua desde el tanque elevado del laboratorio, descarga directamente al tanque construido en mampostería.

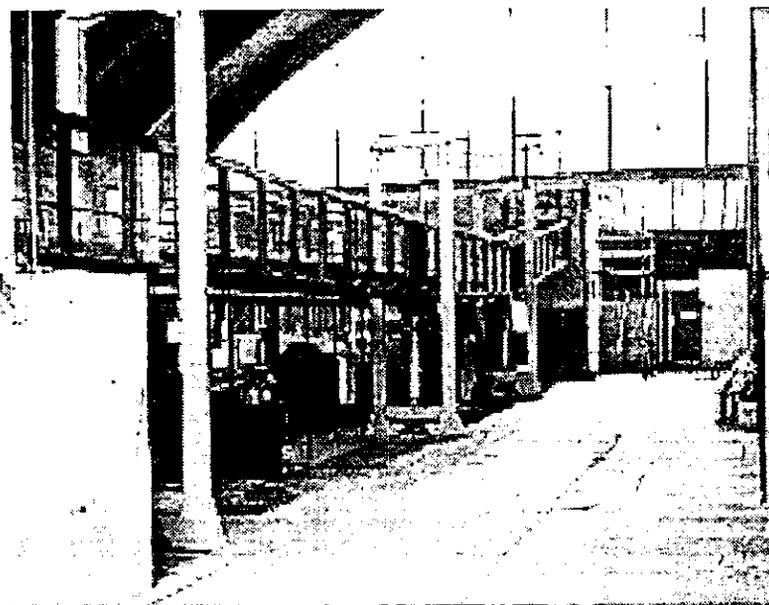


Foto 1.10 Los tanques de entrada y salida son de mampostería. La entrada del canal sella contra la pared del tanque con una junta flexible sujeta con bridas.

Tanque de salida.

Funciona como colector de las descargas del canal, construido en mampostería. Cuenta con un canal



Foto 1.11 Los pistones elevadores están articulados en sus extremos, de tal forma que las cargas que toman, siempre son axiales.

para sedimentar los sólidos empleados en estudios de arrastre.

Cuerpo del canal.

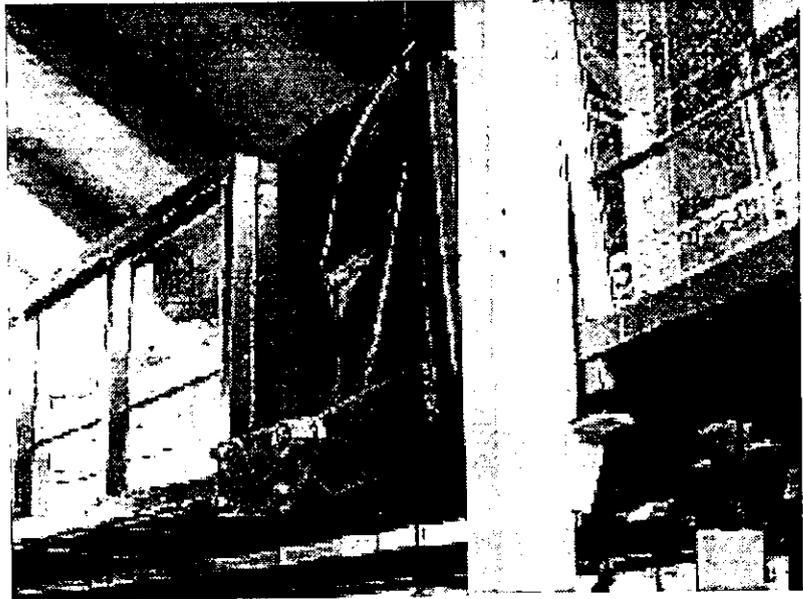
El cuerpo del canal está constituido de tres secciones, las cuales se articulan entre sí permitiendo a cada sección distintas pendientes. La sección rectangular es de paredes de vidrio y fondo de placa estructural protegida con pintura anticorrosiva, la rigidez necesaria del canal está dada por su propia estructuración, trabajando como viga, sin ningún soporte adicional.

La primera sección de la viga se articula en una base anclada al tanque de llamada.

La variación de la pendiente de cada sección se logra con tres gatos hidráulicos que funcionan

independientemente; estos gatos se apoyan cada uno en un marco que dá la estabilidad necesaria al conjunto de la estructura.

Foto 1.12 Los módulos del canal son articulados, obteniéndose el sello entre ellos mediante una junta flexible diseñada especialmente para este fin.



1.3.4. Canal de pendiente variable del Instituto de Ingeniería U.N.A.M.

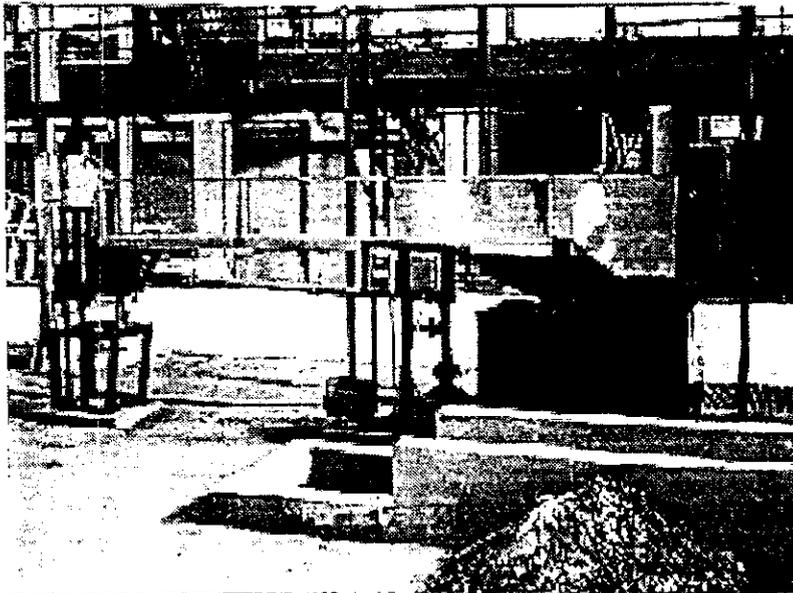


Foto 1.13 Instalación de pequeñas dimensiones, fácil de operar.

Marca: S/m

Longitud: 3 m

Ancho de plantilla: 0.1 m

Altura útil del canal: 0.3 m

Máxima pendiente negativa: no

Máxima pendiente positiva: 0.0070

Gasto máximo: 10 lt/s

Suministro de agua: recirculación con una bomba centrífuga de 1HP

Almacenamiento: 0.5 m³

El sistema se compone de las siguientes partes:

Tanque de llamada.

El tanque de llamada es basculante, la tubería de suministro se une al tanque por medio de un tubo flexible y abrazaderas.

Tanque de salida y recirculación.

Este tanque almacena un pequeño volumen de agua, con lo que se independiza el módulo. La recirculación se lleva a cabo con tubería de 2" \varnothing . Este tanque construido en lámina, actúa soportando el cuerpo del canal con una articulación a base de un par de chumaceras.

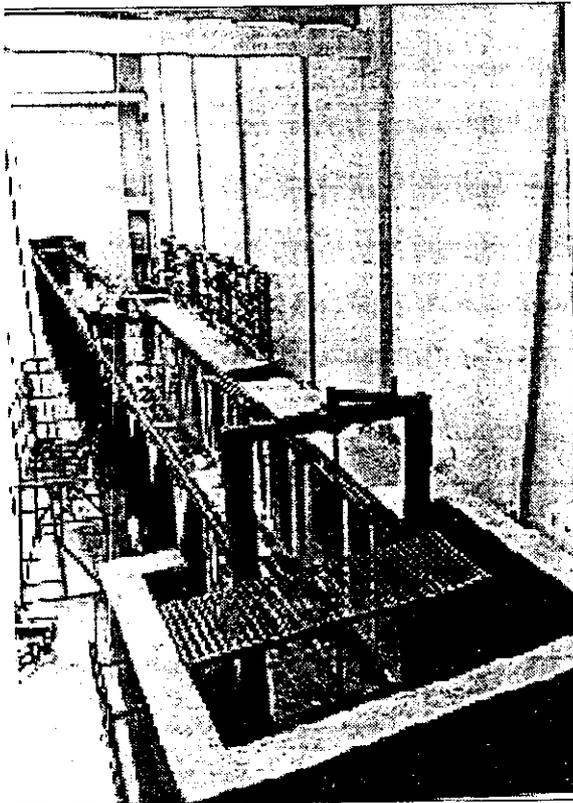
Cuerpo del canal.

La sección rectangular es de paredes de vidrio y fondo de acero inoxidable, la estructura del canal forma una sola pieza de 3 m sobre dos montantes de sección tubular metálica de 5X5 cm.

La viga se soporta y articula en su extremo sobre el tanque de salida y la variación de la pendiente se dá con un pequeño gato hidráulico.

Control de nivel.

La compuerta del tipo abatible a la salida del canal, permite controlar el tirante dentro del canal. Se



posiciona con un volante manual que sube y baja un husillo en el extremo no articulado de la compuerta.

1.3.5. Canal de pendiente variable del Centro Interamericano de Recursos del Agua C.I.R.A. F.I. U.A.E.M. Toluca México.

Marca: s/m

Longitud de la sección de trabajo: 22 m

Ancho de plantilla: 1 m

Altura útil del canal: 1 m

Máxima pendiente negativa: - 0.0068

Máxima pendiente positiva: 0.03

Gasto máximo: 200 lt/s

Suministro de agua: recirculación con tanque elevado con un altura de 8.5 m

Almacenamiento: 430 m³

Foto 1.14 Canal de pendiente variable del C.I.R.A. Vista desde aguas abajo.

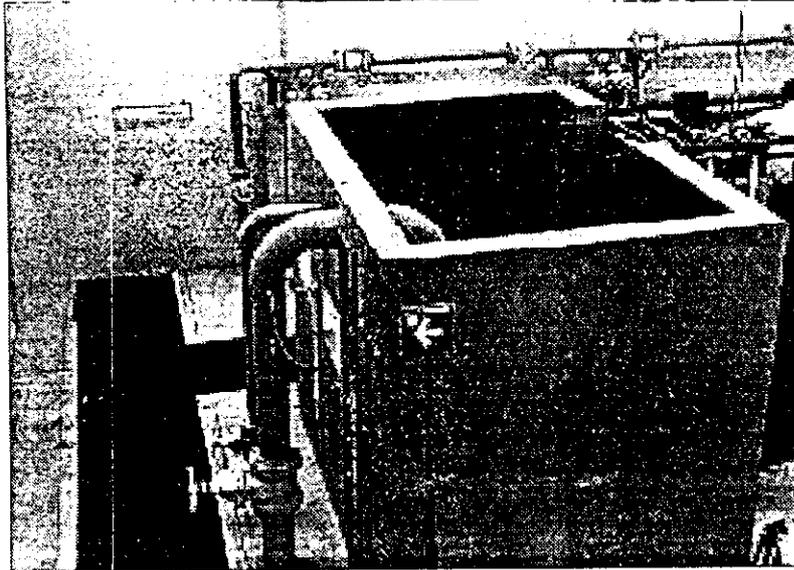


Foto 1.15 La alimentación del canal de pendiente variable se lleva a cabo con la operación del sistema de bombeo y el tanque de carga constante del laboratorio de hidráulica.

instalación depende de un tanque de carga constante, llevándose a cabo la recirculación con tuberías de 6"Ø y 4"Ø con válvulas de compuerta para controlar el gasto y una tobera para aforar el gasto. El agua es captada en canales de retorno, propios de la infraestructura del laboratorio, que la conducen hasta el cárcamo de bombeo.

Cuerpo del canal.

La sección es rectangular, de paredes de acrílico y fondo del mismo material, la estructura del canal rectangular está montada sobre la viga formada por dos secciones tubulares arriostradas.

La viga, formada como bastidor, se soporta y articula en su inicio, en un apoyo anclado al piso y la

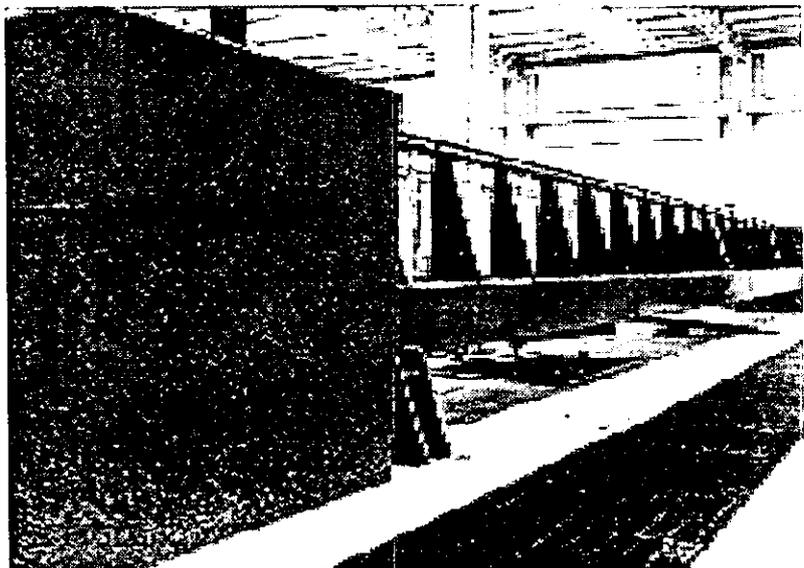


Foto 1.16 El flujo de agua es captado por el tanque de salida y conducido por canales colectores a los cárcamos de bombeo del laboratorio.

El sistema se compone de las siguientes partes:

Tanque de llamada.

El tanque de llamada es fijo, construido de mampostería, con tranquilizadores en su interior; las tuberías de suministro descargan libremente en el tanque.

Tanques de salida y recirculación.

El tanque de salida funciona como colector de la descarga del canal, la

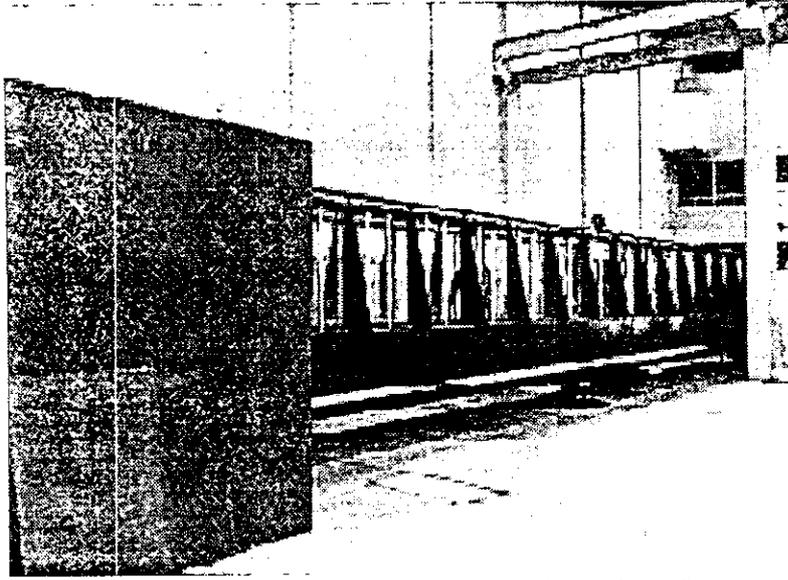


Foto 1.17 Los soportes que sujetan las placas de acrílico de las paredes están fijos sobre la viga, haciendo que el canal forme una sola pieza con la viga.

variación de la pendiente se obtiene mediante un pistón hidráulico actuado por una bomba.

El claro entre el pistón y la articulación es de 18 m, lo que podría ocasionar flexiones importantes cuando el canal se llene completamente, si el diseño estructural no hubiese considerado esa condición.

El canal entra al tanque de llamada, sellando perimetralmente con una membrana flexible sujeta por sus extremos con bridas. Esta entrada tiene un filtro y un panel direccionador del flujo.

Control de nivel.

La compuerta deslizante a la salida del canal, permite controlar el tirante dentro del canal y descargar como orificio. Se posiciona manualmente con un volante de eje vertical tipo tornillo.

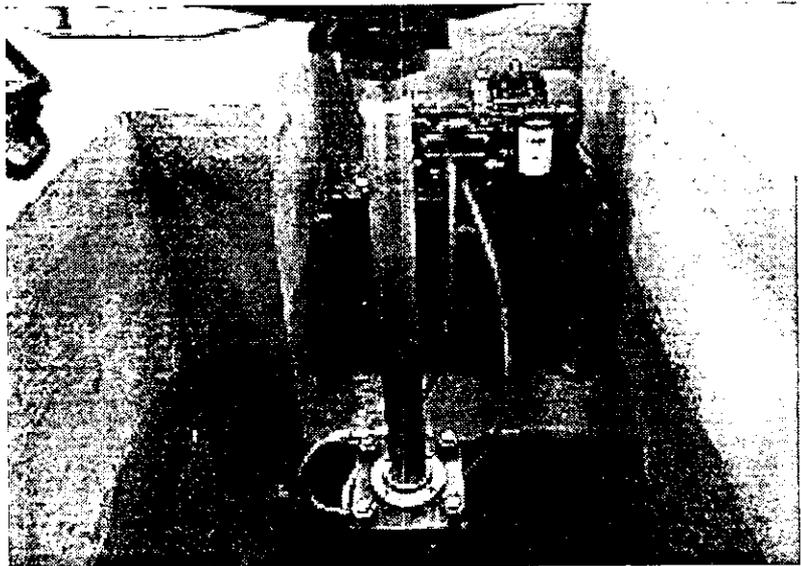


Foto 1.18 El sistema de elevación hidráulico es operado mediante un motor de 1.0 HP

1.3.6. Canal de pendiente variable de la DEPFI Campus Morelos U.N.A.M.

Marca: I.TD

Longitud de la sección de trabajo: 4 m

Ancho de plantilla: 0.245 m

Altura útil del canal: 0.485

Máxima pendiente negativa: - 0.0240

Máxima pendiente positiva: 0.0270

Gasto máximo: 50 lt/s

Suministro de agua: recirculación con una bomba de 10 HP.

Almacenamiento: 5 m³

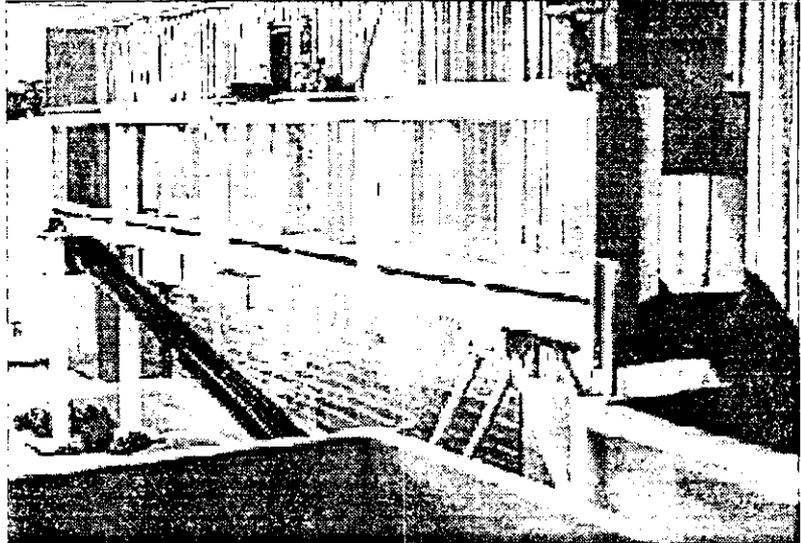


Foto 1.19 Vista del canal desde aguas abajo.

El sistema se compone de las siguientes partes:

Tanque de llamada.

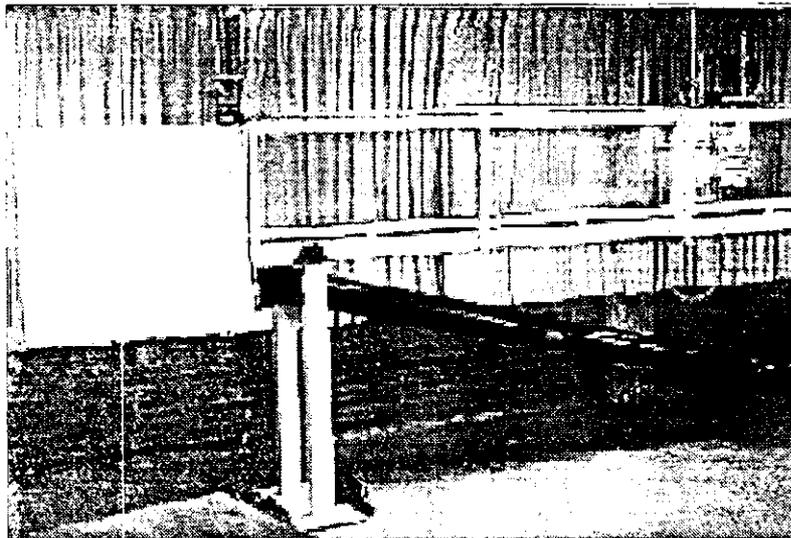


Foto 1.20 El diseño es muy similar al canal de pendiente variable Marca Plint and Partners.

El tanque de llamada es basculante, con tranquilizadores en su interior; la tubería de suministro se une al tanque por medio de una junta flexible que permite movimiento a la estructura del canal a la que el tanque está sujeto.

Tanques de salida y recirculación.

Estos tanques permiten el almacenamiento de agua, lo que hace que el módulo no dependa de un tanque de carga constante. La recirculación se lleva a cabo con tubería de 6" \varnothing , una bomba de 10 HP, válvula de compuerta para controlar el gasto.

Cuerpo del canal.

La sección rectangular es de paredes de vidrio y fondo de placa recubierta con pintura anticorrosiva, la estructura del canal rectangular forma una sola pieza con la viga de sección tubular cuadrada que dá la rigidez necesaria, formando dos módulos de 2 m que se unen con bridas.

La viga se soporta y articula en su inicio, con un par de chumaceras a un apoyo doblemente anclado



Foto 1.22 Compuerta deslizante.

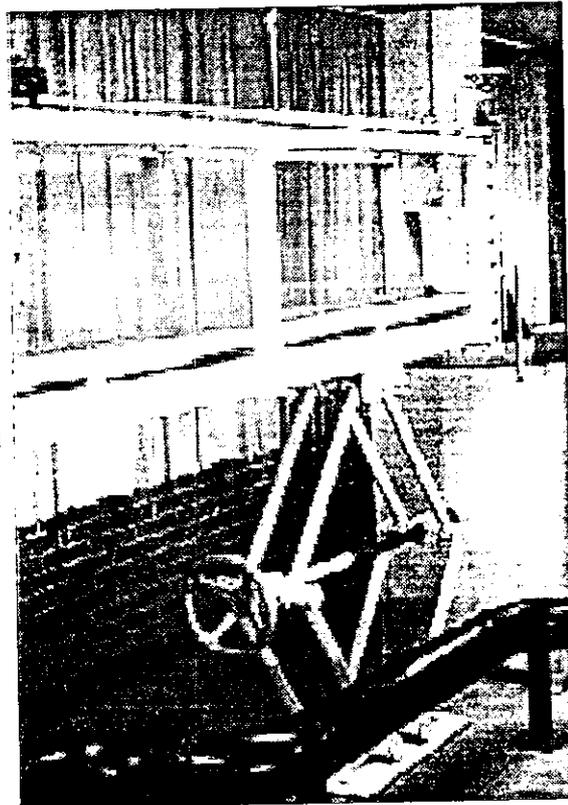


Foto 1.21 Elevador tipo tijera

al piso. La variación de la pendiente se logra con un elevador tipo tijera accionado manualmente con un volante.

Control de nivel.

La compuerta deslizante, a la salida del canal permite controlar el tirante y descargar como orificio. Se posiciona con un volante manual a través de engranes y cremalleras.

1.3.7. Canal de pendiente variable del National Water Research Institute, Hydraulics Laboratory, CANADA.

Marca: s/m

Longitud de la sección de trabajo: 22 m

Ancho de plantilla: 2 m

Altura útil del canal: 0.75 m

Máxima pendiente negativa: - 0.01

Máxima pendiente positiva: 0.01

Gasto máximo: 500 lt/s

Suministro de agua: recirculación con tres bombas de 75HP c/u y tanque de carga constante con una altura

$H = 6$ m

Almacenamiento: 10,000 m³

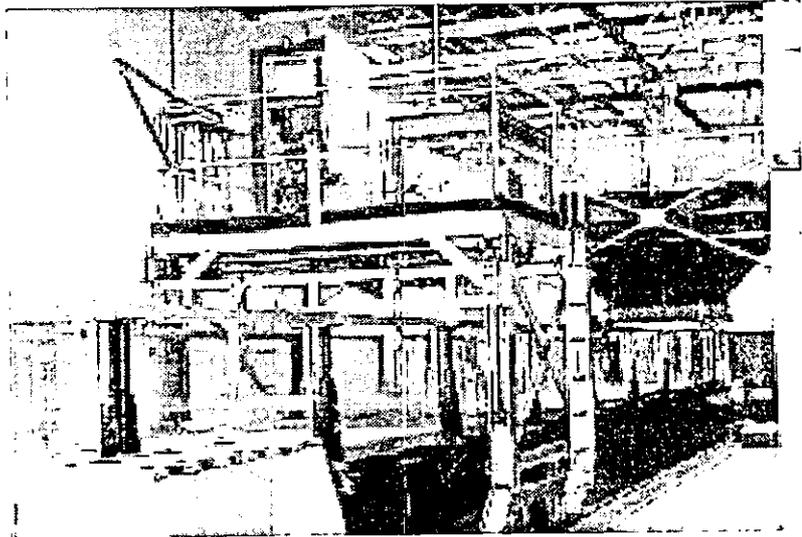


Foto 1.23 Una plataforma sobre rieles conduce los dispositivos de medición necesarios para las pruebas y ensayos que se efectúan.

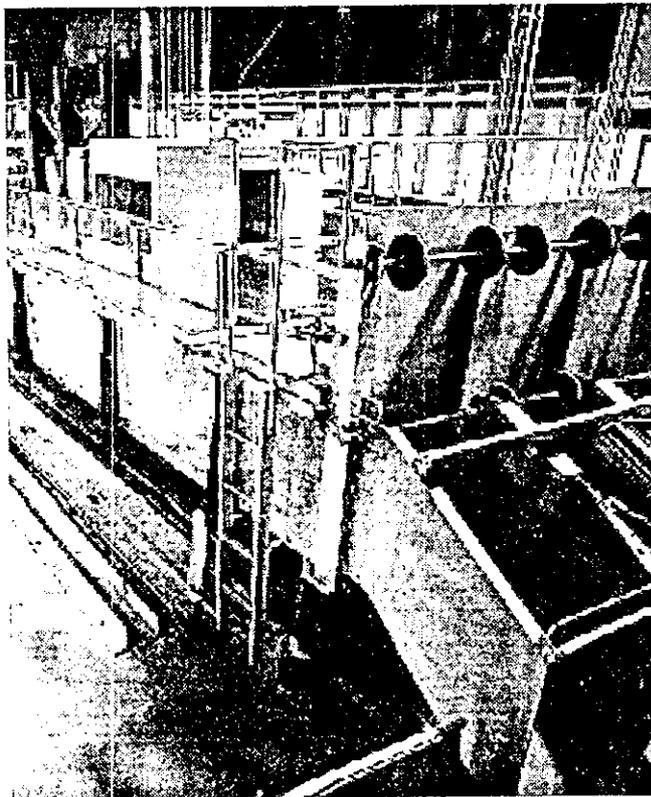


Foto 1.24 La sección de trabajo es de fondo y paredes de vidrio, la compuerta a la salida controla el flujo en tres secciones diferentes.

El sistema se compone de las siguientes partes:

Tanque de llamada.

El tanque de llamada es basculante, con paredes laterales y fondo curvados para direccionar el flujo a la entrada del canal; la tubería de suministro descarga libre dentro del interior del tanque. A continuación del tanque de llamada hay una tolva para suministrar sedimento uniformemente en todo el ancho del canal con un gasto de hasta de 3.25 kg/s de material arenoso.

Tanques de salida y recirculación.

Estos tanques permiten coleccionar los sedimentos y depositarlos en el fondo antes de que el agua pase al cárcamo de bombeo.

Control de nivel.

La compuerta a la salida de la estructura, permite controlar el tirante dentro del canal y descargar como orificio.

Se posiciona con una manivela manual a través de engranes y cremalleras.

Cuerpo del canal.

La sección rectangular es de paredes y fondo de vidrio, la estructura del canal se sobrepone a un bastidor formado con dos vigas de sección I de gran peralte. Toda la estructura es de una sola pieza.



Foto 1.25 Este canal se emplea para el estudio de transporte de sedimentos.

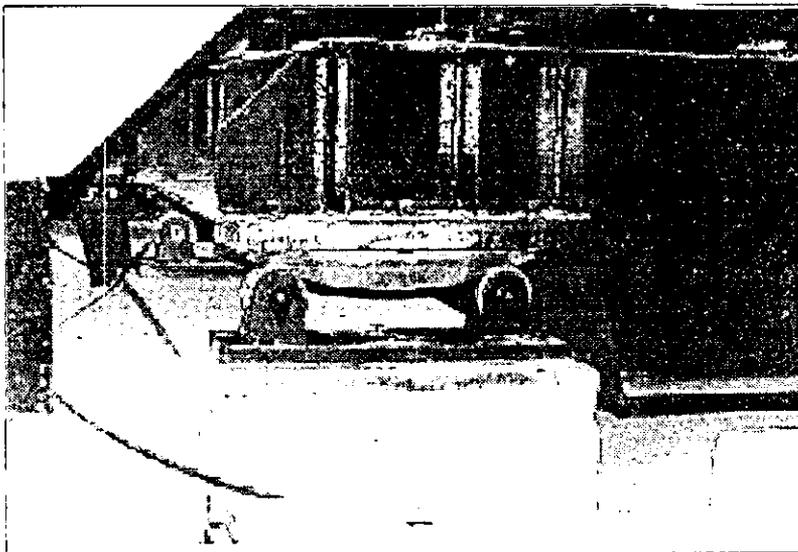


Foto 1.26 Apoyo estructurado para permitir la variación de la pendiente al conjunto tanque de llamada-canal.

La viga se soporta y articula en su inicio, con una media luna sobre correderas en un apoyo anclado al piso y la variación de la pendiente se logra con un par de elevadores dispuestos paralelamente a cada lado de la viga, formando un claro de 20m.

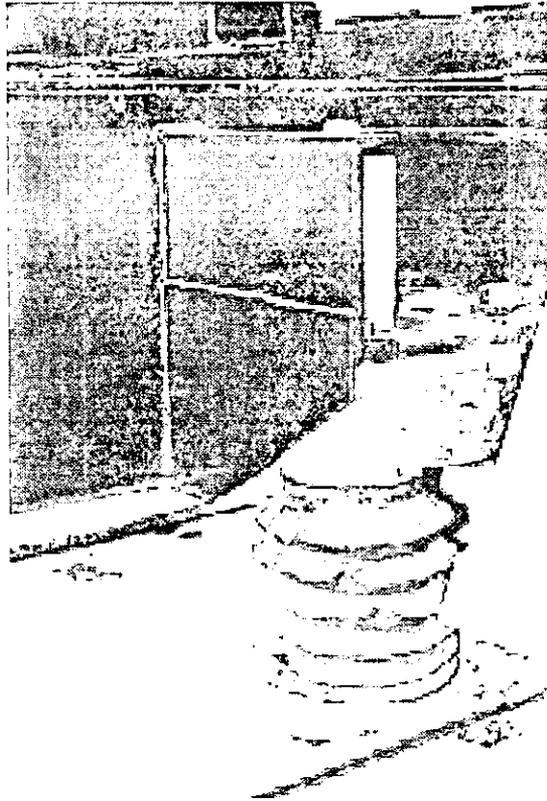


Foto 1.27 Los elevadores son de tornillo actuados con un motor reductor.

1.3.8. Canal de pendiente variable del National Water Research Institute, Hydraulics Laboratory, CANADA

Marca: s/m

Longitud de la sección de trabajo: 20 m

Ancho de plantilla: 0.40 m

Altura útil del canal: 0.50 m

Máxima pendiente negativa: - 0.01

Máxima pendiente positiva: 0.02

Gasto máximo: 200 lt/s

Suministro de agua: recirculación con tres bombas de 75 HP c/u y tanque de carga constante $H = 6\text{m}$

Almacenamiento: 10,000 m³

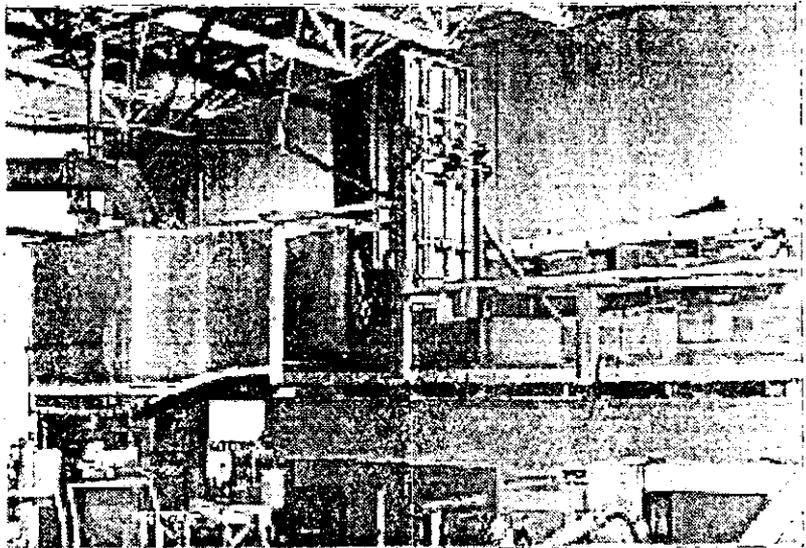


Foto 1.28 La compuerta aguas arriba del canal se emplea para estudio de descargas de fondo.

El sistema se compone de las siguientes partes:

Tanque de llamada.

El tanque de llamada es basculante, con paredes laterales y fondo curvados para direccionar el flujo a la entrada del canal; la tubería de suministro descarga libre dentro del interior del tanque.

Tanques de salida y recirculación.

No hay tanque colector, el agua se capta en canales de retorno del laboratorio, el sistema se abastece con el tanque elevado que también forma parte de la infraestructura del laboratorio.

Cuerpo del canal.

La sección rectangular es de paredes de vidrio, el fondo es de placa metálica recubierta con pintura

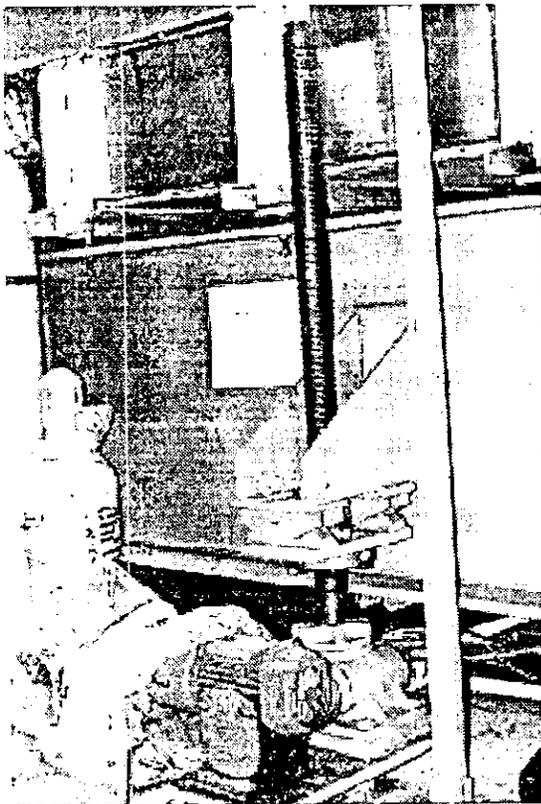


Foto 1.29 Los tornillos elevadores requieren de espacio para elevar o bajar la estructura, en este caso quedan ubicados por fuera de la viga y al girar el tornillo, la tuerca que está fija a la estructura ejerce la fuerza de apoyo necesaria para posicionar el canal en el nivel deseado.

anticorrosiva; la estructura del canal rectangular se sobrepone a un bastidor formado con dos vigas de sección I. Toda la estructura del canal es de una sola pieza.

La viga se soporta y articula en su inicio en un apoyo anclado al piso y la variación de la pendiente se logra con tres pares de elevadores dispuestos a cada lado de la viga, formando claros de 6 m. Los elevadores son de tornillo actuados con un motor reductor y sincronizados con flechas de distribución.

Control de nivel

La compuerta es deslizante, ubicada a la salida del canal, permite controlar el tirante. Se posiciona con una manivela manual a través de engranes y cremalleras.

1.4 Aspectos operativos

Para la etapa de planeación en el diseño (o anteproyecto) del canal de pendiente variable, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos de tipo operativo:

- Contar con el levantamiento del área donde se instalará el módulo, ya que de acuerdo al espacio disponible deberá decidirse la ubicación teniendo en cuenta que la conexión del suministro de agua sea lo más cercana posible.
- Definir la capacidad de suministro de agua, para la operación del módulo, tanto en la cantidad como para el control del gasto.
- Preveer un desagüe para vaciar rápidamente la instalación (tanques de llamada y salida).
- Establecer sitios adecuados para observar, medir y registrar el comportamiento de las variables de interés.
- La entrada del agua debe ser lo más uniforme posible ya sea al sitio de observación o a los aforadores de gasto; para ello se utilizarán tranquilizadores, estructuras que tienen por objeto disipar la turbulencia del agua y consisten en pantallas de diferentes materiales, como piedra de diámetro adecuado a los volúmenes de agua que se manejan, acomodada de tal manera que las aberturas se distribuyan lo más uniformemente posible; otras pantallas pueden ser de geometría mas definida, como los que se fabrican con secciones tubulares metálicas, cuadradas o circulares a manera de panales. Estos últimos ayudan a direccionar y uniformizar el flujo.
- El aforador de gasto puede estar aguas arriba o abajo de la zona de pruebas, lo primero es más conveniente porque para establecer un flujo constante no se requiere esperar que el agua pase por la zona de medición, la que en ocasiones tiene una gran capacidad de almacenamiento. Algunas veces, los aforadores se colocan aguas abajo de la zona de pruebas.

1.5 Especificaciones para diseño y operación.

De las observaciones efectuadas a las estructuras arriba mencionadas y a las condiciones de operación, se definió que las características más convenientes para el diseño del canal de pendiente variable son:

-La ubicación del módulo experimental se indica en la fig. 1.1. Se decidió éste sitio para aprovechar las facilidades con las que cuenta el laboratorio de Hidráulica "Enzo Levi" del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

a) El tanque de llamada se instala muy cerca de la red de distribución de agua del laboratorio, de tal manera que con una derivación se suministre el gasto, que de acuerdo a la capacidad de bombeo y a la elevación del tanque de carga constante se estima un gasto entre 250 y 300 lt/s.

Esta alimentación contará con una válvula de mariposa para controlar el gasto. Además el desagüe del tanque permitirá eventualmente desalojar parte del agua (by pass) para afinar el gasto en la zona de trabajo.

b) La longitud total del canal de pendiente variable debe aprovecharse para que la descarga de agua se efectúe en el canal colector del laboratorio sin necesidad de construir una canalización adicional.

c) Ubicado el módulo experimental en el área de influencia de la grúa viajera, se tendrá facilidad para llevar a cabo las maniobras de montaje.

d) Con la disposición indicada, se pretende que no estorbe en el crecimiento futuro del laboratorio, sin embargo, el diseño debe considerar que las partes del canal de pendiente variable sean desmontables, para facilitar su traslado y reubicación.

e) El suministro eléctrico no requiere de una línea muy larga de cableado.

-La sección de trabajo del canal será una sección rectangular, de paredes y fondo transparentes, para facilitar la observación.

-La sección de trabajo será modular y se *sobrepondrá* a la viga de soporte la cual variará su posición vertical en uno de sus extremos. De esta forma también será posible cambiar la sección de trabajo sin modificar el resto de la estructura, únicamente teniendo cuidado que la nueva sección no rebase la carga de diseño inicial.

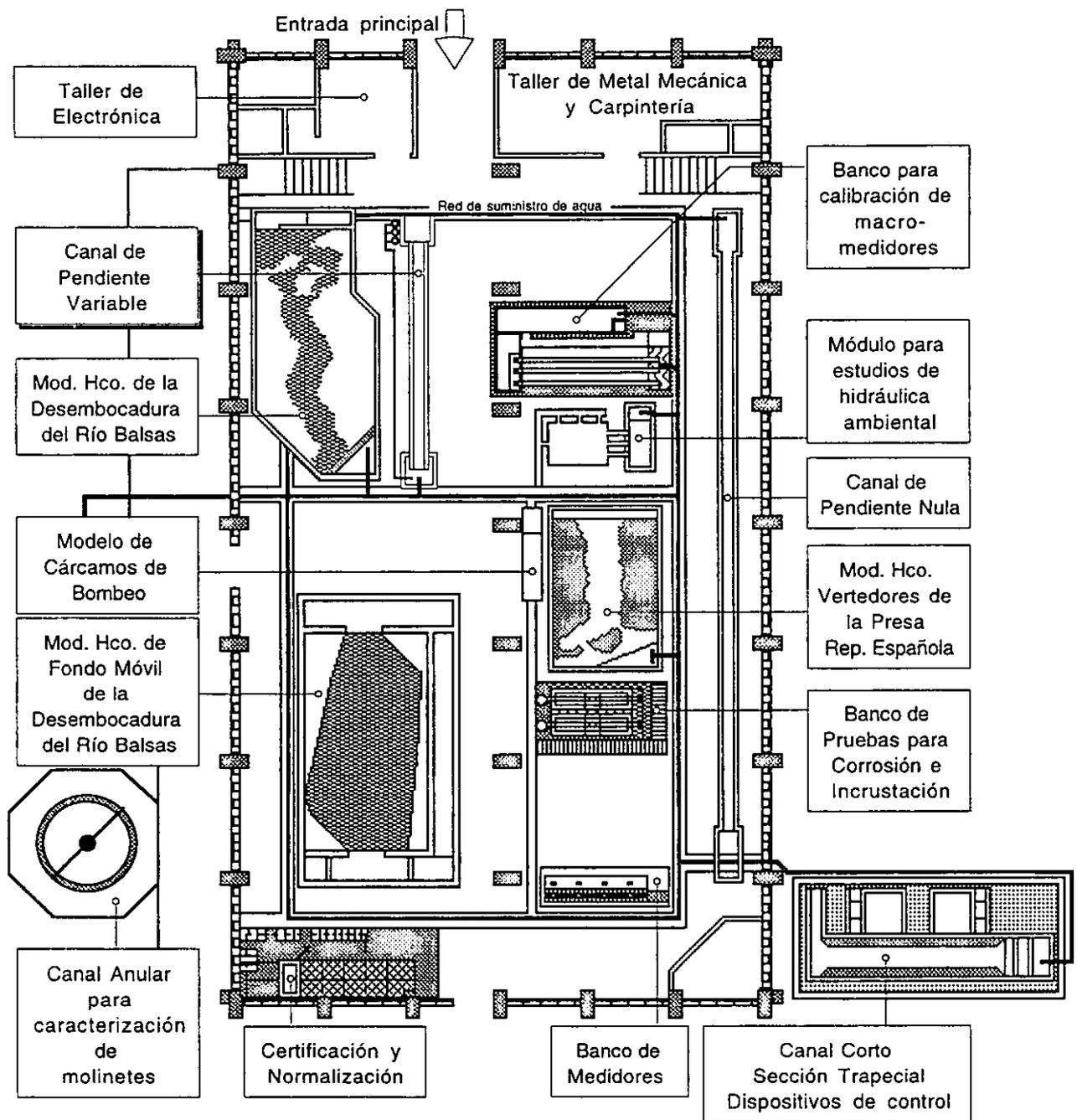


Fig. 1.1 Ubicación de módulos experimentales en el laboratorio de hidráulica "ENZO LEVI" IMTA.

-La pendiente máxima positiva será de 0.0277 y la pendiente máxima negativa de 0.0055, con lo que se cubre el intervalo que normalmente se maneja en trabajos de campo y permite un margen amplio de la variación de la pendiente para estudios especiales.

-Es más conveniente emplear sistemas de elevación hidráulica que mecánica ya que si se emplean varios puntos de soporte para la viga, los elevadores mecánicos deben funcionar en forma sincronizada a diferentes pasos y las flechas o cadenas de distribución son estorbosas y difíciles de manejar manualmente. Solo dos de las instalaciones presentadas emplean elevadores hidráulicos, en una son de movimiento independiente y en la otra se emplea un solo pistón pero el claro entre la articulación y el punto donde apoya el émbolo es tal que la viga diseñada tiene un gran peralte, que no es la mejor alternativa considerando el peso, la poca maniobrabilidad y su costo.

-Se diseñará un nuevo sistema de elevadores que trabaje simultáneamente con la distribución de peso y longitud de carrera necesaria en cada punto.

-La viga debe tener claros cortos entre sus apoyos para evitar que su peralte sea muy grande, se debe buscar una estructura ligera, suficientemente rígida, es decir, con una flecha no mayor de 2 mm.

-A la sección de trabajo del canal debe permitírsele acceso de instrumentos tanto por arriba como por la plantilla, para lo cual es conveniente que la estructura se encuentre por lo menos 1.2 m sobre el nivel del piso y que la viga de soporte se forme con un bastidor o con una estructura tipo armadura.

-El módulo experimental funcionará con el tanque elevado propio de la infraestructura del laboratorio y eventualmente, para disminuir costos, operar para gastos menores en forma autónoma, con un sistema de recirculación con un equipo de bombeo.

-El tanque de llamada será soportado directamente al piso, debido al volumen de agua que se

pretende manejar.

-El tanque de salida funcionará como:

- a) Canal vertedor Rehbock
- b) Como cárcamo de bombeo del sistema de recirculación.

-Se utilizarán tranquilizadores, para disipar la turbulencia del agua en el tanque de llamada y en el tanque de salida.

-Se empleará una boquilla a la entrada de la sección de trabajo para direccionar el flujo y que sea lo más uniforme posible en el sitio de observación.

-Como el tanque de llamada será fijo, deberá diseñarse una junta flexible que permita a la sección de trabajo dos condiciones:

- a) Movilidad respecto al tanque de llamada
- b) Impedir que el agua escape fuera de la sección de trabajo.

-Además de que el aforo se realice a la salida de módulo experimental, también se establecerán dos estaciones de aforo, una en la tubería de la red empleando un tubo de Pitot y la otra estación en el sistema de recirculación con una tobera.

-El nivel del agua dentro de la sección de trabajo será controlado con una compuerta aguas abajo, al extremo del canal. Esta compuerta debe facilitar la descarga ya sea como vertedor o bien como orificio. Será metálica de tipo deslizante, y posicionada con un motor reductor y engranes-cremalleras.

-El vidrio para las paredes deberá ser templado y de cantos pulidos de 9 a 12 mm de espesor. Este material resulta más conveniente que el acrílico, pues se raya mucho menos y requiere poco mantenimiento. No se recomiendan claros mayores de 2 m para cargas hidrostáticas de más de 1m de columna de agua para hojas de vidrio soportadas perimetralmente.

-Para el fondo se emplearán placas de acrílico de 9 mm, este material es fácil de perforar para hacer instalaciones provisionales. Hay que cuidar su manejo ya que se raya con facilidad.

-Tanto el fondo como las paredes de la sección de trabajo, al ser ensambladas debe dejarse una separación de 2 a 4 mm entre hoja y hoja para absorber cualquier dilatación de los mismos materiales o bien la flexión que en su conjunto pueda tener la viga al momento de trabajar.

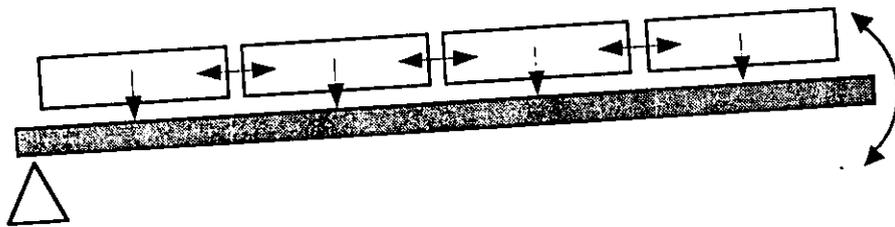
-Debe prevenirse un sistema para ajustar la alineación de las hojas de vidrio de manera que la sección sea uniforme a lo largo de todo el canal.

-Previendo una reubicación, los tanques serán metálicos, pues los de mampostería deben demolerse para efectuar algún cambio de lugar, a menos que resulten suficientemente pequeños para que el costo de demolición y reconstrucción no sea mayor que el que se efectúe como inversión inicial de un tanque metálico.

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

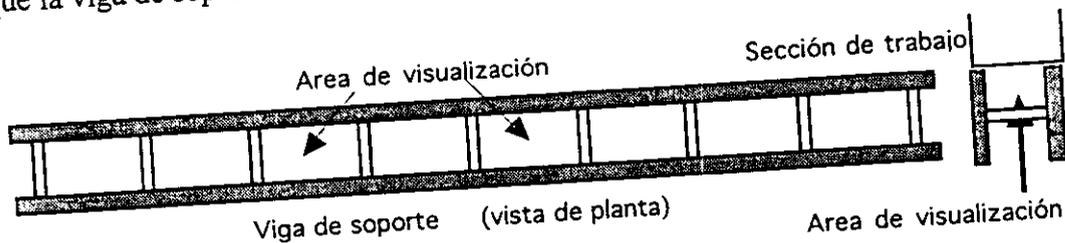
Es importante resaltar los detalles nuevos que se introducen en el desarrollo del proyecto y que de alguna manera contribuyen a obtener una instalación fácilmente adaptable, previendo futuras aplicaciones y de operación confiable.

- La sección de trabajo será modular y se sobrepondrá a la viga de soporte, la cual variará su posición vertical en uno de sus extremos.



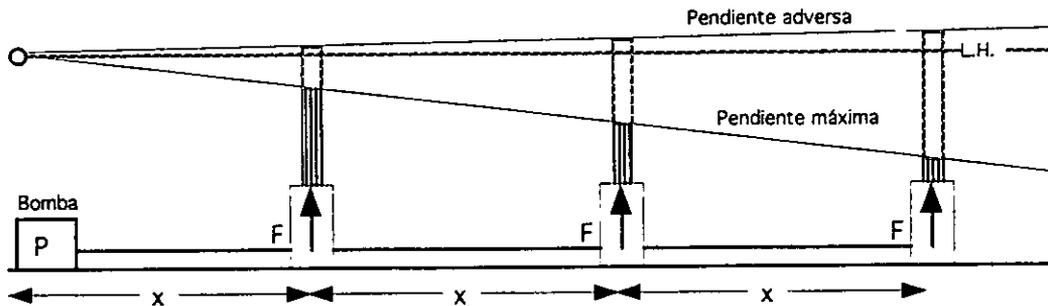
De esta forma también será posible cambiar la sección de trabajo sin modificar el resto de la estructura, únicamente teniendo cuidado que la nueva sección no rebase la carga de diseño inicial ni se ponga en riesgo la estabilidad de la estructura con una sección de trabajo más ancha que un 50 % del original.

- En la sección de trabajo debe haber acceso de instrumentos tanto por arriba como por la plantilla, para lo cual es conveniente que la estructura se encuentre por lo menos 1.2 m sobre el nivel del piso y que la viga de soporte se forme con un bastidor.



-La viga debe tener claros cortos entre sus apoyos para evitar que su peralte sea muy grande, se debe buscar una estructura ligera, suficientemente rígida, es decir, con una flecha no mayor de 2mm, para lo cual se necesita un sistema de elevadores o gatos hidráulicos que trabajando

simultáneamente, den múltiple apoyo a la viga distribuyendo el peso de tal forma que se eviten deformaciones.



Para éste punto del desarrollo del proyecto, se consultó con diferentes proveedores de equipos elevadores tanto neumáticos como hidráulicos y se encontró que existe una gama muy amplia de sistemas y capacidades de carga, desde unos cuantos cientos de kilos hasta decenas de toneladas, sin embargo técnicamente no había experiencia en emplear pistones hidráulicos en sistemas que requirieran trabajo simultáneo con igual capacidad de carga pero diferente longitud en la carrera del pistón y más de un proveedor sugirió el empleo de complicados sistemas de válvulas reguladoras de fluido que permitiera que cada elevador trabajara a diferente velocidad y longitud de desplazamiento.

Hubo necesidad de construir un pequeño prototipo para mostrar el principio de trabajo requerido y como, con tan solo conectar los pistones al mismo pistón maestro o bomba para dar presión, se lograba el efecto deseado.

En las fotos se observa el dispositivo montado; consta de una estructura rígida articulada y apoyada en uno de sus extremos; se emplearon bombas de aire

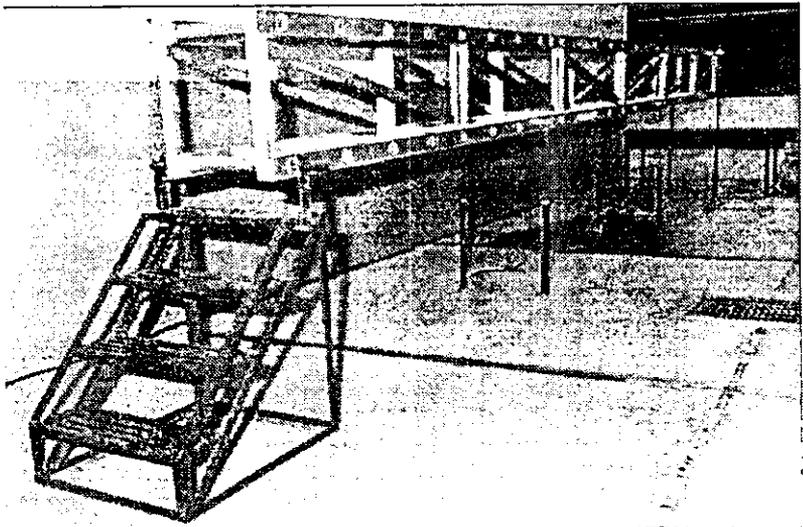


Foto 2.1 Estructura de aluminio articulada en un extremo y soportada por pistones elevadores.

manuales, que normalmente se usan para llenar los neumáticos de las bicicletas, como pistones que elevaran la estructura, dispuestos en parejas uno a cada lado de la estructura formando tres soportes adicionales al articuladoy colocados en forma equidistante.

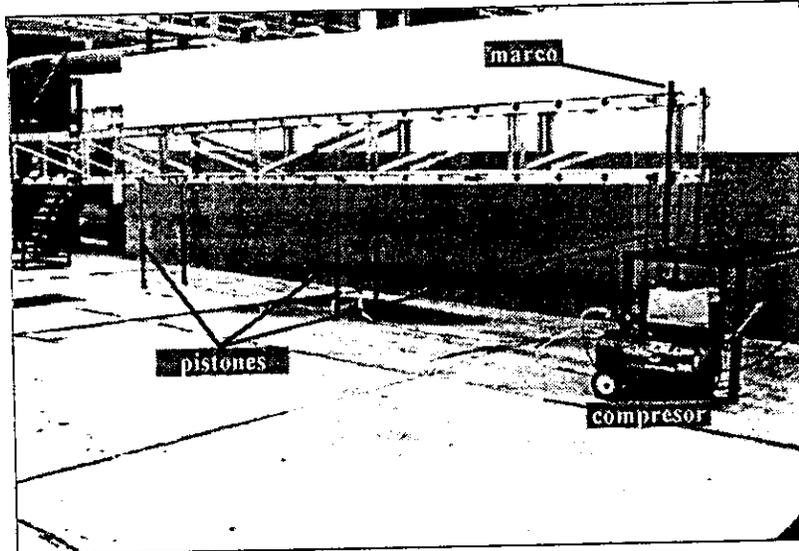


Fig 2.2 El desplazamiento lateral de la viga se evita con un marco que permite subir y bajar la estructura.

Los seis pistones neumáticos se conectaron con manguera flexible a la misma fuente de presión, que en este caso fue una compresora.

Con la válvula de salida de la compresora se reguló la presión de aire y los pistones subieron y bajaron la estructura sin ningún problema, tomando cada uno la posición que le correspondía por sí solo.

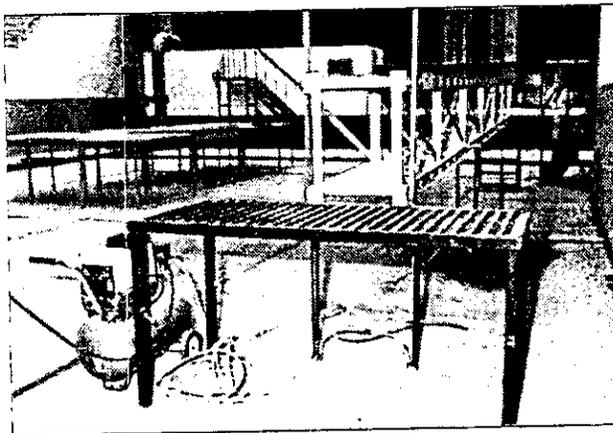


Foto 2.3 Posición baja de la estructura.

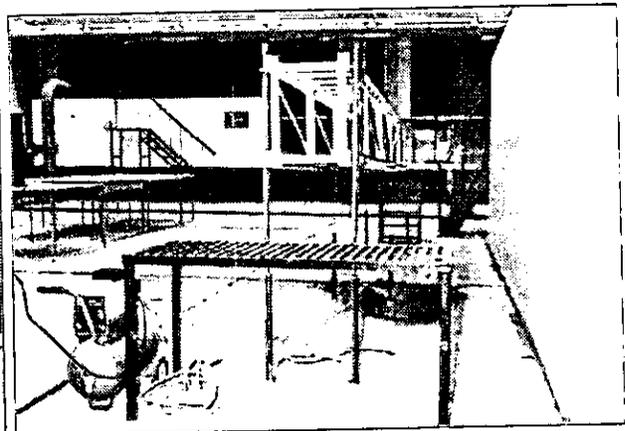
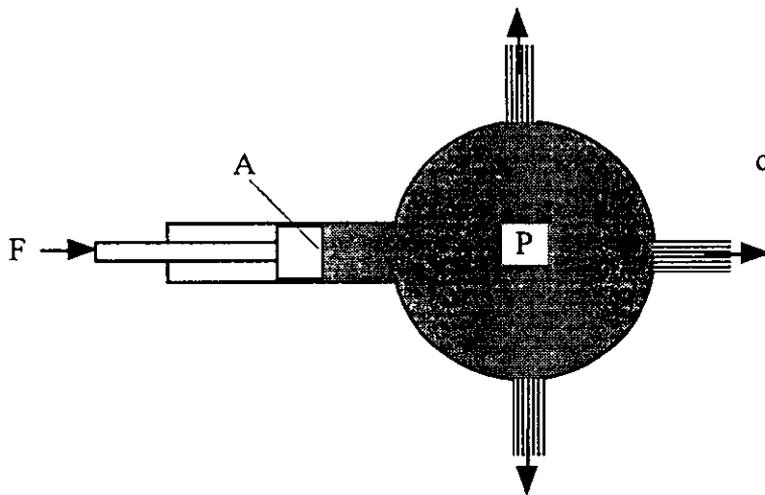


Foto 2.4 Posición alta de la estructura.

Este comportamiento obedece al principio de Pascal (Blas Pascal 1623-1662) que dice:

“La presión aplicada en un punto de un líquido contenido en un recipiente, se transmite íntegramente y en todas las direcciones con el mismo valor a través de dicho líquido”

Esto se ejemplifica de la siguiente manera: Definida la presión como la intensidad de la fuerza o bien la fuerza por unidad de área se puede observar en la figura que al ejercer una fuerza sobre el pistón, el fluido es desplazado hacia afuera del recipiente con la misma presión por cualquier orificio.

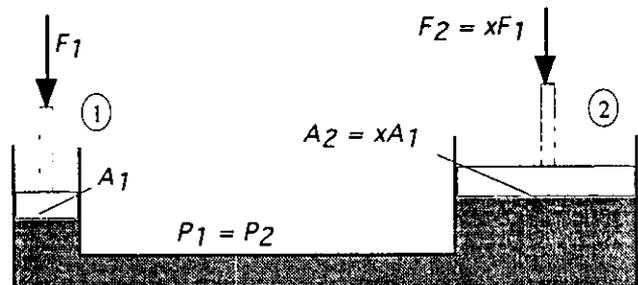


$$P = \frac{F}{A} \quad \dots\dots (2.1)$$

donde:

F	fuerza	[F]
A	área	[L ²]
P	presión	[F L ⁻²]

Otro ejemplo igual de práctico que explica el comportamiento del sistema construido, es el caso de la prensa hidráulica, donde al aplicar una fuerza en un pistón de sección transversal pequeña, se obtiene una fuerza directamente proporcional al área de la sección en el segundo pistón conectado. Como el fluido es incompresible, el pistón transmitirá la presión íntegramente si el sistema está en reposo, esto es, mientras en el pistón 2 no exista fuerza que lo equilibre, el sistema no estará presurizado, entonces el pistón continuará desplazándose indefinidamente al aplicar la fuerza en 1. Lo único que debe suministrarse es volumen del fluido que



ocupará el espacio que el émbolo necesita para alcanzar la distancia al cuerpo que resista o equilibre la fuerza. Esto puede extrapolarse al número de pistones que se conecten en el sistema. Operativamente debe contarse con un depósito de fluido suficientemente grande para que el sistema siempre esté lleno.

Se presenta un resumen* de las memorias de cálculo y los planos que se generaron para integrar el el proyecto ejecutivo.

Las dimensiones seleccionadas son:

Sección rectangular para un gasto de 300 lt/s

Longitud de la sección de trabajo: 18 m

Ancho de plantilla: 0.60 m

Pendiente máxima positiva: 0.0277

Pendiente máxima negativa: 0.0055

*Este resumen se presenta unicamente como ejemplo de cálculo, sin ser para este trabajo de interés particular el análisis estructural.

2.1 Cálculo de la altura de la sección de trabajo del canal y velocidad máxima

Con objeto de determinar la altura de la sección de trabajo y la velocidad máxima que puede presentarse en el canal de pendiente variable, se considera que el flujo es permanente y uniforme.

Con gasto (Q) y pendiente (S) dadas, utilizando métodos iterativos se obtiene el tirante normal (Y_n) en el canal de pendiente variable, resolviendo la siguiente ecuación:

$$A \cdot R^{2/3} = \frac{n \cdot Q}{S^{1/2}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Donde A es el área hidráulica (m^2) de la sección rectangular; R, radio hidráulico (m), y, n es el coeficiente de rugosidad del material propuesto (0.01). El radio hidráulico (R) está dado por la relación A/P, en donde P es el perímetro mojado, que está en función de la relación $b + 2Y_n$, en donde b es ancho del canal (0.60 m) y Y_n es el tirante normal (en m).

Para conocer la velocidad (V) del agua en el canal se utiliza la relación:

$$V = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots(2.3)$$

Donde Q es el gasto manejado en el canal (en m^3/s) y A es el área hidráulica (m^2).

Los valores obtenidos de las iteraciones se muestran en las siguientes tablas, en donde Q es el gasto manejado en el canal (m^3/s); S_c , es la pendiente crítica; Y_c , es el tirante crítico (m); h, es la diferencia de alturas con respecto a la horizontal en el extremo de salida del agua del canal (m); S, es la pendiente deseada en el canal (adimensional); y Y_n , es el tirante normal (m).

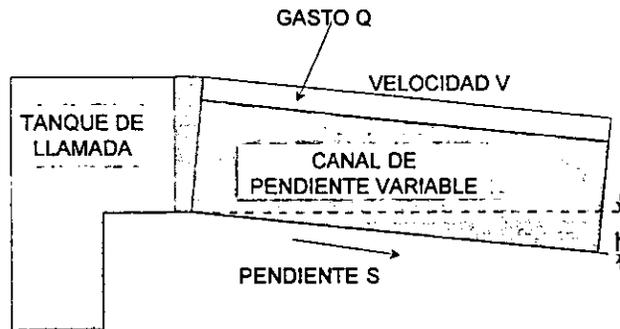
La relación que permite conocer el valor del tirante crítico Y_c es:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

La relación que permite conocer el valor de la pendiente crítica S_c es:

$$S_c = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot R^{2/3}} \right)^2 \dots\dots\dots(2.5)$$



Efectuando los cálculos respectivos para diferentes gastos, se elaboran las siguientes tablas, donde se varía la pendiente hasta alcanzar el valor de la pendiente máxima positiva que se propuso. Se obtiene el tirante normal y la velocidad.

$$Q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_c = 0.0037 \rightarrow Y_c = 0.2942 \text{ m}$$

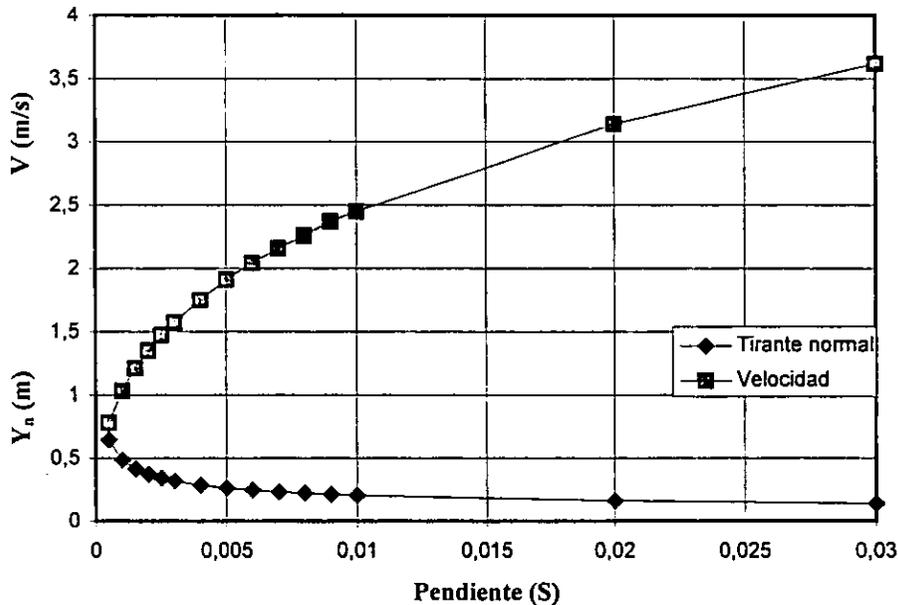
$$h = 0.0666 \text{ m} = 6.7 \text{ cm}$$

h (m)	S	Y_n (m)	V (m/s)
0.009	0.0005	0.645	0.78
0.018	0.0010	0.486	1.03
0.027	0.0015	0.414	1.21
0.036	0.0020	0.370	1.35
0.045	0.0025	0.340	1.47
0.054	0.0030	0.318	1.57
0.072	0.0040	0.285	1.75
0.090	0.0050	0.262	1.91

h (m)	S	Y_n (m)	V (m/s)
0.108	0.0060	0.245	2.04
0.126	0.0070	0.232	2.16
0.144	0.0080	0.221	2.26
0.162	0.0090	0.211	2.37
0.180	0.0100	0.204	2.45
0.360	0.0200	0.159	3.14
0.540	0.0300	0.138	3.62

Esta última tabla se graficó para observar la variación del tirante normal y de la velocidad para el gasto máximo propuesto para diseño y la variación de la pendiente de la plantilla del canal (gráfica 2.1).

Gráfica 2.1 Y_n -S-V. Para un gasto de 300 lt/s



Los resultados obtenidos en la tabla anterior ejemplifican el comportamiento de los tirantes y velocidades para el gasto propuesto. Para una pendiente de 0.0005 que equivale a bajar el canal en un extremo casi 1cm, el tirante normal es de 0.645m y la velocidad es de 0.78 m/s para $Q = 300$ lt/s, obviamente para pendientes mas grande el tirante tiende a disminuir aumentando la velocidad. Entonces considerando ésta condición, se propone una altura de 0.70m para la sección de trabajo.

Se obtendrá en el canal una velocidad superior a los 3.5 m/seg con la máxima pendiente positiva empleando un gasto de 300 lt/s.

2.1.1. Cálculo de perfiles de flujo.

Frecuentemente, para el diseño de un canal, es empleado el valor calculado del tirante normal (Y_n), sin embargo, para el diseño del canal de pendiente variable es conveniente revisar el perfil de flujo que puede presentarse bajo diferentes condiciones de trabajo. Se revisará la condición de no sobrepasar la altura de la sección propuesta (0.70m).

Empleando el paquete de programas IMTA, Programa HIDRAC versión 2.0*, se determinarán los perfiles, sujetos a las siguientes condiciones.

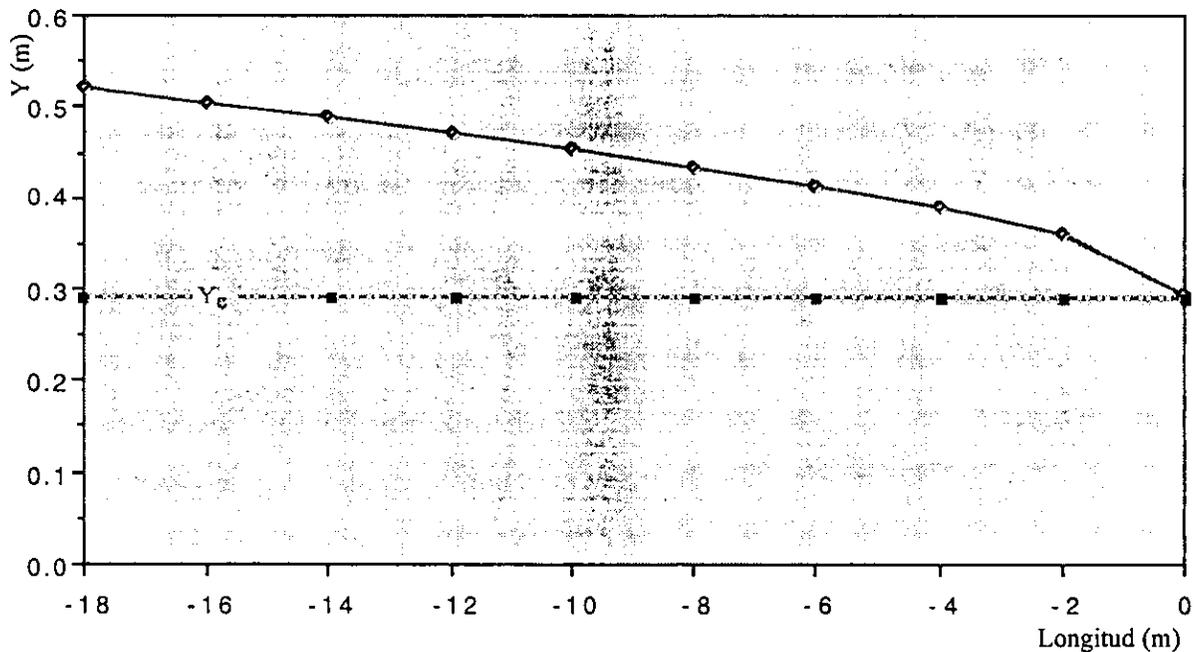
a) Perfil para gasto máximo y máxima pendiente adversa con descarga libre.

$Q = 0.300 \text{ m}^3/\text{s}$ $Y_c = 0.2942 \text{ m}$
 $b = 0.6 \text{ m}$ $Sc = 0.00366$
 $n = 0.01$
 $S = -0.00555$

Se obtiene un perfil de tipo **A2**

Para $X = -30\text{m}$ $Y = 0.61\text{m}$

X	Y
0	0.2942
-2	0.3600
-4	0.3890
-6	0.4130
-8	0.4340
-10	0.4530
-12	0.4710
-14	0.4880
-16	0.5040
-18	0.5200



* Dr. P. Martínez A., Dr. F. Arreguín C., **PROGRAMA HIDRAC VERS. 2**, Hidráulica de Canales, Paquete de Programas I.M.T.A. - D.E.P.F.I. U.N.A.M., México, febrero de 1989.

b) Perfil para pendiente nula, gasto máximo y descarga libre al final del canal.

$Q = 0.300 \text{ m}^3/\text{s}$

$Y_c = 0.2942\text{m}$

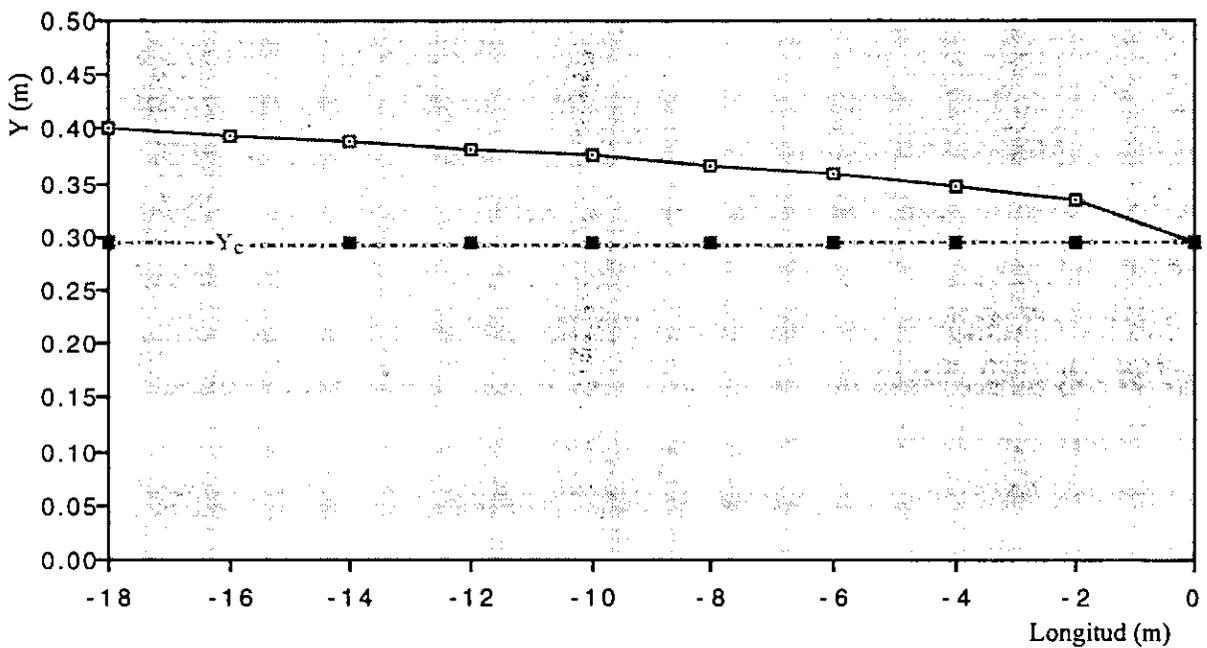
$b = 0.6 \text{ m}$

$Sc = 0.00366$

$n = 0.01$

$S = 0.00$

X	Y
0	0.2942
-2	0.3350
-4	0.3470
-6	0.3580
-8	0.3670
-10	0.3750
-12	0.3820
-14	0.3880
-16	0.3940
-18	0.4000



Se obtiene un perfil **tipo H2**

Para $X = -30\text{m}$ $Y = 0.43\text{m}$

c) Perfil de flujo para gasto máximo, pendiente suave y descarga libre a la salida del canal.

$Q = 0.300 \text{ m}^3/\text{s}$

$Y_c = 0.2942 \text{ m}$

$b = 0.6 \text{ m}$

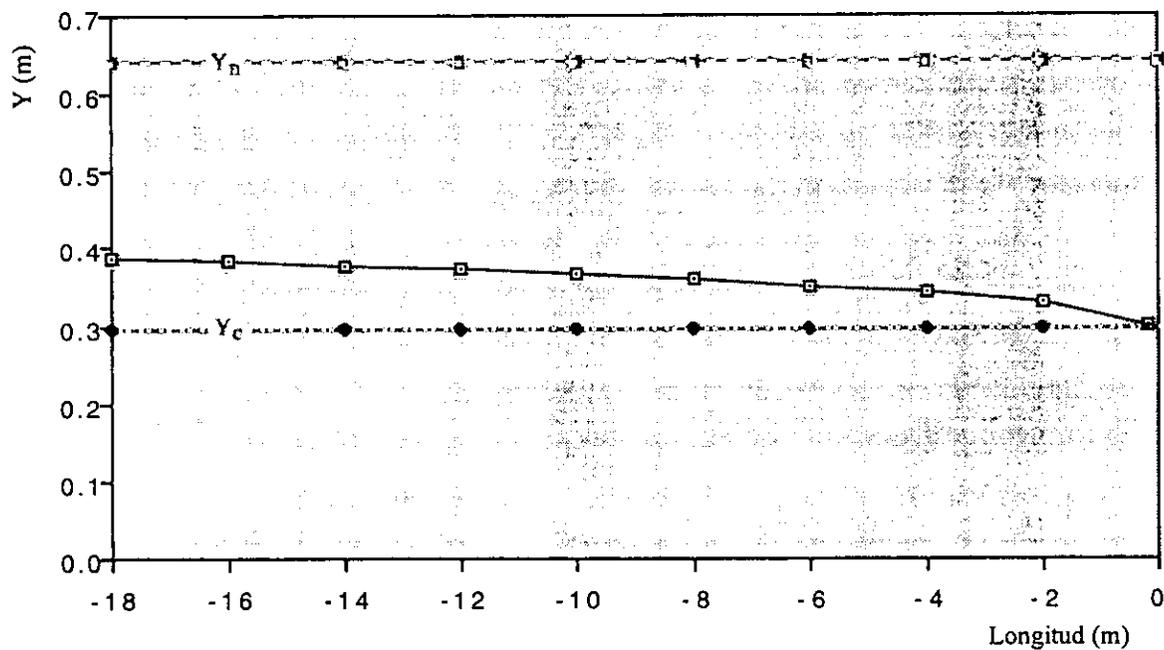
$Sc = 0.00366$

$n = 0.01$

$Y_n = 0.6438$

$S = 0.0005$

X	Y
0	0.2942
-2	0.3293
-4	0.6421
-6	0.3517
-8	0.3597
-10	0.3665
-12	0.3726
-14	0.3782
-16	0.3832
-18	0.3879



El perfil obtenido es del tipo **M2**

La longitud del canal no es suficiente para que el tirante alcance el nivel del tirante normal.

d) Perfil con compuerta funcionando como vertedor a una elevación de $H = 0.2058\text{m}$ sobre la plantilla del canal, gasto máximo y pendiente suave.

$$Q = 0.300 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$b = 0.6 \text{ m}$$

$$n = 0.01$$

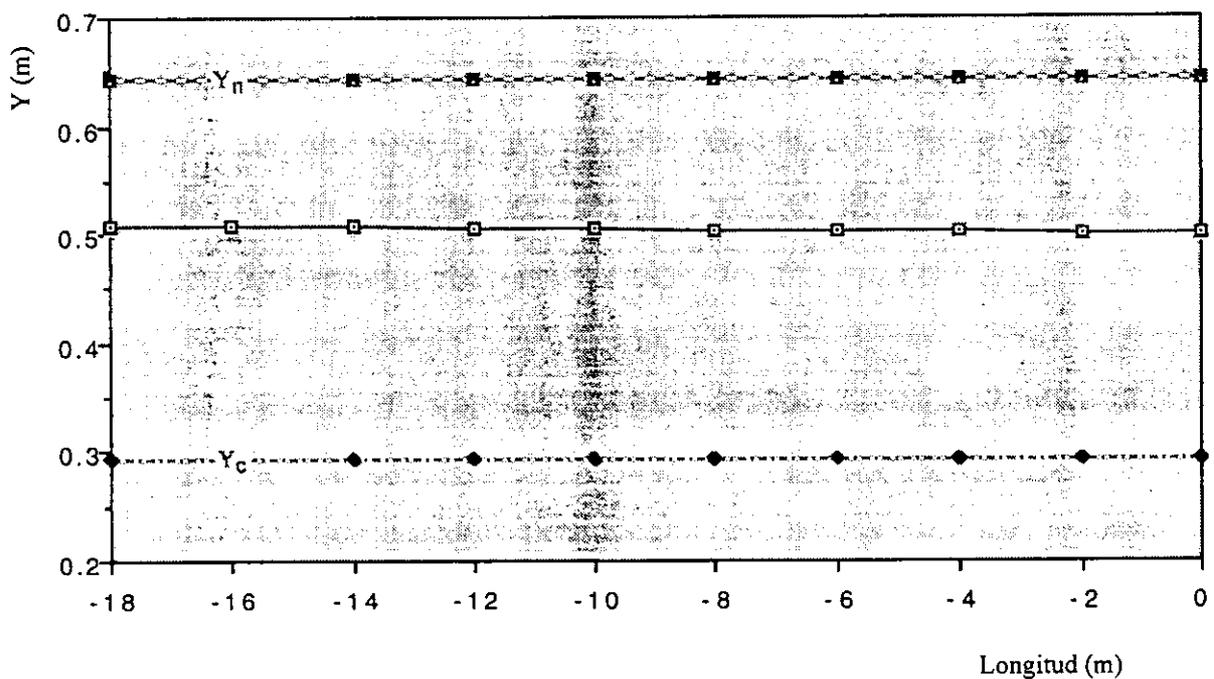
$$S = 0.0005$$

$$Y_c = 0.2942 \text{ m}$$

$$S_c = 0.00366$$

$$Y_n = 0.6438 \text{ m}$$

X	Y
0	0.500
-2	0.501
-4	0.502
-6	0.503
-8	0.504
-10	0.505
-12	0.506
-14	0.507
-16	0.508
-18	0.509



Se obtiene un perfil de **tipo M2**.

La longitud del canal no permite que el tirante se aproxime al tirante normal calculado.

e) Perfil con compuerta funcionando como vertedor a una elevación de $H = 0.3058$ m sobre la plantilla del canal, gasto máximo y pendiente suave.

$Q = 0.300 \text{ m}^3/\text{s}$

$Y_c = 0.2942 \text{ m}$

$b = 0.6 \text{ m}$

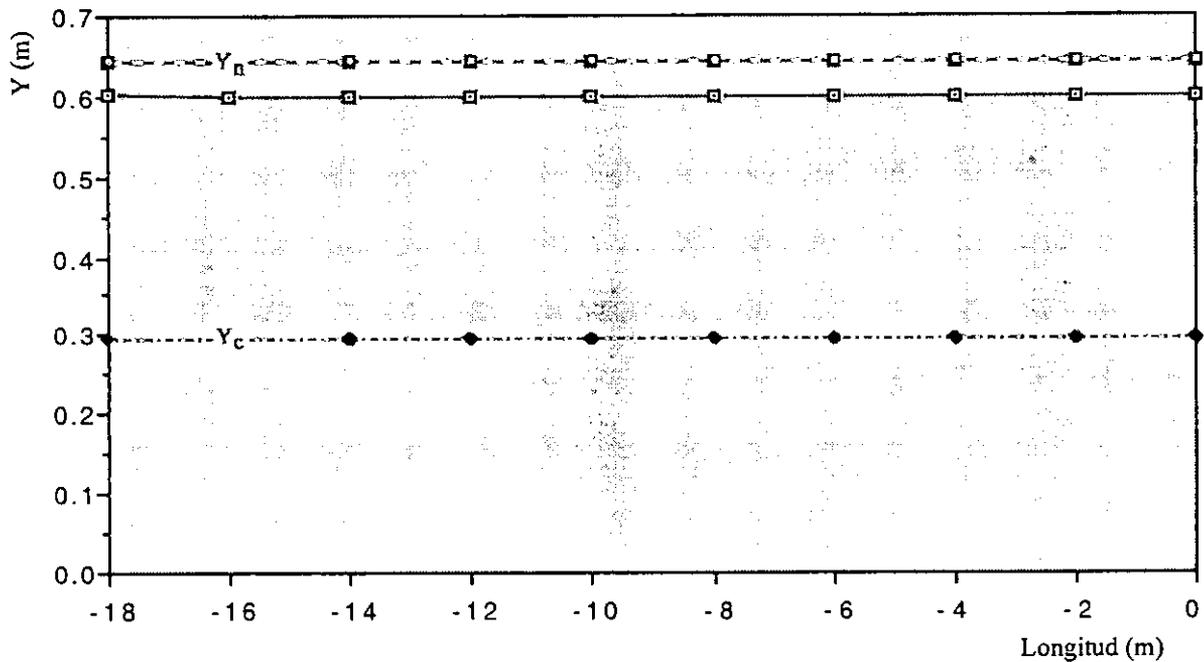
$Sc = 0.00366$

$n = 0.01$

$Y_n = 0.6438 \text{ m}$

$S = 0.0005$

X	Y
0	0.600
-2	0.600
-4	0.600
-6	0.600
-8	0.600
-10	0.601
-12	0.601
-14	0.601
-16	0.601
-18	0.602



El perfil obtenido es del tipo **M2**.

Con la compuerta como vertedor de cresta angosta a la elevación 0.3028m sobre la plantilla del canal se presenta un perfil que se aproxima más al nivel del tirante normal en la sección de trabajo.

El flujo no desbordaría la sección de trabajo.

f) Perfil para gasto máximo, pendiente máxima positiva y descarga libre al final del canal.

$$Q = 0.300 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$b = 0.6 \text{ m}$$

$$n = 0.01$$

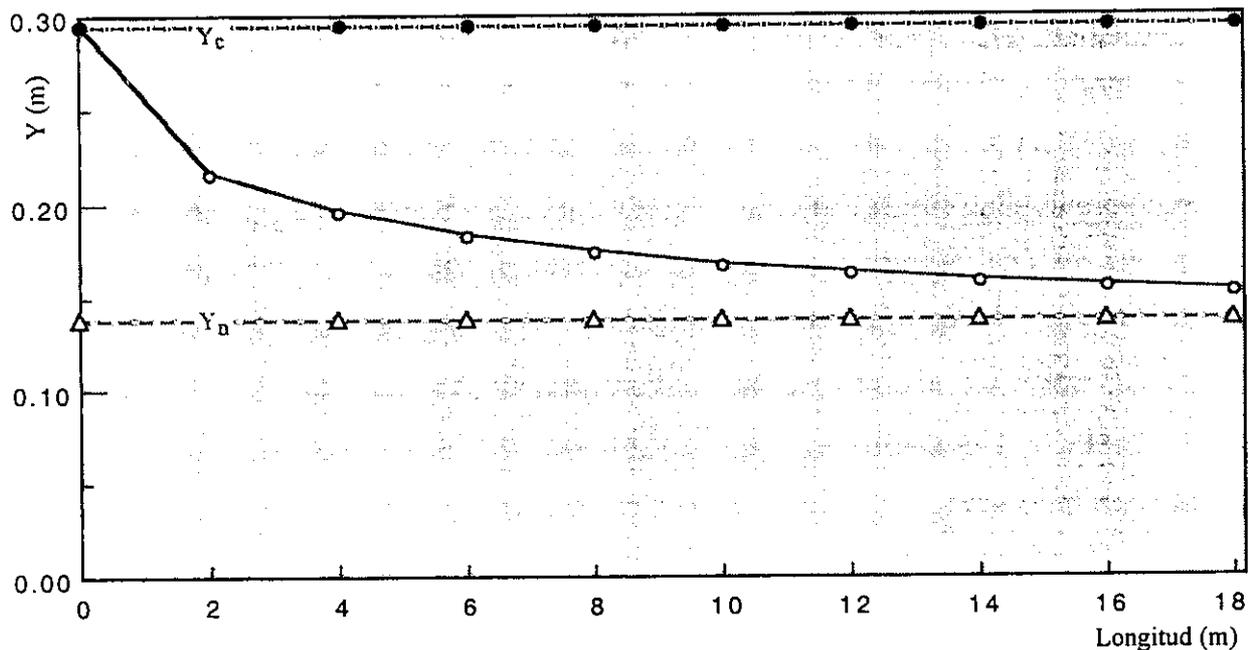
$$S = 0.03$$

$$Y_c = 0.2942 \text{ m}$$

$$S_c = 0.00366$$

$$Y_n = 0.1388 \text{ m}$$

X	Y
0	0.2942
2	0.2163
4	0.1955
6	0.1828
8	0.1740
10	0.1675
12	0.1624
14	0.1584
16	0.1553
18	0.1527



El perfil obtenido es del **tipo S2**, el tirante se aproxima al tirante normal para una longitud mayor de 30m.

Las condiciones en que la superficie libre del agua se aproxima al nivel considerado como máximo, se presentan cuando la pendiente es la máxima adversa con descarga libre y cuando la pendiente es suave y la compuerta aguas abajo controla el nivel en la posición propuesta de $H = 0.3058$ m. Entonces, la altura propuesta para la sección de trabajo se acepta.

2.2 Cálculo del canal Rehbock (Tanque de Salida)

Para el cálculo del canal Rehbock se utiliza la siguiente fórmula, que corresponde a la de un vertedor rectangular sin contracciones laterales:

$$Q = 2.95 \cdot \mu \cdot b \cdot h^{1.5} \dots\dots\dots(2.6)^1$$

Donde Q es el gasto del canal Rehbock (m³/s); b, es el ancho del canal Rehbock (m); h, es la carga hidráulica sobre la placa vertedora (m); y μ , es un coeficiente dependiente del valor de h y de la altura de la placa vertedora (W, en m), encontrado mediante la siguiente fórmula:

$$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{W} \right) \right] \left[\left(1 + \frac{0.0011}{h} \right)^{1.5} \right] \dots\dots\dots(2.7)$$

Suponiendo valores de W, h y b para encontrar el valor del caudal máximo Q (de la ecuación anterior), así como la longitud mínima del canal Rehbock (L_{\min} , en m), sabiendo que los valores de h, b y W tienen que cumplir con las siguientes condiciones:

$$0.01 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$$

$$0.30 \text{ m} \leq b$$

$$0.06 \text{ m} \leq W$$

se obtuvo la siguiente tabla de resultados en donde W y h se variaban y b se mantuvo constante, proponiéndose un ancho de canal de un metro, treinta centímetros.

¹Las ecuaciones 2.6 y 2.7 se tomaron de: Sotelo Avila Gilberto, Hidráulica General, Vol.1, Editorial LIMUSA, México, 1985

W (propuesto)	h (propuesto)	Q	$\frac{h}{W} \leq 1$	h + W (altura mínima)	$L_{\min} \geq 4h$
0.50	0.30	0.318	0.60	0.80	1.20
0.40	0.30	0.324	0.75	0.70	1.20
0.30	0.30	0.334	1.00	0.60	1.20
0.25	0.25	0.255	1.00	0.50	1.00
0.28	0.28	0.301	1.00	0.56	1.12

∴ las dimensiones que tendrá el canal Rehbock son:

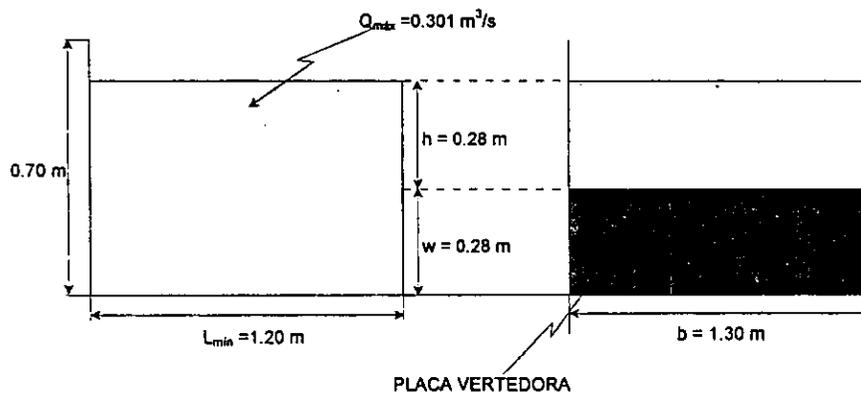
$$W = 0.28 \text{ m}$$

$$h = 0.28 \text{ m}$$

$$Q_{\max} = 0.301 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_{\min} = 1.12 \approx 1.20 \text{ m}$$

En la siguiente figura se muestran las dimensiones del canal Rehbock.



Para recibir el caudal del canal de pendiente variable, se aumentará la longitud del tanque de salida, ya que es necesario disipar la turbulencia del agua antes de que pase por la cresta del vertedor.

La distancia que alcanza la caída del agua al salir del canal de pendiente variable y entrar al tanque de salida puede ser calculada mediante la ecuación que define la trayectoria de un tiro parabólico.

$$Y = -\frac{1}{2}g \frac{X^2}{V^2 \cos^2 \theta} + x \operatorname{tg} \theta \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{h}{L}\right) = \frac{0.5}{18} = 1.59175 \dots\dots\dots(2.9)$$

En donde Y es la distancia vertical (eje y, en m) medida desde el punto de salida del agua hasta el piso (negativa); g, la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²); X, distancia horizontal (eje x, en m) medida desde el punto de salida del agua hasta el punto en que toca el piso; V, la velocidad de salida del agua (en m/s).

$$-y = 1.20 - 0.5 \quad V = 3.62 \quad L = 18 \text{ m} \quad h = 0.50 \text{ m}$$

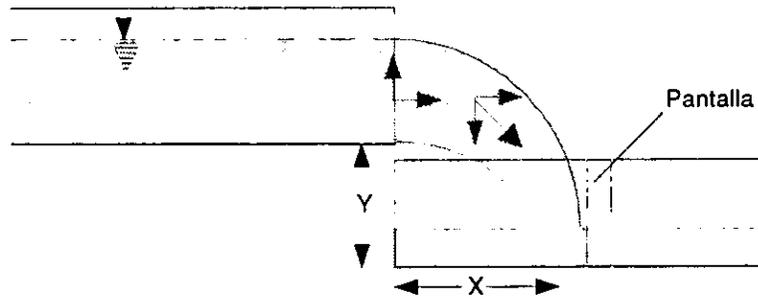
$$-0.7 = -\frac{1}{2}(9.81) \frac{X^2}{(3.62)^2 \cos^2(1.59175)} + x \operatorname{tg}(1.59175)$$

$$-0.375x^2 + 0.0278x + 0.7 = 0$$

Resolviendo, se tiene:

$$x_1 = -1.33$$

$$x_2 = 1.40$$



Longitud mínima del tanque es $1.40 + 1.20 = 2.60\text{m}$

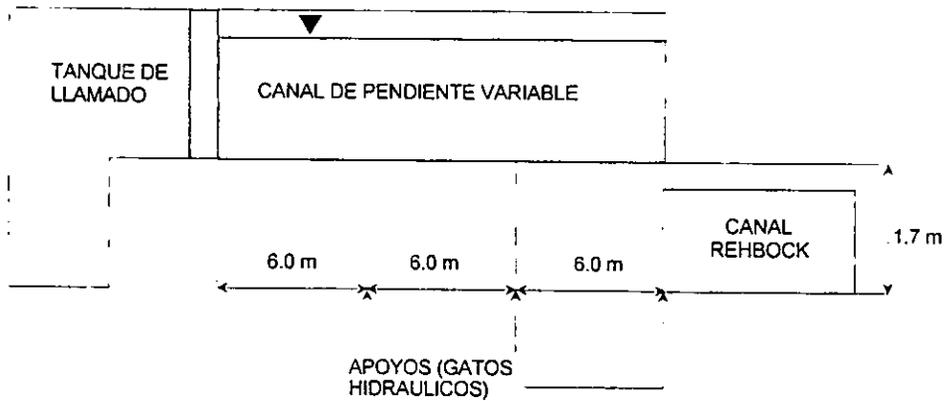
Incluyendo una sección mínima para tranquilizadores de $= 0.70\text{m}$ se tiene:

$$2.60 + 0.70 = 3.30\text{m}$$

La longitud total del tanque de salida es de 3.30m .

2.3 Diseño estructural

2.3.1 Análisis de cargas de diseño



Considerándose las cargas actuantes por metro lineal de canal, la carga (W_t) para una sección de $h = 0.7$ m y $b = 0.6$ m es:

Concepto	Relación de carga: $W = \gamma \cdot \frac{V}{(1m)}$	Carga	
		kg/m	N/m*
$W_{\text{agua}} =$	$1,000 \left(\frac{(0.7)(0.6)(1.0)}{(1)} \right)$	420.00	4118.793
$W_{\text{vidrio}} =$	$2,500 \left(\frac{(0.7)(0.009)(1.0)}{(1)} \right) (2 \text{ unidades})$	31.50	308.91
$W_{\text{acrílico}} =$	$1,200 \left(\frac{(0.009)(0.6)(1.0)}{(1)} \right)$	6.50	63.743
$W_{\text{estructura}} =$	estimada	85.00	833.565
$W_t =$		543.00	5325.011

* Se empleara Newton N como unidad de fuerza, de acuerdo a los estándares del Sistema Internacional de Unidades (SI), siendo $1 \text{ kg}_f = 9.80665 \text{ N}$. Tomado de R W MILLER, *Flow measurement engineering handbook*, Second Edition, Mc Graw Hill Co. USA, 1989.

Donde γ es el peso específico del material (kg/m^3), y V , es el volumen del material (m^3).

Al ser la carga (W_t) transmitida a dos vigas, se tiene que:

$$\therefore \frac{W_t}{2} = \frac{5325.011}{2} = 2662.5055 \text{ N / m} \dots\dots\dots(2.10)$$

Agregando al peso propio de la viga del bastidor, el peso de la estructura de los módulos (539.3657 N/m), tenemos:

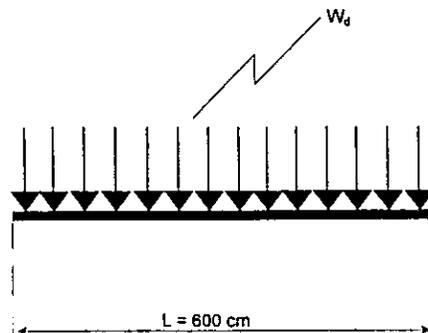
$$\begin{array}{r} 2662.5055 \text{ N/m} \\ \underline{539.3657 \text{ N/m}} \\ 3201.8712 \text{ N/m} \end{array}$$

por lo tanto, la carga de diseño para el bastidor (W_d) es:

$$W_d = 3201.8712(1.40) = 4482.6197 \text{ N / m} = 44.8262 \text{ N / cm}$$

El factor 1.40 utilizado en la ecuación anterior es el llamado factor de carga, según especificaciones de la construcción en acero.

2.3.2 Cálculo estructural del bastidor que soportará la sección de trabajo



El momento actuante (M) es:

$$M = \frac{W_d \cdot L^2}{8} = \frac{44.8262(600)^2}{8} = 2,017,179 \text{ N} \cdot \text{cm} \dots\dots\dots(2.11)$$

Donde L es el claro que tendrá la viga entre un apoyo y otro (cm).

Para evitar flambéo (deformaciones laterales) en las vigas del bastidor, este debe ser arriostrado¹. Bajo esta condición, la fatiga admisible a flexión² (F_b) para la viga del bastidor, de acuerdo a las condiciones de carga es:

$$F_b = 14,886.495 \text{ N} / \text{cm}^2$$

Con el valor del momento actuante (M) y el de la fatiga admisible a flexión (F_b), encontramos el módulo de sección (S) en el eje de trabajo de la viga:

$$S = \frac{M}{F_b} = \frac{2017179}{14886.495} = 135.504 \text{ cm}^3 \dots\dots\dots(2.12)$$

Si se elige una viga con este módulo de sección (S), la flecha máxima (Δ_{máx}) obtenida sería de:

$$\Delta_{max} = \frac{5 \cdot W_d \cdot L^4}{384(1.40)E \cdot I_x} = \frac{5(44.8262)(600)^4}{384(1.40)(203.4 \times 10^5)(887)} = 3.00 \text{ cm} \dots\dots\dots(2.13)$$

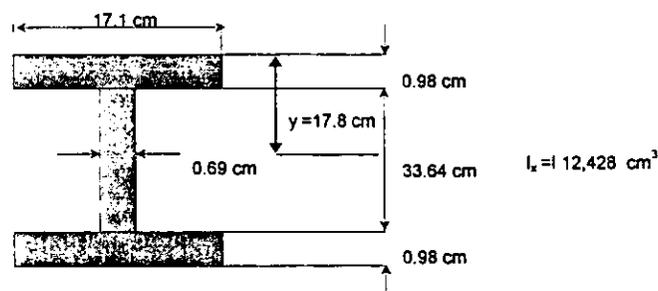
Donde E es el módulo de elasticidad del acero (N/cm²); I_x, es el momento de inercia en el eje de trabajo de viga seleccionada (cm⁴), y L, es el claro de la viga (cm).

¹ Véase Instituto Mexicano de la Construcción en Acero A.C., Manual de Construcción en Acero, Editorial LIMUSA, México 1987.

² Cuando una viga es arriostrada en sus extremos o cuando el patín de compresión de ésta es arriostrado en toda su longitud, se usa el valor máximo. Véase Altos Hornos de México S.A., Manual de Construcción en Acero.

Al tener una flecha de 3 cm, lo cual se considera un valor grande para las condiciones de trabajo, es necesario elegir otra viga con un módulo de sección (S) mayor y por consiguiente un momento de inercia (I_x) en el eje de trabajo mayor, con lo cual se podrá reducir la flecha a un valor más cercano a cero.

En base a una serie de iteraciones realizadas con varias secciones de vigas, se concluye que la más aceptable es la siguiente:



La flecha máxima ($\Delta_{m\acute{a}x}$) obtenida con la viga propuesta es la siguiente:

$$\Delta_{max} = \frac{5 \cdot W_d \cdot L^4}{384(1.40)E \cdot I_x} = \frac{5(44.8262)(600)^4}{384(1.40)(203.4 \times 10^5)(12,428)} = 0.21 \text{ cm}$$

Al tener una flecha aproximada a 2 milímetros la sección de la viga se acepta.

El módulo de sección (S) de esta viga está dado por:

$$S = \frac{I_x}{y} = \frac{12,428}{17.8} = 698.20 \text{ cm}^3 \dots\dots\dots(2.14)$$

donde y es el centroide de sección de la viga (en cm).

En base al módulo de sección (S) de esta viga y de la fatiga admisible a flexión (F_b) para el acero, el momento resistente (M_{Res}) que soportará el bastidor será:

$$M_{Res} = S \cdot F_b = 698.20(14886.495) = 10393751 N \cdot cm \dots\dots\dots(2.15)$$

$$10393751 N \cdot cm \gg 2029976.6 N \cdot cm$$

Por lo tanto, se acepta la viga IR de 14" x 6^{3/4}".

2.3.3 Cálculo estructural de arriostramientos del bastidor

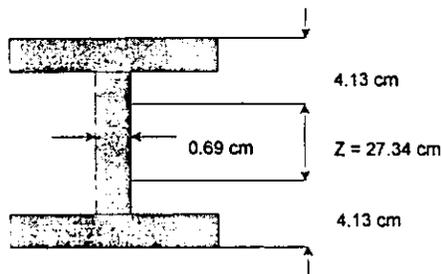
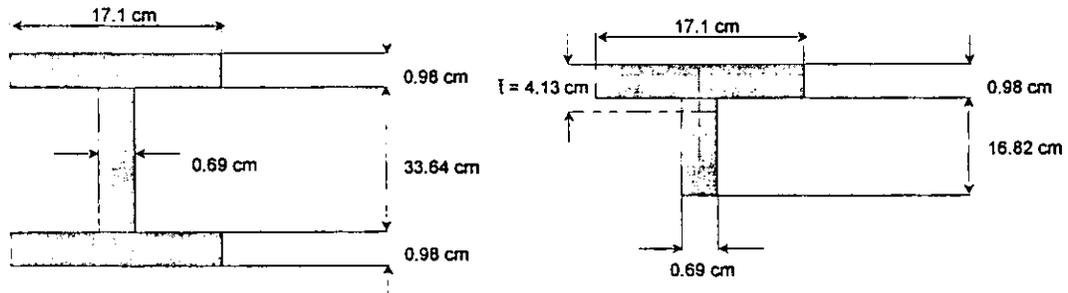
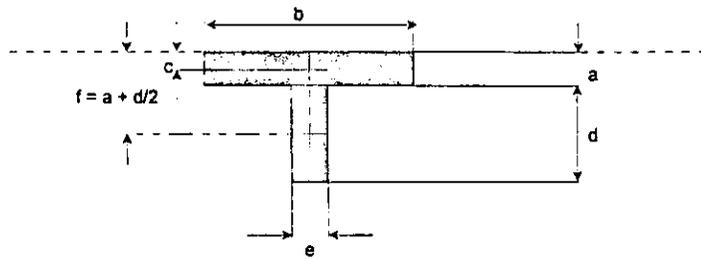
En base al centroide del bloque de compresión y tensión (\bar{t}) de las vigas del bastidor, la sumatoria de momento ($\sum M_{\infty}$) es:

$$\sum M_{\infty} = (a \cdot b \cdot c) + (d \cdot e \cdot f) - [(b \cdot a) + (d \cdot e)] \left(\frac{\bar{t}}{t} \right) = 0 \dots\dots\dots(2.16)$$

$$[(0.98)(17.1)(0.49)] + [(16.82)(0.69)(9.39)] - [(17.1)(0.98) + (16.82)(0.69)] \left(\frac{\bar{t}}{t} \right) = 0$$

$$8.21 + 108.98 - 28.36 \left(\frac{\bar{t}}{t} \right) = 0$$

$$\frac{\bar{t}}{t} = \frac{117.19}{28.36} = 4.13 \text{ cm}$$



La fuerza de compresión (C) en las vigas, en base al momento resistente obtenido (M_{Res}) y a la distancia entre centroides (Z) del bloque de compresión y tensión, es:

$$C = \frac{M_{Res}}{Z} = \frac{10393751}{27.34} = 380166.46 \text{ N} \dots\dots\dots(2.17)$$

Sabiendo que el 15% de la compresión (C) es absorbida por los arriostramientos³, se tiene:

$$C = 0.15 (380166.46) = 57024.97 \text{ N}$$

La separación (L) entre vigas es 47 cm. Proponiendo el uso de un perfil OR de 51 mm x 51 mm x 4.8 mm de espesor, para el cual su radio de giro (r) es 1.88 cm y su área de la sección transversal (A) es 6.97 cm² y usando el coeficiente de la relación de esbeltez⁴ (K) de valor 1, la relación de esbeltez se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{K \cdot L}{r} = \frac{(1)(47)}{1.88} = 25 \dots\dots\dots(2.18)$$

Con el valor de la relación de esbeltez, encontramos en tablas de fabricantes el valor de la fatiga admisible a compresión (F_a) para el perfil usado en los arriostramientos, el cual es:

$$F_a = 14003.896 \text{ N / cm}^2$$

Con este valor, obtenemos la capacidad de la pieza:

$$\text{Capacidad de la pieza} = F_a \cdot A = 14003.896(6.97) = 97607.155 \text{ N}$$

Donde A es el área de la sección transversal del perfil (cm²).

Comparando la capacidad de la pieza con el esfuerzo de compresión en los arriostramientos, tenemos:

$$97607.155 \text{ N} > 57024.97 \text{ N}$$

³ Véase McCormack, Jack, Análisis estructural (México, D.F.).

⁴ Generalmente el valor del coeficiente de la relación de Esbeltez (K) se toma igual a 1, excepto en condiciones especiales de trabajo. Véase McCormack, Jack, Análisis Estructural (México, D.F.).

por lo tanto, se acepta el perfil OR propuesto.

2.3.4 Cálculo de los elementos de los módulos de la sección de trabajo

Elementos horizontales

Teniendo la carga actuante total (W_t) y sabiendo que dicha carga será transmitida a dos extremos, la carga en uno de ellos es:

$$\frac{W_t}{2} = \frac{5325.011}{2} = 2662.5055 \text{ N / m}$$

Afectando esta carga por el factor de seguridad (1.40), según especificaciones de la construcción en acero, la carga de diseño (W_d) para los elementos del módulo es:

$$W_d = 2662.5055(1.4) = 3727.507 \text{ N / m}$$

Al estar los módulos unidos entre sí, se considera que estos están apoyado-empotrados, por lo tanto el momento actuante (M) es:

$$M = \frac{W_d \cdot L^2}{10} = \frac{3727.507(2)^2}{10} = 1491.0028 \text{ N} \cdot \text{m} = 149100.28 \text{ N} \cdot \text{cm} \dots\dots\dots(2.19)$$

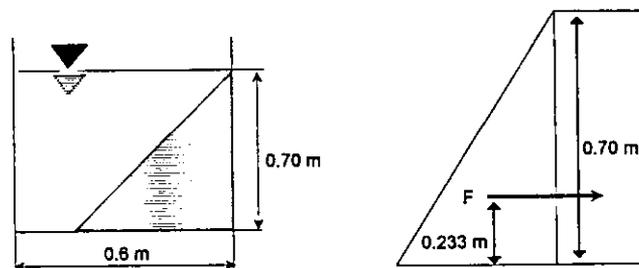
Donde L es la longitud de cada módulo (m).

Con el valor del momento actuante (M) y el valor de fatiga admisible a flexión (F_b) para este perfil de acuerdo a las condiciones de carga, se obtiene el módulo de sección (S) que tendrá el perfil de los módulos:

$$S = \frac{M}{F_b} = \frac{149100.28}{14886.495} = 10 \text{ cm}^3 \dots\dots\dots(2.20)$$

Consultando tablas de fabricantes de perfiles tubulares, se encuentra que el perfil que cumple estas características es el perfil OR de 51 mm x 51 mm x 4.8 mm; su módulo de sección (S) es 10.95 cm^3 , que es mayor al valor de 10 cm^3 que fue calculado.

Elementos verticales



El empuje hidrostático (F) sobre la pared del canal es:

$$P = \gamma \cdot b \cdot h \cdot \frac{h}{2} = \gamma \cdot b \cdot \frac{h^2}{2} \dots\dots\dots(2.21)$$

Donde γ es el peso específico del agua (9806.65 N/m^3); b, es el ancho de la pared considerada (m), y h, la altura del nivel del agua (m).

$$F = 9806.65(1) \left(\frac{(0.70)^2}{2} \right) = 2402.629 \text{ N}$$

El momento actuante (M) en estos elementos, con $W_d = 1.4 (2402.629) = 3363.68$, es:

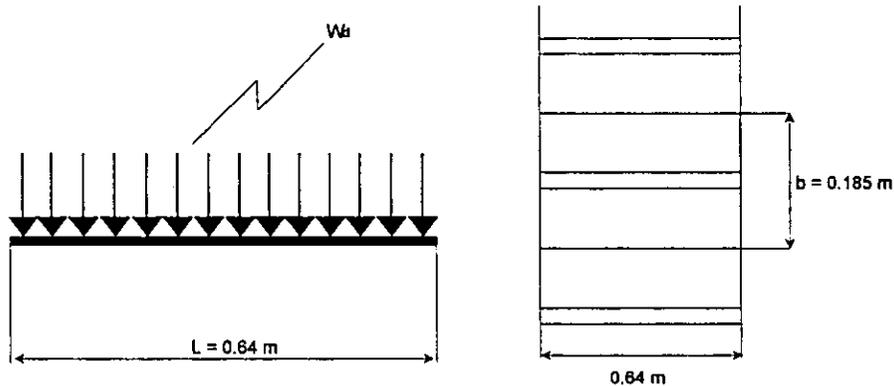
$$M = W_d \cdot \frac{h}{3} = 3363.68 \left(\frac{0.70}{3} \right) = 784.8586 \text{ N} \cdot \text{m} = 78485.86 \text{ N} \cdot \text{cm} \dots \dots \dots (2.22)$$

El momento actuante en los elementos verticales es menor que en los elementos horizontales. Por lo tanto, se usará el mismo perfil (OR de 51 mm x 51 mm x 4.8 mm) para ambos casos.

$$149100.28 \text{ N} \cdot \text{cm} > 78485.86 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Soportes de plantilla

Suponiendo la separación de los soportes de plantilla (b), y sean estos ángulos LI. de 25 mm x 6 mm, de acuerdo a la siguiente figura:



La carga de diseño para estos elementos está basada por el peso de las siguientes cargas:

W_{agua}	= 4118.793 N/m
W_{vidrio}	= 308.909 N/m
$W_{\text{acrílico}}$	= 63.743 N/m
$W_{\text{accesorios}}$	= 25.105 N/m
W_t	= 4516.550 N/m

Por lo tanto, la carga de diseño (W_d) de los soportes de la plantilla está dada por la siguiente relación, la cual está basada de acuerdo al eje de trabajo de los elementos y el área de carga, según los datos de la figura mostrada anteriormente:

$$W_d = \left(\frac{W_t \cdot b}{L} \right) (1.4) = \left(\frac{4516.550(0.185)}{0.64} \right) (1.4) = 1827.79 \text{ N / m} \dots\dots\dots(2.23)$$

Donde b es la separación entre los soportes (m); L , claro de los soportes (m), y el factor 1.40, es el coeficiente de seguridad para la construcción en acero.

El momento actuante (M) resultante es:

$$M = \left(\frac{W_d \cdot L^2}{8} \right) = \left(\frac{1827.79(0.64)^2}{8} \right) = 93.58 \text{ N} \cdot \text{m} = 9358.3 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Donde L es el ancho del canal (m).

El módulo de sección (S) del perfil en función del momento actuante (M) y de su fatiga admisible a flexión (F_b), para este perfil y de acuerdo a las condiciones de carga, es:

$$S = \frac{M}{F_b} = \frac{9358.3}{10137.13} = 0.92 \text{ cm}^3$$

Consultando tablas de fabricantes de perfiles angulares, se tiene que, el ángulo LI de 25 mm x 6 mm a 18.5 cm de distancia entre los elementos, es aceptado.

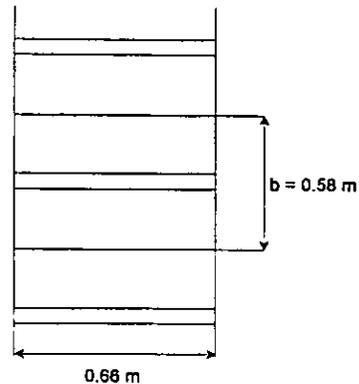
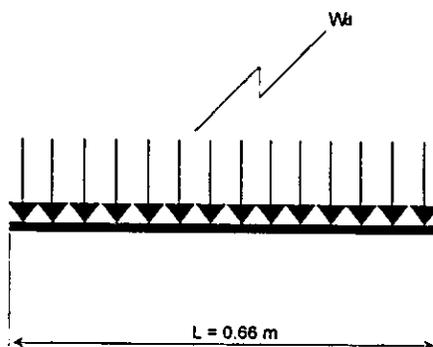
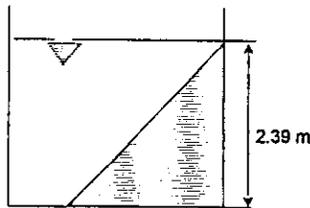
2.4 Cálculo del tanque de llamada

Con base en las condiciones de trabajo del tanque de llamada (mostradas en la figura siguiente), la presión (P) en el fondo del tanque en función del peso específico del agua, y la altura del nivel del agua (h, en m), es la siguiente:

$$P = \gamma \cdot h = 9806.65(2.39) = 23437.894 \text{ N / m}^2 \dots\dots\dots(2.24)$$

El empuje hidrostático (F) en las paredes de dicho tanque, es función del peso específico del agua, la altura del nivel del agua (h, en m), y el ancho de la pared (b, en m) considerada, de tal forma se tiene que:

$$F = \gamma \cdot b \cdot h \cdot \frac{h}{2} = \gamma \cdot b \cdot \frac{h^2}{2} = 9806.65(1) \left(\frac{(2.39)^2}{2} \right) = 28008.28 \text{ N}$$



El área (A), la cual está en función de la distancia propuesta (b) y el claro (L) entre los elementos es:

$$A = L \cdot b = (0.66)(0.58) = 0.3828 \text{ m}^2 \dots\dots\dots(2.25)$$

Así, la carga de diseño (W_d) para los elementos del fondo del tanque en función del área (A) de la presión en el fondo (P) y del peso propio de la estructura por metro (W_t) es:

$$W_d = \left(\frac{A \cdot P}{0.66} + W_t \right) (1.40) = \left(\frac{0.3828(23437.894)}{0.66} + 2706.6354 \right) (1.40) = 22820.86 \text{ N / m}$$

Donde el factor 1.40, es el factor de carga, según especificaciones de la construcción en acero y el denominador 0.66 nos permite medir la carga de diseño por metro lineal.

El momento actuante (M) en este caso es:

$$M = \frac{W_d \cdot L^2}{8} = \frac{22820.86(0.66)^2}{8} = 1242.60 \text{ N} \cdot \text{m} = 124260 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

La separación (L) entre los elementos en el fondo del tanque de llamada es 66 cm. Proponiendo el uso de un perfil OR de 51 mm x 51 mm x 4.8 mm de espesor, para el cual su radio de giro (r) es 1.88 cm y usando el coeficiente de la relación esbeltez (K) de valor 1, la relación de esbeltez para estas condiciones es:

$$\frac{K \cdot L}{r} = \frac{1(66)}{1.88} = 35.10 \dots\dots\dots(2.26)$$

Con el valor de la relación de esbeltez, encontramos en tablas de fabricantes el valor de la fatiga admisible a flexión (F_b) para el perfil usado, el cual es:

$$F_b = 13524.351 \text{ N / cm}^2$$

Con el valor del momento actuante (M), y el valor de la fatiga admisible a flexión (F_b) para este perfil, de acuerdo a las condiciones de carga, obtenemos el módulo de sección (S) que deberá tener el perfil OR a utilizar, el cual es:

$$S = \frac{M}{F_b} = \frac{124260}{13524.351} = 9.18 \text{ cm}^3$$

Al consultar las tablas de los fabricantes de perfiles tubulares, encontramos que el perfil propuesto (OR de 51 mm x 51mm x 4.8 mm de espesor) cumple con los requerimientos, ya que su módulo de sección es 19% superior al necesario, por lo tanto se acepta.

Al utilizar el perfil mencionado, se obtendrá un momento resistente (M_{Res}) igual a:

$$M_{Res} = F_b \cdot S = 13524.351(10.95) = 148091.64 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

El análisis para los elementos de las paredes del tanque no es necesario realizarlo. De acuerdo a las características físicas, al ser la altura del tanque mayor a la anchura (con ello, la presión en el fondo es mayor que en las paredes) y al resistir el perfil OR de 51 mm x 51 mm x 4.8 mm de espesor en el fondo del tanque, por ende resistirá en las paredes.

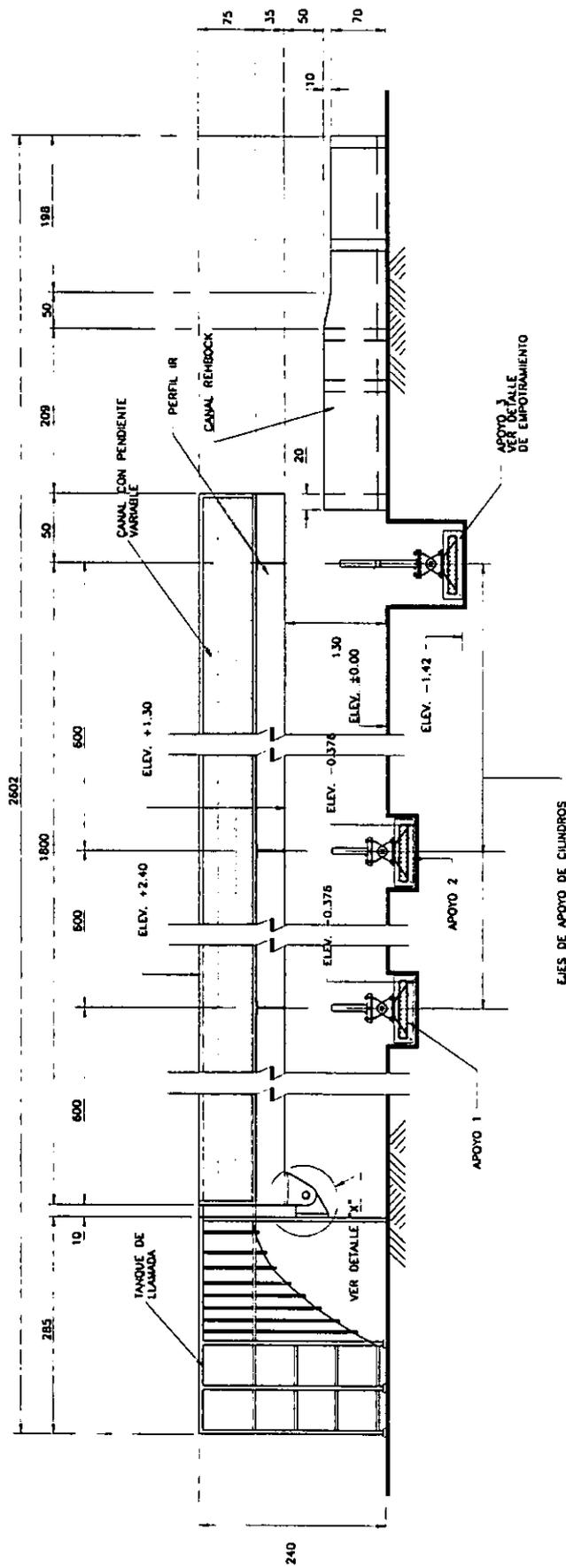
2.5. Integración del proyecto ejecutivo.

De acuerdo a los datos obtenidos del cálculo estructural y del funcionamiento hidráulico, se elaboraron los planos y el catálogo de conceptos con las especificaciones requeridas.

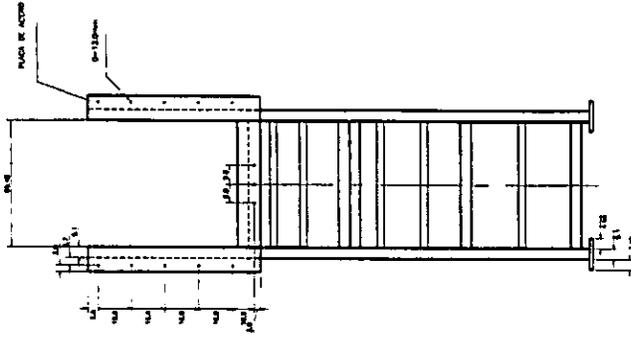
El juego de planos está integrado por los siguientes:

- Elevación general del canal de pendiente variable.
- Canal de llamada, tanque de entrada.
- Planta general del canal de pendiente variable.
- Tanque Rehbock.
- Sección transversal en atezador, detalles constructivos.
- Articulaciones, vista lateral y frontal.
- Detalle unión articulación-zapata.
- Cilindro-articulación-bastidor; isométrico.
- Apoyo para cilindro. Detalle tipo.
- Compuerta-Vertedor de accionamiento motorizado.Cuerpo de la compuerta.
- Marco de la compuerta.
- Compuerta - brida a canal, sistema mecánico.
- Compuerta - brida a canal, sistema mecánico. Detalle 1.
- Compuerta - brida a canal, sistema mecánico. Detalle 2.
- Soporte guía.
- Empotramiento de soportes guía. Detalle.
- Elemento guía. Detalle.
- Montaje y fijado de guía en canal.
- Marco rígido de perfil estructural.

Se anexa también el catálogo de conceptos indicando la descripción de los conceptos, la unidad y la cantidad requerida.



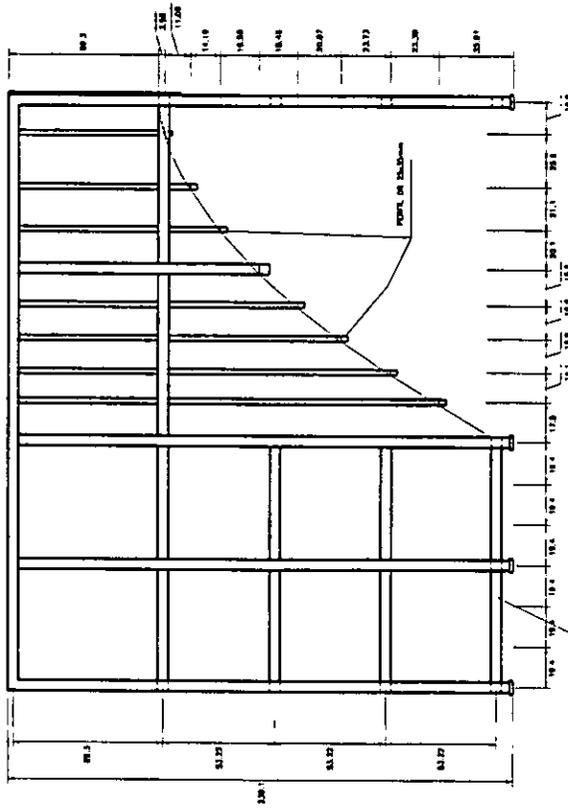
 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
OBRA	CANAL DE PENDIENTE VARIABLE
PLANO	ELEVACION GENERAL
DISEÑO	DRS. RICARDO A. ALVAREZ B.
ELABORADO	J. OCTAVIO DOMINGUEZ M.
ETAPA	ETAPA
FECHA	AGRI 08



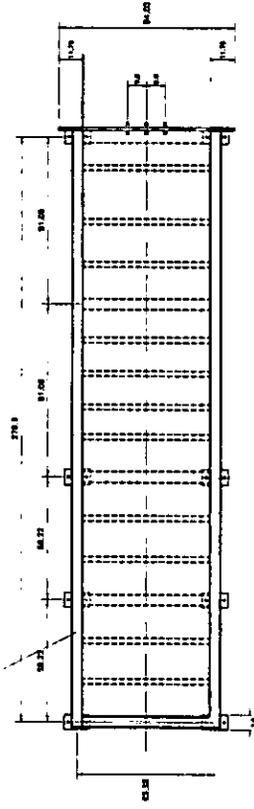
VISTA FRONTAL

NOTA:
LAS PAREDES DEL TANQUE
SE FORMARON SOBRE EL BASTIDOR
DE PERFL. OR. CON LAMINA
GALVANIZADA $\phi = 3/32$

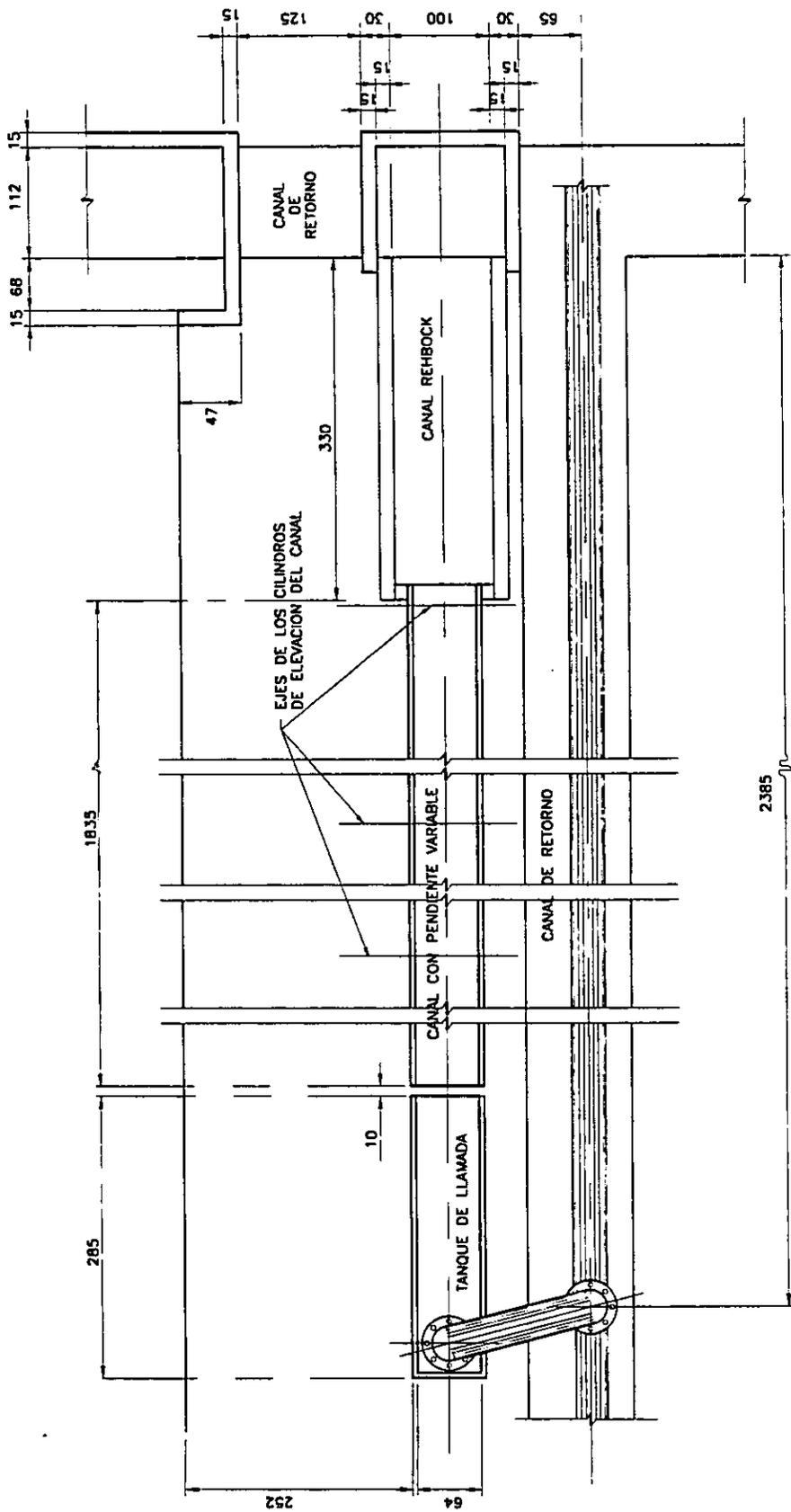
 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
CANAL DE LLAMADA	
ESTADO DGO. RICARDO A. ALVAREZ B.	MUNICIPIO J. GUAYABO
PROYECTISTA J. GUAYABO	ESCALA 1:50



PERFIL

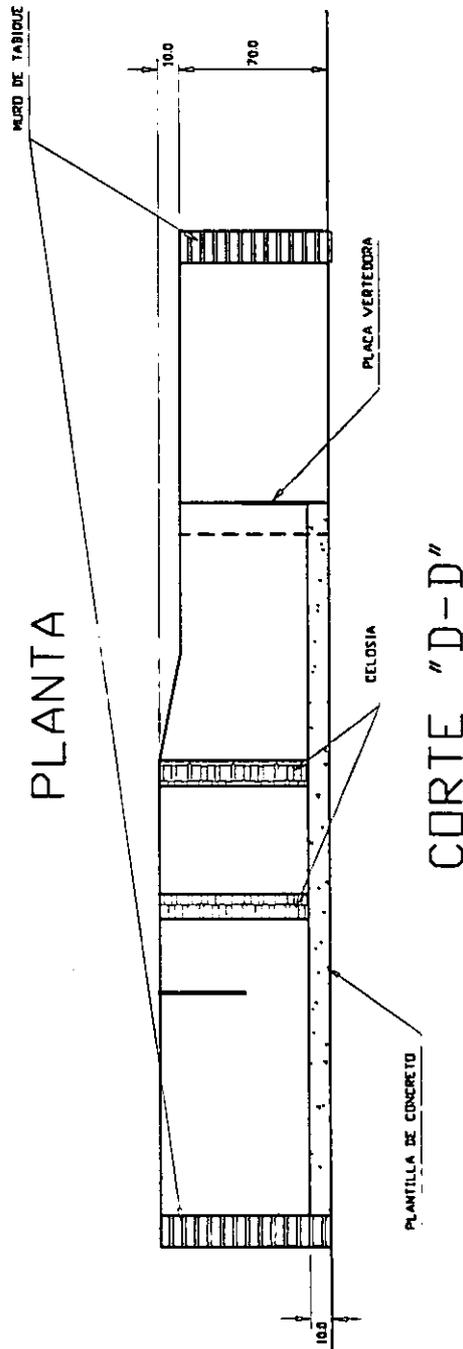
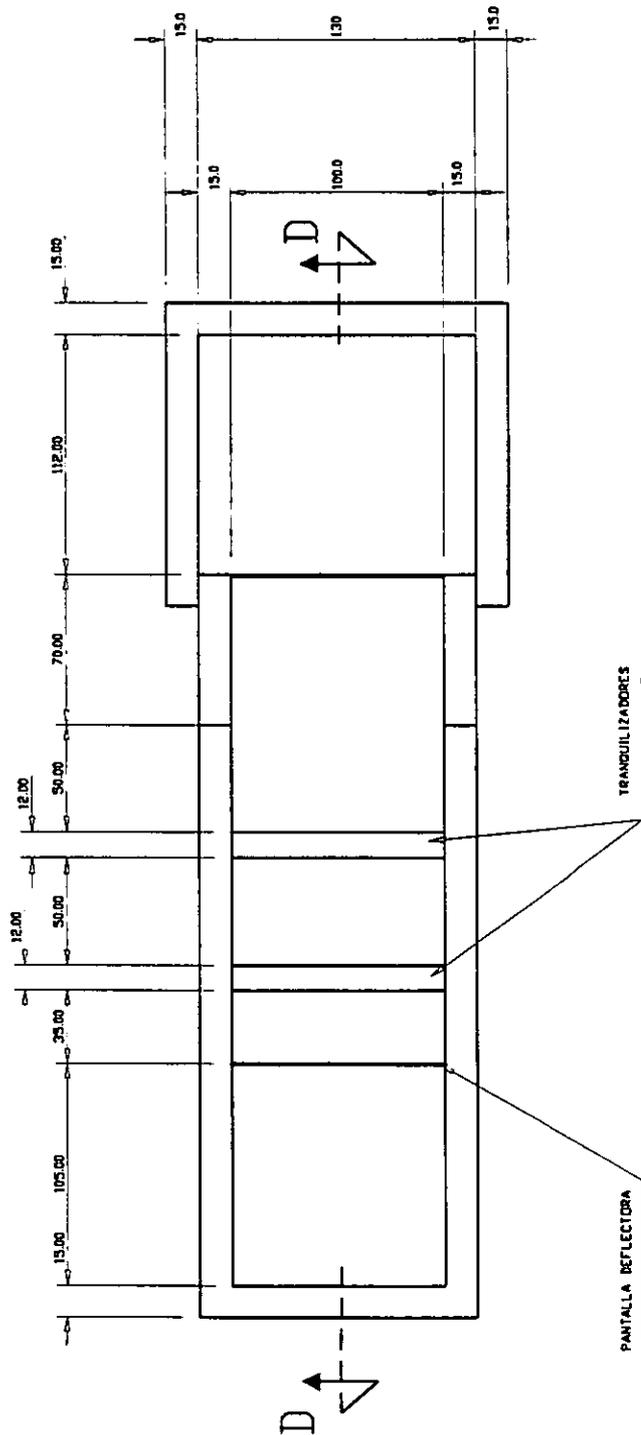


PLANTA



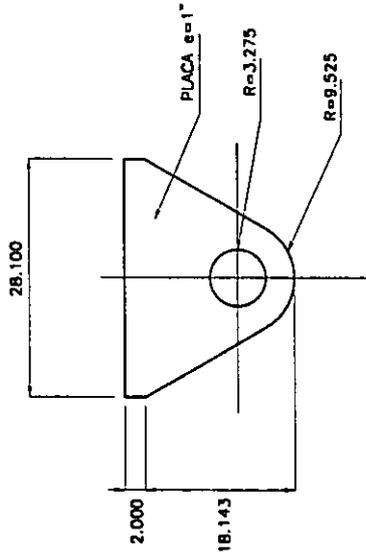
 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANTA GENERAL	
DISEÑO INGEN. RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA
DIBUJO J. DE TAYO DOMINGUEZ M.	HOY. 14

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PROYECTO	TANQUE REHIBO
DISEÑO	ING. RICARDO A. ALVAREZ B.
REVISIÓN	ING. J. DEL VALLE DOMÍNGUEZ M.
FECHA	1981
HOJA	01

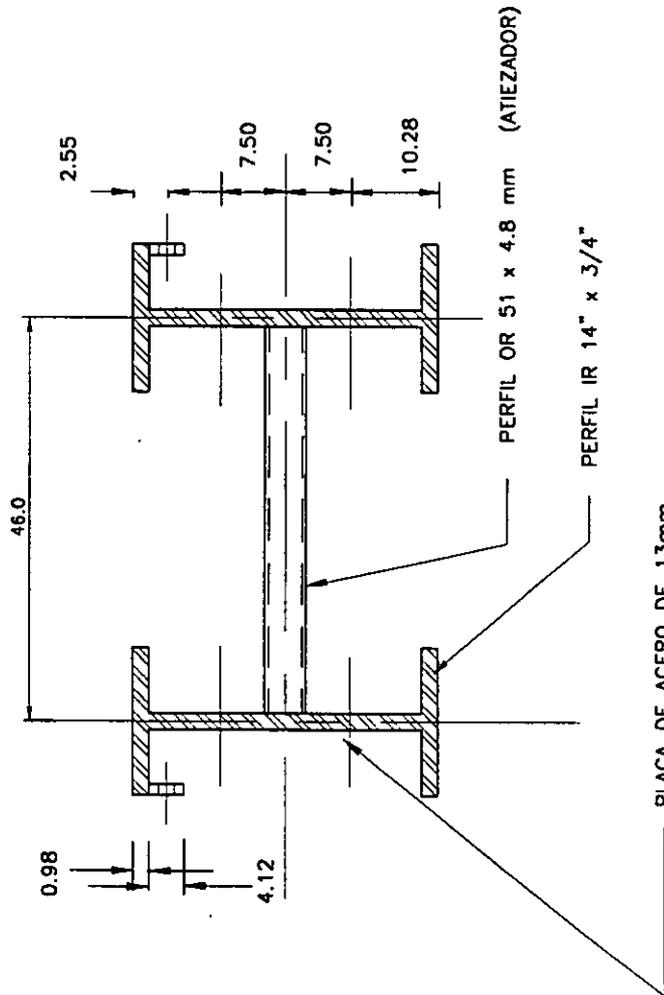


PLANTA

CORTE "D-D"

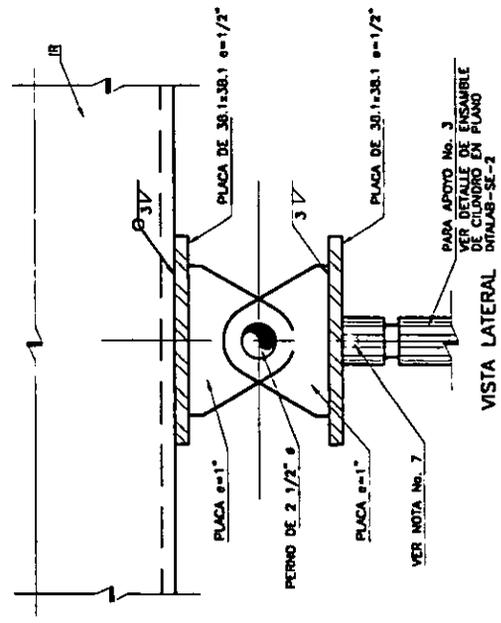


DETALLE TIPO DE OREJAS PARA SOPORTES

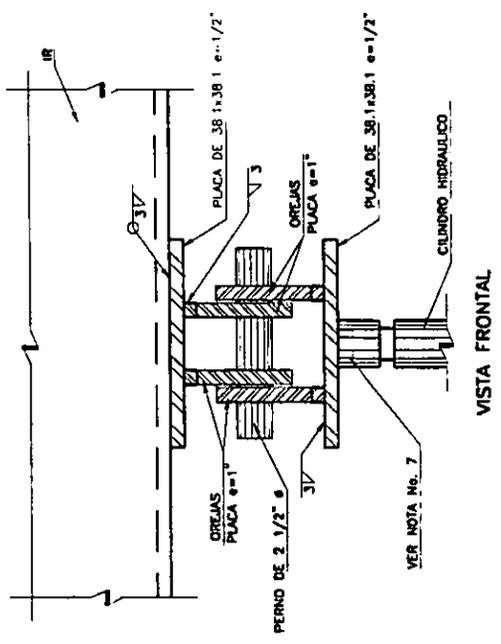


SECCION TRANSVERSAL EN ATIEZADOR
CORTE A-A
(CILINDRO-ARTICULACION-BASTIDOR)

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE INVESTIGACION DE AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
DETALLES CONSTRUCTIVOS	
PROYECTO	ING. RICARDO A. ALVAREZ B.
FECHA	12/04/14
REVISOR	J. OCTAVIO DOMINGUEZ M.
ADPT.	14

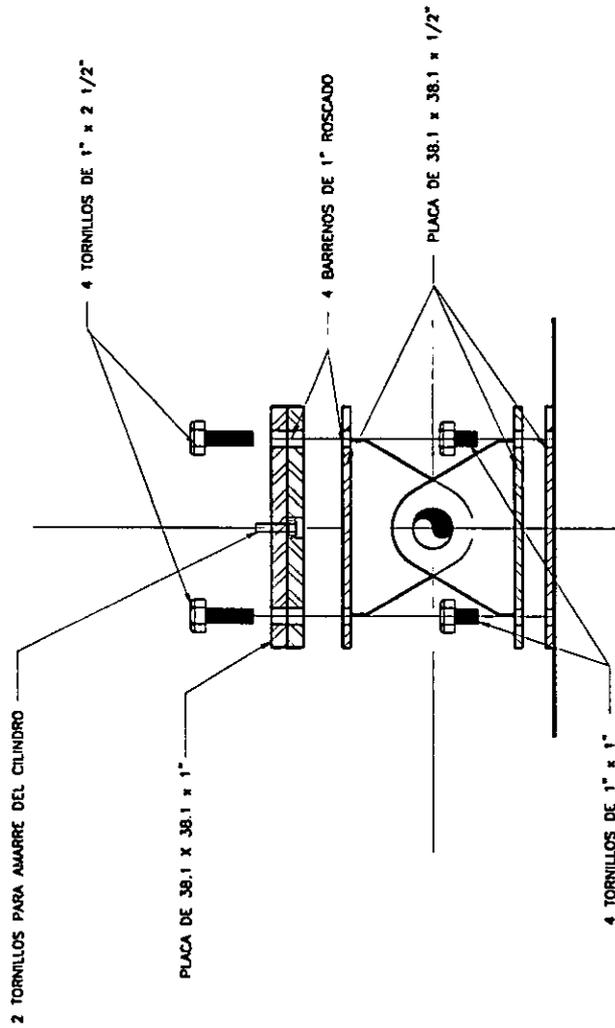
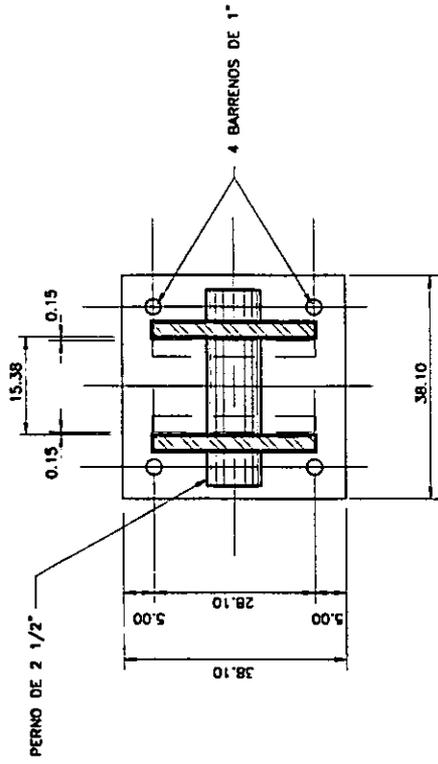


DETALLE TIPO DE ARTICULACION SUPERIOR
SIN ESC.

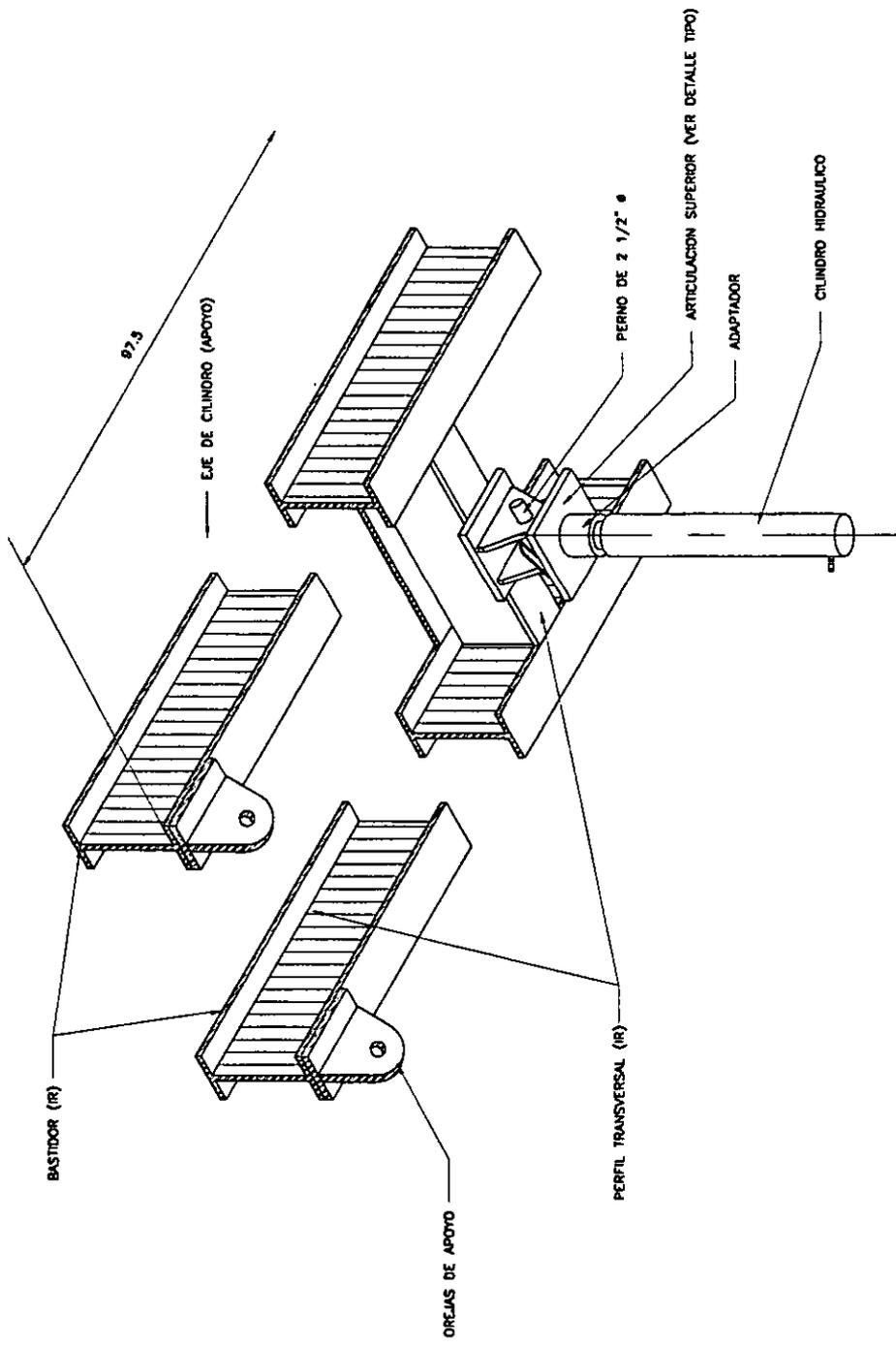


DETALLE TIPO DE ARTICULACION SUPERIOR
SIN ESC.

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE INVESTIGACION DE AGUA	
OBRAS CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO ARTICULACIONES	
DISEÑO DRG. RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA
CALIFICADO J. OCTAVIO DOMÍNGUEZ M.	FECHA

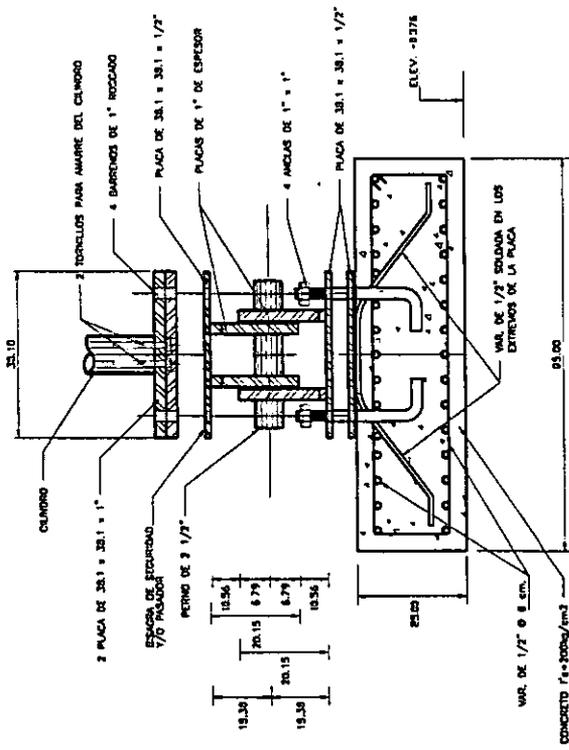


 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DE AGUA	
DISEÑA CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	ESCALA
PLAZA DETALLE UNION ARTICULACION-ZAPATA	DISEÑADO POR RUS. RICARDO A. ALVAREZ B.
DISEÑADO POR J. OCTAVIO DOMÍNGUEZ M.	APROBADO POR ...

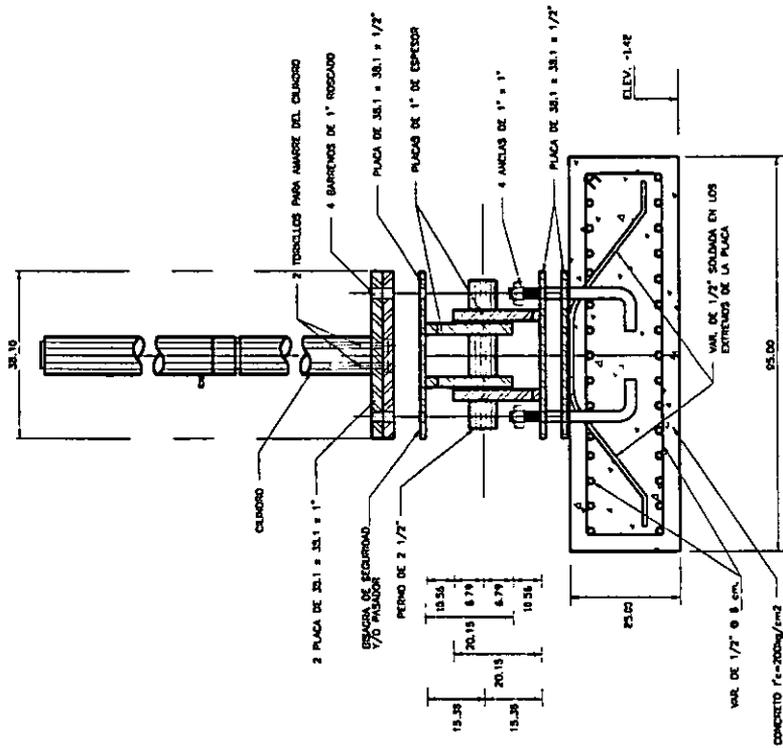


 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE INVESTIGACION DEL AGUA	
TÍTULO: CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO: CILINDRO - ARTICULACION - BASTIDOR	
DISEÑO: DR. DEJASO A. ALVAREZ B.	ESCALA: 1:1
DIBUJO: J. DE TAYO DOMINGUEZ M.	FECHA: ...

ISOMETRICO
VISTA INFERIOR

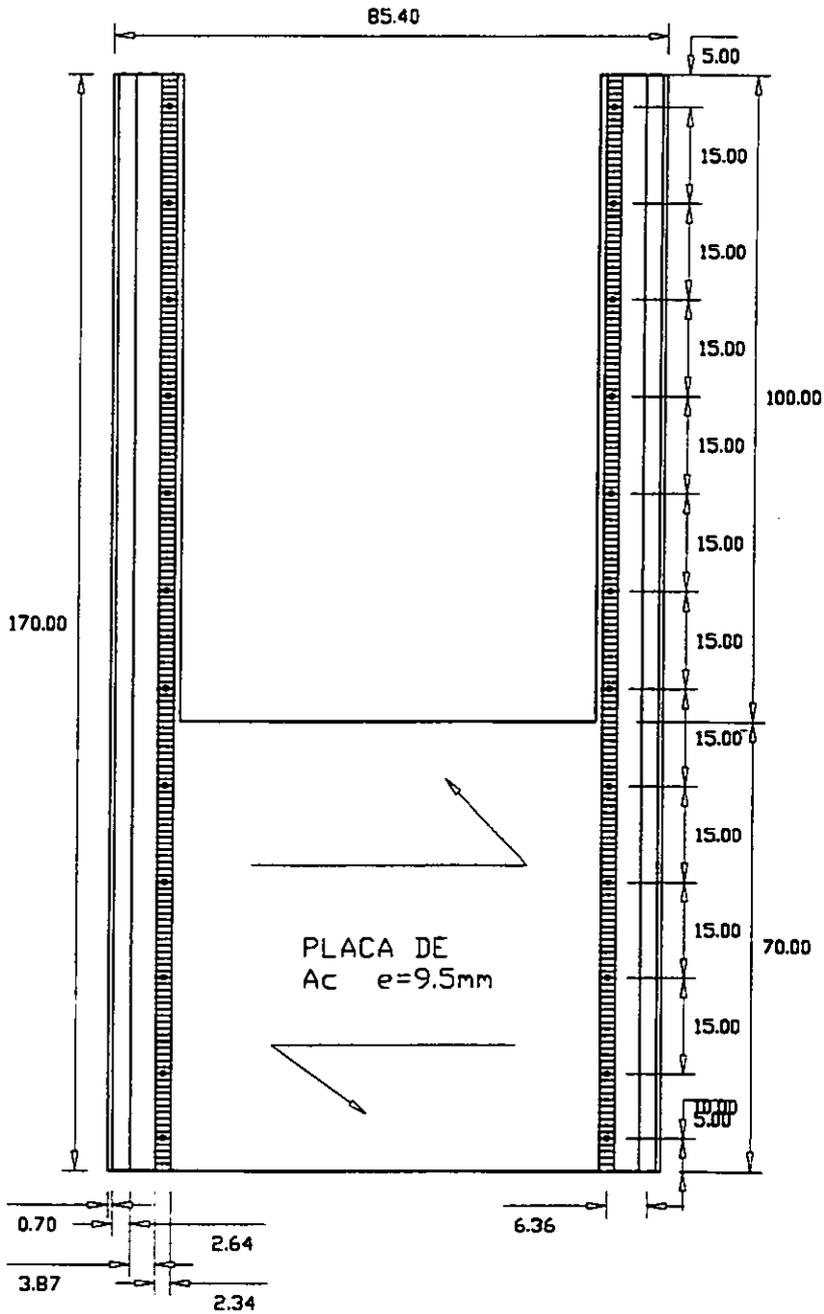


APOYO PARA CILINDROS 1 y 2



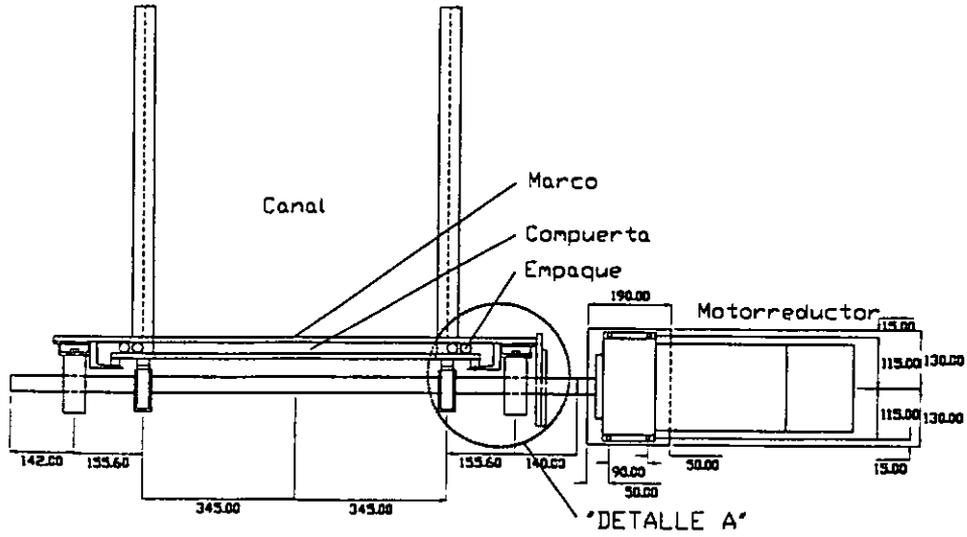
APOYO PARA CILINDRO 3

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	OBRA CANAL DE PENDIENTE VARIABLE
	PLANO DETALLE TIPO
DISEÑO ING. RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA 5/8
DIBUJO J. OCTAVIO DOMÍNGUEZ H.	FECH. 00

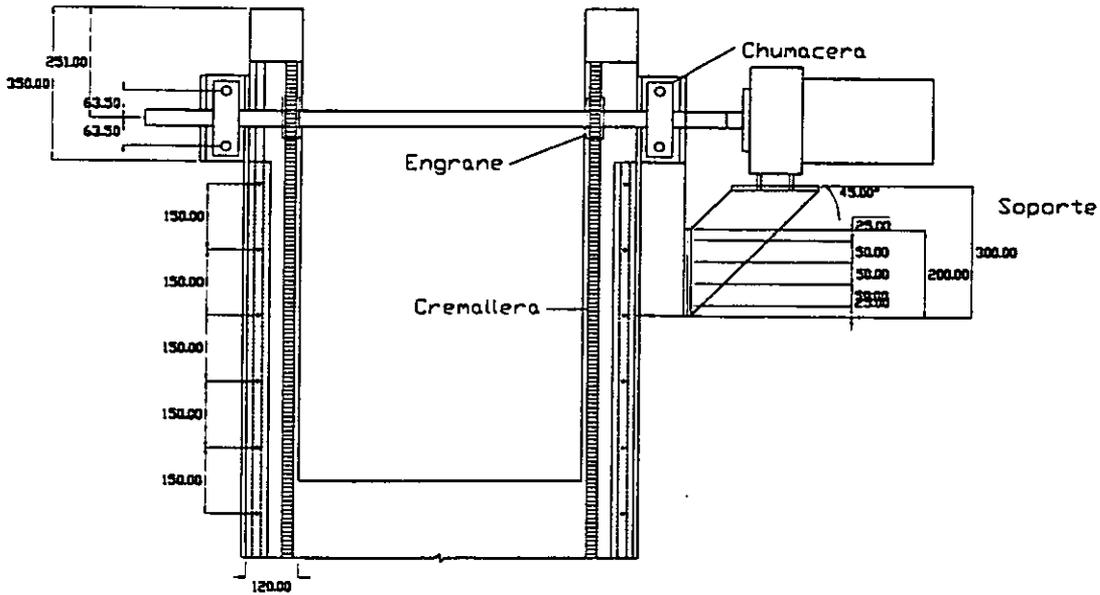


CUERPO DE LA COMPUERTA
VISTA FRONTAL

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
PLANO COMPUERTA-VERTEDEDOR DE ACCIONAMIENTO MOTORIZADO	
DISEÑO ING. RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA
DIBUJO ALEJANDRO MORENO M.	ALCOT CP



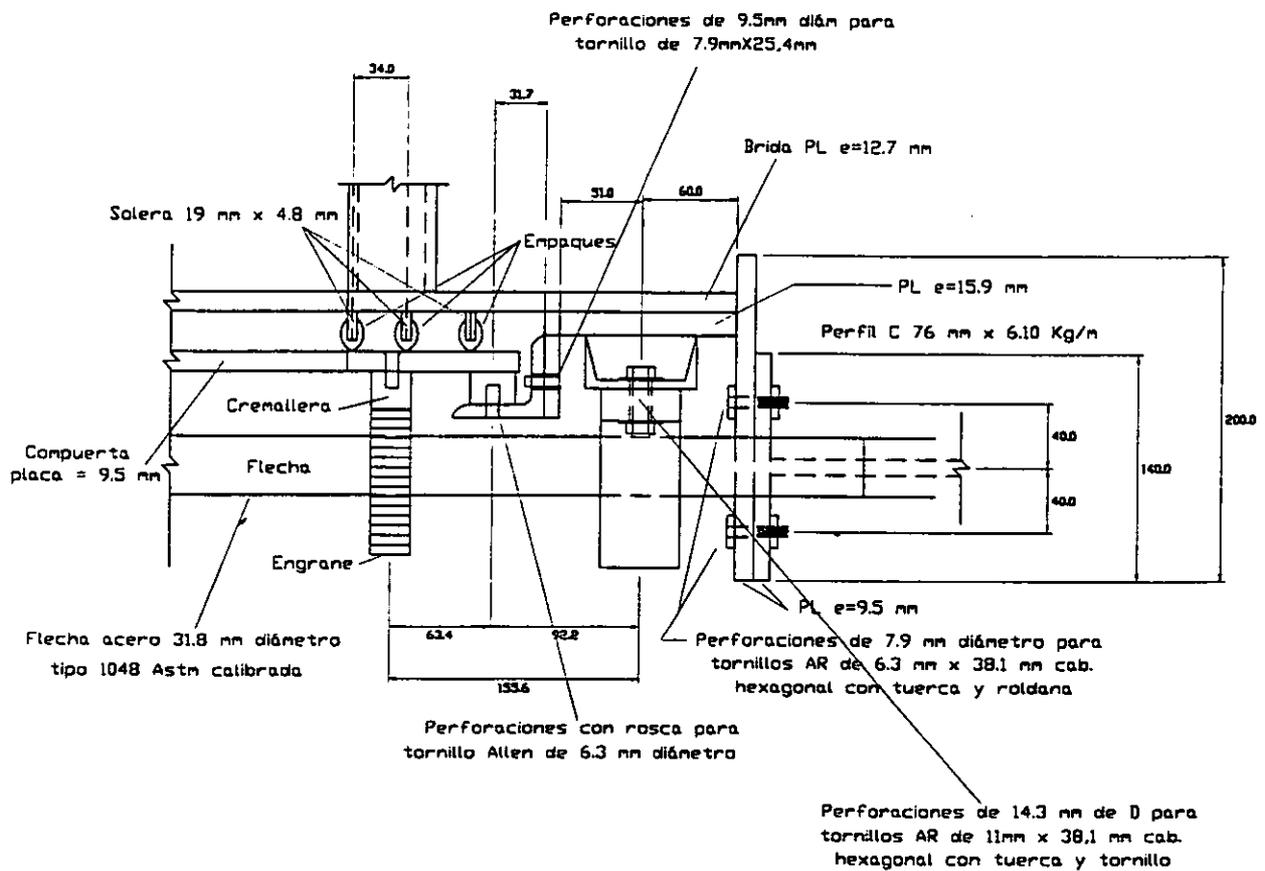
VISTA DE PLANTA



VISTA FRONTAL

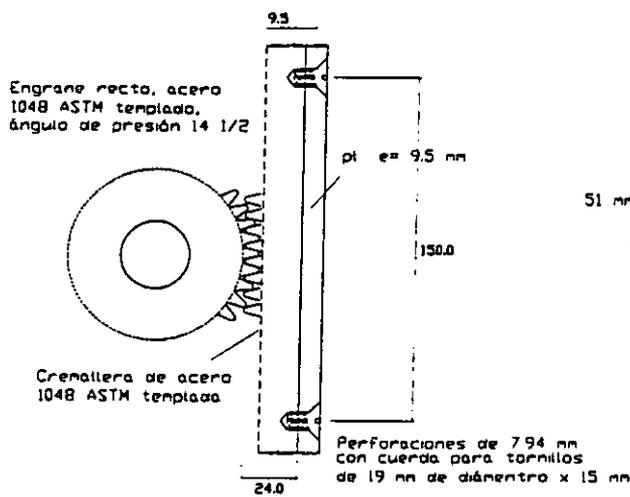
"COMPUERTA - BRIDA A CANAL
SISTEMA MECANICO "

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
OSRA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO: COMPUERTA-VERTEADOR DE ACCIONAMIENTO MOTORIZADO	
DISENO	ING. RICARDO A. ALVAREZ B.
OSUJO	ALEJANDRO MORENO M.
ESCALA:	ACDT



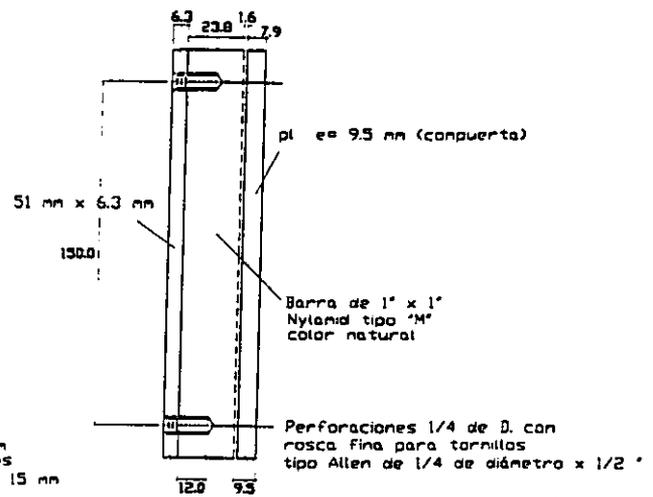
"COMPUERTA - BRIDA A CANAL - SISTEMA MECANICO "

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA		
		CODA
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE		
PLANO		
COMPUERTA-VERTEADOR DE ACCIONAMIENTO MOTORIZADO		
DISEÑO	ING. RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA
DESUJO	ALEJANDRO MORENO M.	ACOT. mm



CORTE "A-A"

ENGRAÑE-CREBALLERA



CORTE "B-B"

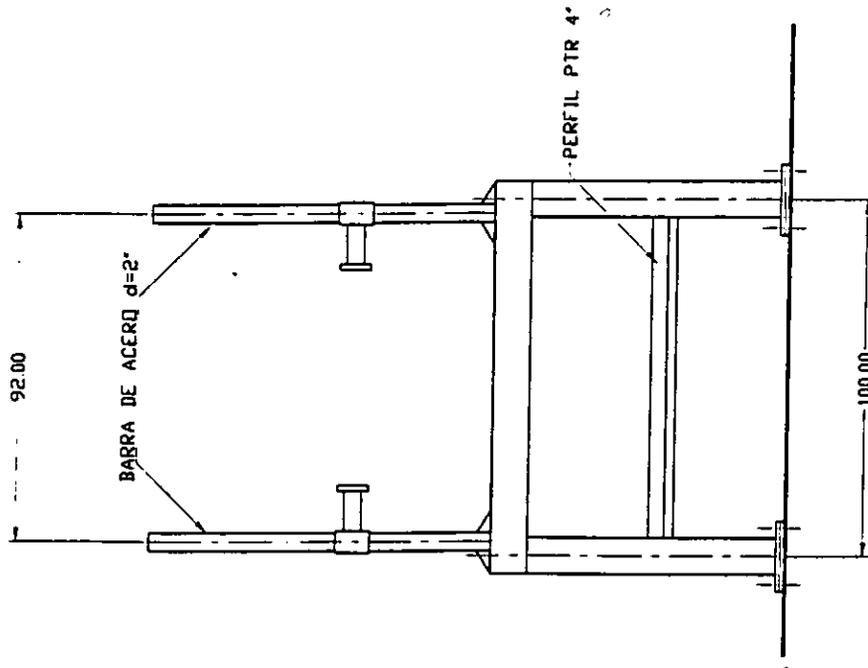
GUIA COMPUERTA

NOTAS:

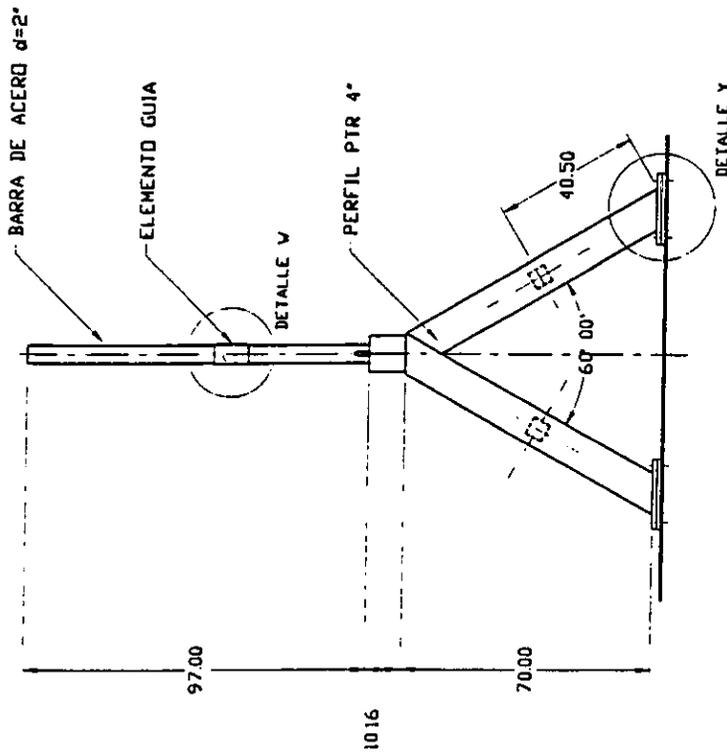
- 1.- Motor reductor marca ABB (Asea Brown Boveri) o similar, tipo UABM de 3 trenes de reducción, con freno electromagnético, trifásico, con las siguientes características:

..Potencia de salida	1/4 H.P.
..Relación de reducción	186.00:1
..Frecuencia de rotación	9 RPM
..Tipo motor reductor	48(71-A4)346
..Par nominal	19.89 Kgm
..Fuerza radial	570 Kg.
..Voltaje	220/440 v.
..Frecuencia	60 Hz.
- 2.- Unidad de transmisión de piso 'serie standar' tipo:FAK 38.1 mm (1 1/4"), marca 'FAFNIR' o similar.
- 3.- La flecha de los engranes y la del motor reductor serán unidas con cople reductor de 1 1/2" x 1 1/4" diámetros interiores, tipo estrella, marca 'LOVEJOY' o similar.
- 4.- Para la sujeción de engranes y uniones con cople en las flechas, se usarán, chavetas (cuñas) cuadradas de 3/8" de acero.
- 5.- Todas las soldaduras se harán con electrodos de la serie E-70XX (Fy 1.475 Kg/cm²) por obreros calificados y siguiendo las normas de la A.W.G.

IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
DISEÑO CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO COMPUERTA-VERTEDOR DE ACCIONAMIENTO MOTORIZADO	
DISEÑO ING RICARDO A ALVAREZ B	ESCALA 1:1
DISEÑO ALEJANDRO MORENO M	FECHA 1988

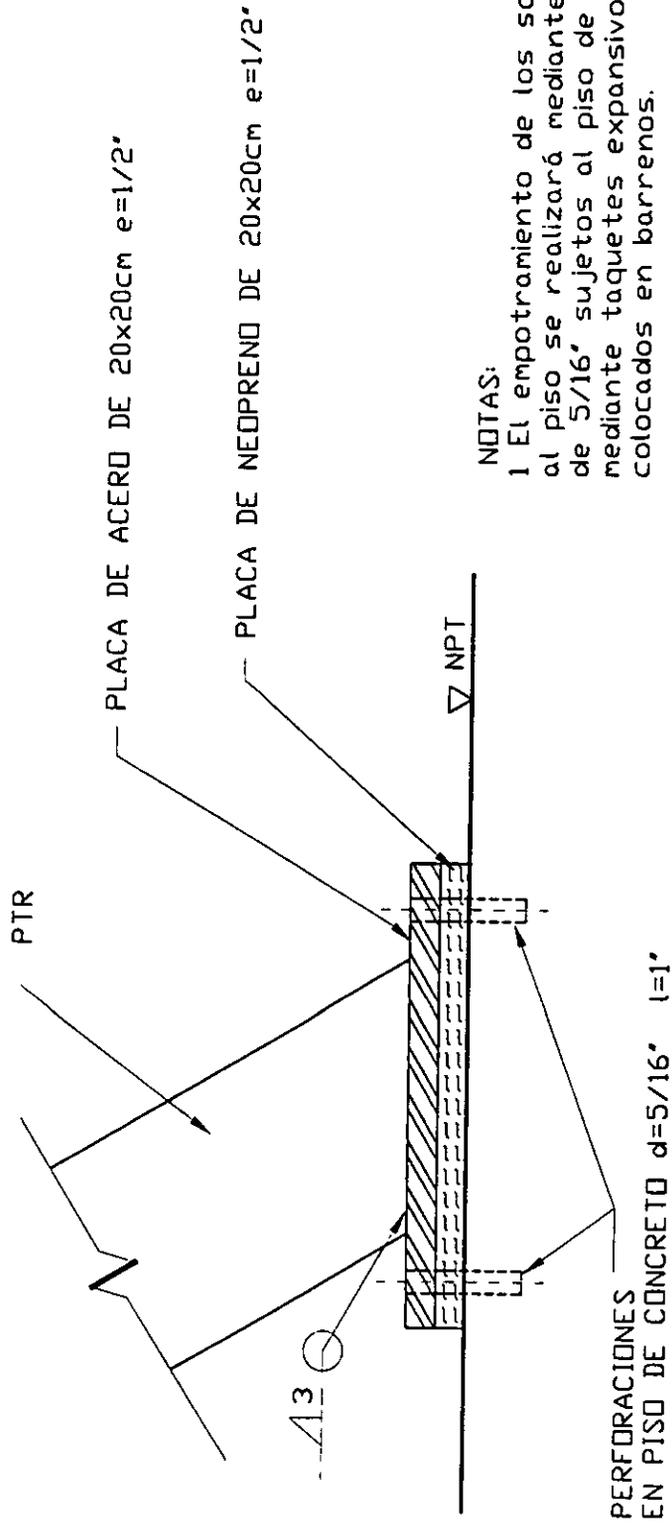


VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

 IMTA INSTITUTO RICARDO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
TITULO CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO SOPORTE GUIA	
DISEÑO ING RICARDO A ALVAREZ B	ESCALA
EQUIPO J. OCTAVIO DOMINGUEZ M	ACOT. 1:8



NOTAS:

1 El empotramiento de los soportes al piso se realizará mediante tornillos de 5/16" sujetos al piso de concreto mediante taquetes expansivos colocados en barrenos.

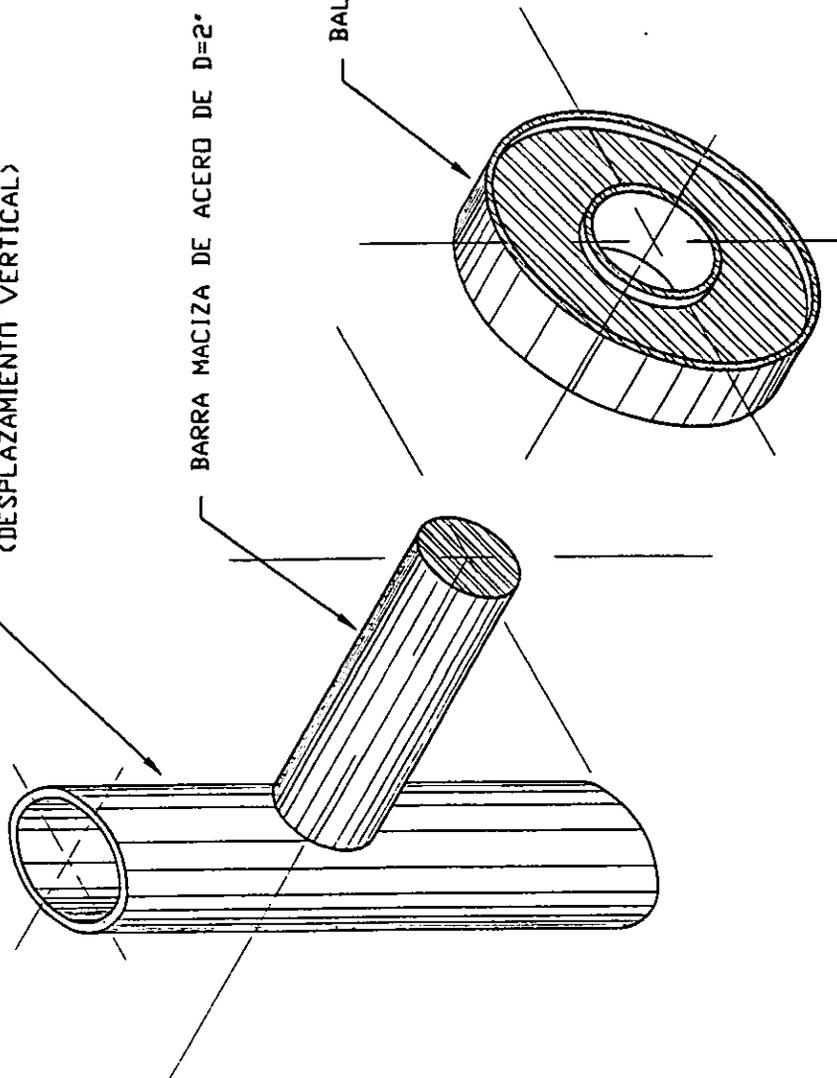
DETALLE Y

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
EMPOTRAMIENTO DE SOPORTES GUIAS	
OBRA	ESCALA
DISEÑO ING. RICARDO A. ALVAREZ B.	ALOT CO
DIBUJO J. OCTAVIO DOMINGUEZ M.	

TUBO DE ACERO DE D=2' e=1/8"
(DESPLAZAMIENTO VERTICAL)

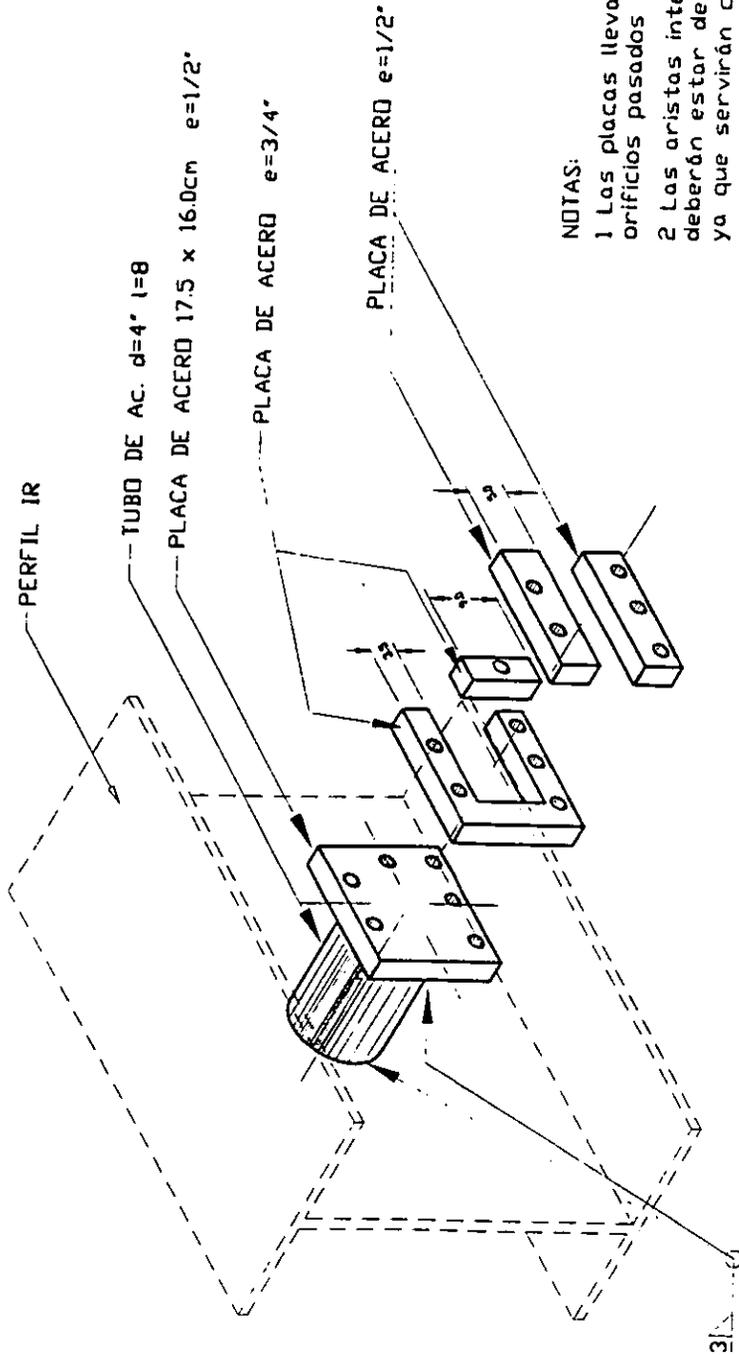
BARRA MACIZA DE ACERO DE D=2"

BALERO. (DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL)



DETALLE W

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
OBRA: CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO: ELEMENTO GUIA	
DISEÑO	ING RICARDO A. ALVAREZ B
ESCALA	
DEBIDO	J OCTAVIO DOMINGUEZ M
ACOT.	CS



NOTAS:

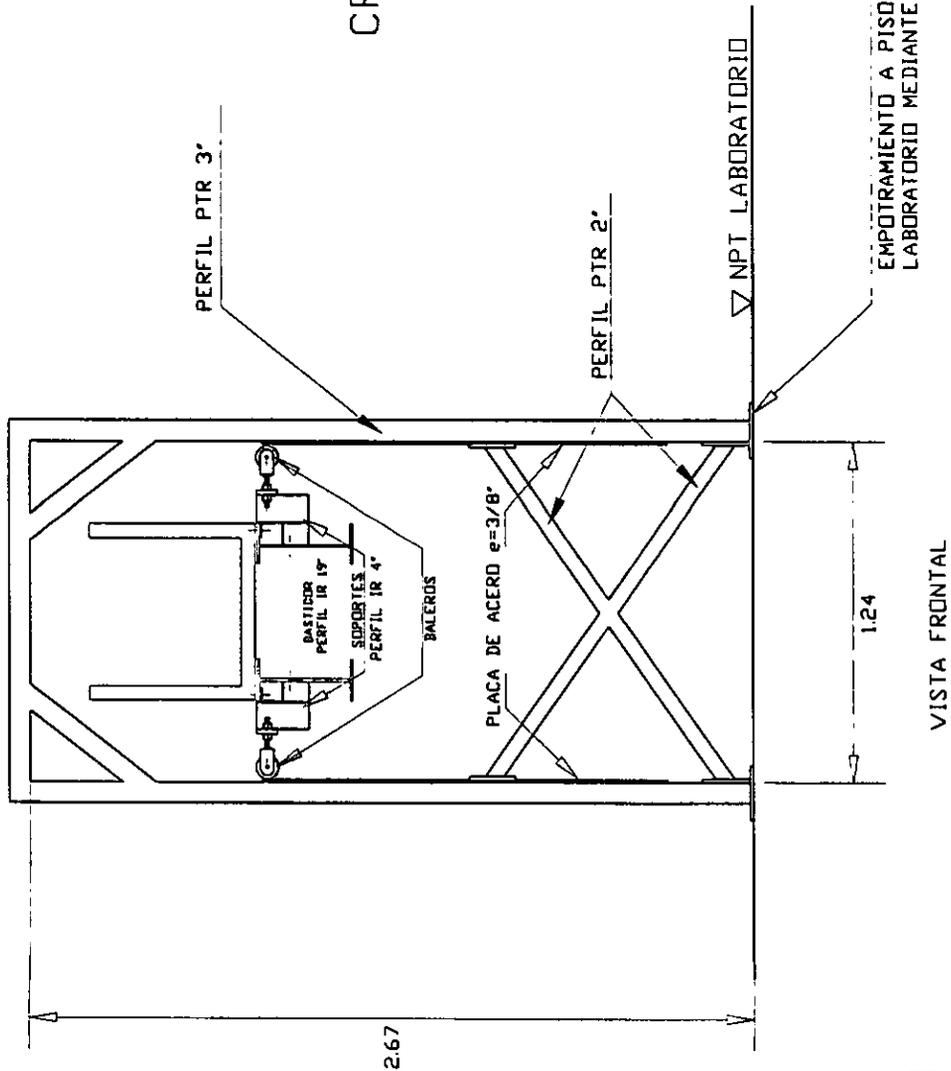
- 1 Las placas llevarán orificios pasados $d=1/2"$
- 2 Las aristas interiores de las placas deberán estar debidamente rectificadas ya que servirán como sup. de rodamiento

DETALLE F

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
OBRA	CANAL DE PENDIENTE VARIABLE
PLANO	MONTAJE Y FIJADO DE GUIA EN CANAL
DISEÑO	ING RICARDO A ALVAREZ B
REVISOR	J OCTAVIO DOMINGUEZ M
ESCALA	1:1
FECHA	1987

CROQUIS DE CONJUNTO

DISENO ORIGINAL



 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO	MARCO RIGIDO DE PERFIL ESTRUCTURAL
DISEÑO	ING. RICARDO A. ALVAREZ B.
DISEÑO	J. OCTAVIO DOMINGUEZ M.
ESCALA	1:100

CATÁLOGO DE CONCEPTOS

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE	P.U. CON LETRA
1. PRELIMINARES Y CIMENTACIÓN					
1.1 Trazo y nivelación	m ²	24.0			
1.2 Demolición de concreto armado	m ³	0.60			
1.3 Excavación en material tipo II	m ³	3.75			
1.4 Plantilla de concreto f'c=100 kg/cm ²	m ³	0.19			
1.5 Zapatas aisladas. Concreto f'c = 200 kg/cm ²	cm ²	0.68			
1.6 Acero de refuerzo del # 4	kg	54			
1.7 Cimbra y descimbra	m ²	2.85			
1.8 Muro de tabique rojo recocido de 14 cm, junteado con mortero cemento-arena 1:5	m ²	5.08			
1.9 Aplanado fino	m ²	5.72			
1.10 Cadena de 14 x 14 cm, concreto f'c=200 Kg/cm ² y Armex	m	4.60			
			Subtotal		

CATÁLOGO DE CONCEPTOS

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE	P.U. CON LETRA
2. CANAL REHBOCK.					
2.1 Firme de concreto f 'c=200 kg/cm ² de 7 cm, con malla electrosoldada 66/1010.	m ²	3.30			
2.2 Cadenas y castillos de 14 x 14 cm, concreto f 'c=200 kg/cm ² y Armex	m	27.80			
2.3 Muro de tabique rojo recocido de 14 cm junteado con mortero cemento-arena 1:5	m ²	6.40			
2.4 Celosía según muestra	m ²	1.44			
2.5 Aplanado fino	m ²	11.90			
2.6 Aplanado pulido	m ²	5.30			
2.7 Emboquillado	m	14.94			
			Subtotal		

CATÁLOGO DE CONCEPTOS

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE	P.U. CON LETRA
3. SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ACERO A-36					
3.1 Instalación	kg	2259.88			
3.2 Suministro e instalación	kg	2249.11			
			Subtotal		
4. SISTEMA DE ELEVACIÓN					
4.1 Suministro y colocación de bomba manual P-462	pza.	1.0			
4.2 Suministro y colocación de múltiple de alta presión	pza.	1.0			
4.3 Suministro y colocación de válvula V-8					
4.4 Suministro y colocación de válvula V-66	pza.	2.0			
4.5 Suministro y colocación de cilindro hidráulico	pza.	4.0			
4.6 Suministro y colocación de manguera de alta presión	pza.	4.0			
4.7 Suministro y colocación de cople CH604	pza.	17.0			
4.8 Suministro de aceite ENERPAC	pza.	3.0			
	lt	4.0			
			Subtotal		

CATÁLOGO DE CONCEPTOS

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE	P.U. CON LETRA
5. ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS					
5.1 Suministro y colocación de acrílico 199.8 cm 59.4 cm x 9 mm.	pza.	9.0			
5.2 Suministro y colocación de vidrio templado 199.5 cm x 70 cm x 9 mm, cantos pulidos	pza.	18.0			
5.3 Suministro y colocación de rieles de tubo redondo de aluminio de 19 mm diá. x 3 m de longitud.	pza.	12			
5.4 Suministro y colocación de espárragos (porta rieles) 3/8"x 11 cm	pza.	72			
5.5 Suministro e instalación de lámina galvanizada de 1.2 m x 3 m x 3/32"	pza.	4.5			
5.6 Suministro e instalación de tornillería. Ver especificaciones	lote	1.0			
			Subtotal		

CATÁLOGO DE CONCEPTOS

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE	P.U. CON LETRA
6. ALIMENTACIÓN AL TANQUE DE LLAMADA					
6.1 Suministro e instalación codo de Fo.Fo. de 90° x 12"	pza.	2.0			
6.2 Suministro e instalación carrete de acero de 12" x 86 cm. Incluye un corte y la soldadura de 1 brida	pza.	1.0			
6.3 Suministro e instalación reducción de acero de 14"x12"x124.4cm	pza.	1.0			
6.4 Suministro e instalación válvula de mariposa motorizada de 12"	pza.	1.0			
6.5 Suministro e instalación Carrete de acero de 12" x 133.0 cm. Incluye la soldadura de 1 brida	pza.	1.0			
6.6 Suministro e instalación de Extremidad de acero 12" x 204 cm	pza.	1.0			
6.7 Suministro e instalación Empaque p/brida de neopreno de 12" de diám.	pza.	4.0			
6.8 Suministro e instalación empaque p/brida de asbesto de 14" de diámetro.	pza.	1.0			
6.9 Suministro e instalación de tornillos hexagonales AR de 5/8"x 4" long., con rondana y tuerca	pza.	60.0			
6.10 Suministro e Instalación de espárragos AR 7/8"x 8" long., con 2 tuercas y 2 rondanas	pza.	12.0			
			Subtotal		

CATÁLOGO DE CONCEPTOS

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE	P.U. CON LETRA
7. DESAGÜE DEL CANAL DE LLAMADA					
7.1 Suministro e instalación de extremidad de acero de 6" x 6 3/4" de longitud. Incluye unión soldada al canal	pza.	1.0			
7.2 Suministro e instalación de codo de Fo.Fo. acero de 90° x 6"	pza.	1.0			
7.3 Suministro e instalación de válvula de mariposa de cierre rápido de 6" de diámetro	pza.	1.0			
7.4 Suministro e instalación de extremidad de PVC de 6" x 70 cm	pza.	1.0			
7.5 Suministro e instalación de tornillos de cabeza hexagonal AR de 3/4"x 3 1/2" de longitud con tuerca	pza.	8.0			
7.6 Suministro e instalación de de tornillos de cabeza hexagonal AR de 3/4" x 5" de longitud	pza.	8.0			
7.7 Suministro e instalación de empaque para brida de neopreno de 6" de diámetro	pza.	1.0			
			Subtotal		

RESUMEN CATÁLOGO DE CONCEPTOS

CONCEPTO	SUBTOTAL \$	CON LETRA	FIRMA
1. PRELIMINARES Y CIMENTACIÓN			
2. CANAL REHBOCK			
3. SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ACERO A-36			
4. SISTEMA DE ELEVACIÓN			
5. ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS			
6. ALIMENTACIÓN DEL CANAL DE LLAMADA			
7. DESAGÜE DEL CANAL DE LLAMADA			

TOTAL \$

IVA \$

TOTAL CON IVA \$

3. INSTALACION Y PRUEBAS DEL MODULO EXPERIMENTAL

En las fotografías 3.1 a 3.3 se aprecia el proceso constructivo de la estructura del canal de pendiente variable. Primeramente se elaboró el armazón de cada módulo del canal rectangular, y una vez concluidos todos los módulos se montaron sobre la estructura del bastidor. Se construyeron los tanques de llamada y salida sobre el eje previamente establecido y que también serviría para alinear los cilindros elevadores y sus apoyos. Una vez colocadas las zapatas para recibir los cilindros, se colocó el bastidor con sus módulos a la altura fijada por el soporte articulado. Se instalaron los cilindros y se probaron para hacer los ajustes necesarios. El sistema de alimentación de agua se armó una vez que el tanque de llamada se recubrió con pintura anticorrosiva y la estructura modular del canal se concluyó con la instalación de las paredes de vidrio templado y fondo de acrílico de 9 mm. Los trabajos de instalación del módulo experimental se llevaron a cabo de acuerdo a los planos y especificaciones. Sin embargo, como es usual en casos como éste, hubo necesidad de hacer pequeños ajustes y modificaciones para facilitar la ejecución, para ajustarse a las medidas comerciales y características de algunos suministros, o bien por seguridad.

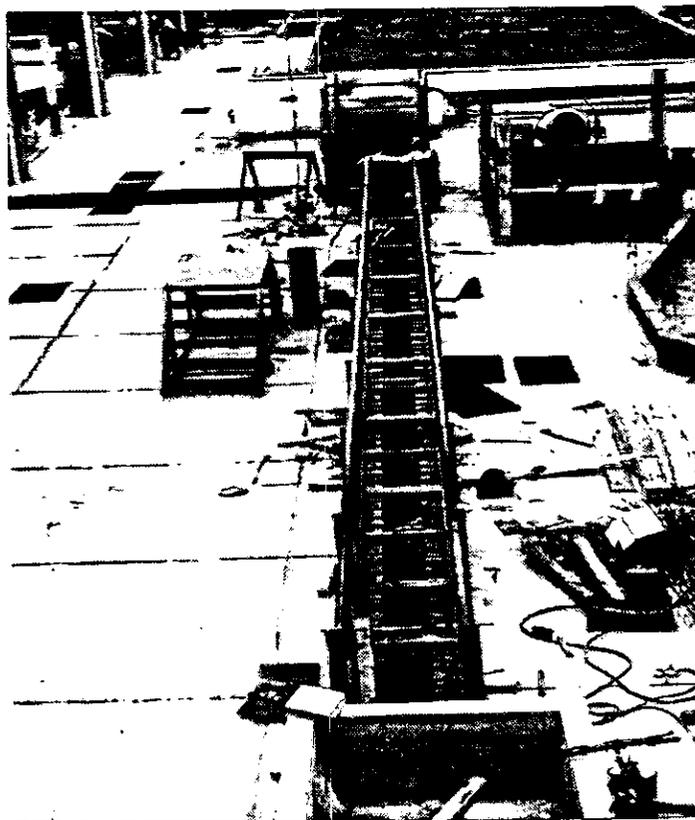


Foto 3.1 Armado de la estructura del canal de pendiente variable

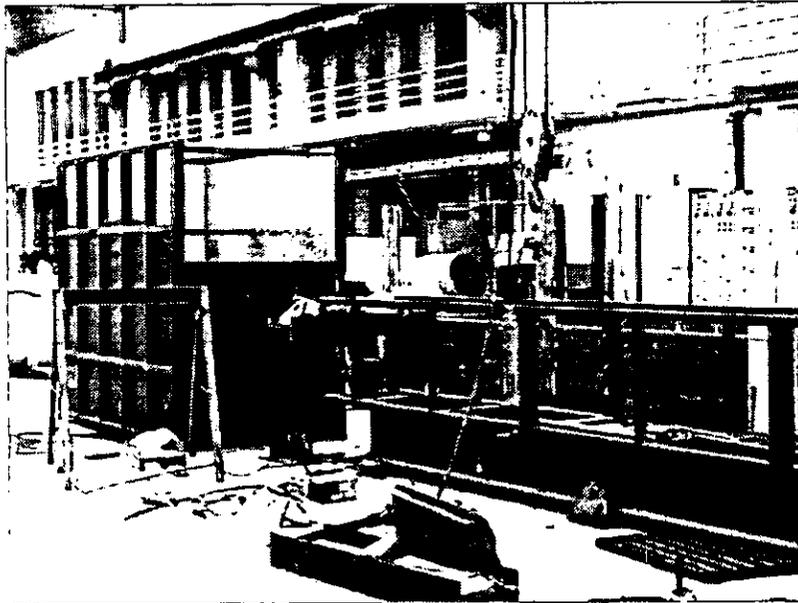


Foto 3.2 Armado del tanque de llamada.



Foto 3.3 Colocación de la estructura a su nivel de proyecto.

3.1. Modificaciones.

Entre las modificaciones más importantes se tienen la forma y el tamaño del tanque de llamada, la disposición de los pistones elevadores y la de los soportes.

3.1.1. Modificaciones al tanque de llamada.

En el caso del tanque de llamada, el fondo de éste tenía forma parabólica (ver planos de elevación general del capítulo anterior) coincidiendo tangencialmente al fondo del canal para facilitar el acceso del agua y evitar turbulencias. Se modificó la forma para que el canal y el tanque pudieran ser sellados fácilmente con una junta flexible, entrando parte del cuerpo del canal en el tanque de llamada donde se adicionó una boquilla redondeada para proveer un acceso del agua con pocas pérdidas por fricción (Fotos 3.4 a 3.6).

Se consideró ampliar el tanque para que a futuro se pudiera poner otro tipo de sección de trabajo más ancha (fig. 3.1). Si se requiriera una sección trapecial, solo será necesario modificar la parte alta del tanque de llamada, ensanchándolo suficientemente para permitir que se acople la nueva sección al tanque.

Será posible trabajar en secciones circulares bajo las mismas condiciones, por ejemplo empleando tubería de algún material, como concreto, asbesto, pvc, acero, lámina etc. y en cualquier caso deberá diseñarse una junta flexible para unir la sección de trabajo con el tanque de llamada.

En caso de requerirse una sección de trabajo rectangular de un ancho

mayor, ésta dimensión no deberá ser mas grande que un 100% siendo la sección transversal de la misma área de la sección original, con lo que se evitará sobrepasar la carga de diseño.

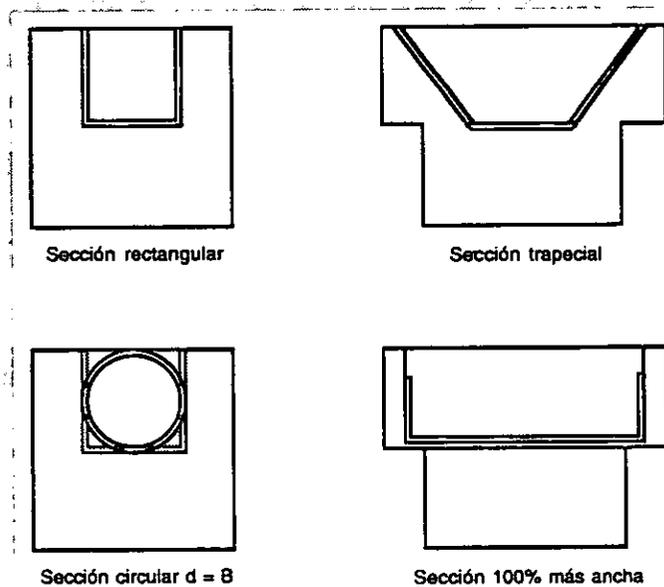


Fig. 3.1 Tanque de llamada

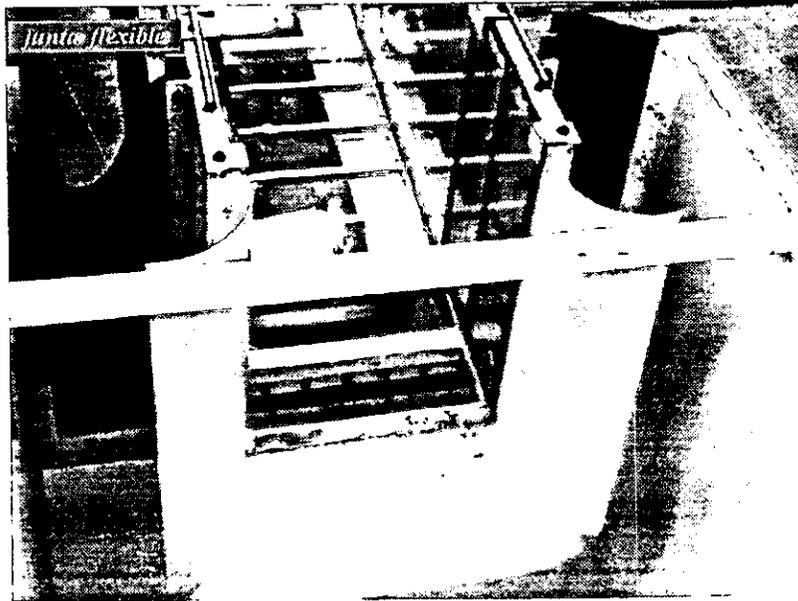


Foto 3.4 Boquilla redondeada y junta flexible a la entrada de la sección de trabajo, dentro del tanque de llamada.

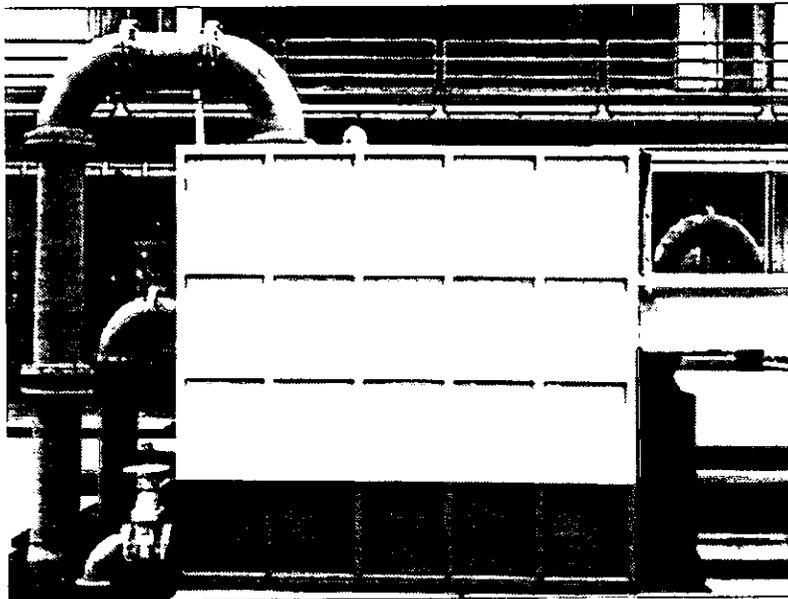


Foto 3.5 Tanque de llamada. Vista lateral.

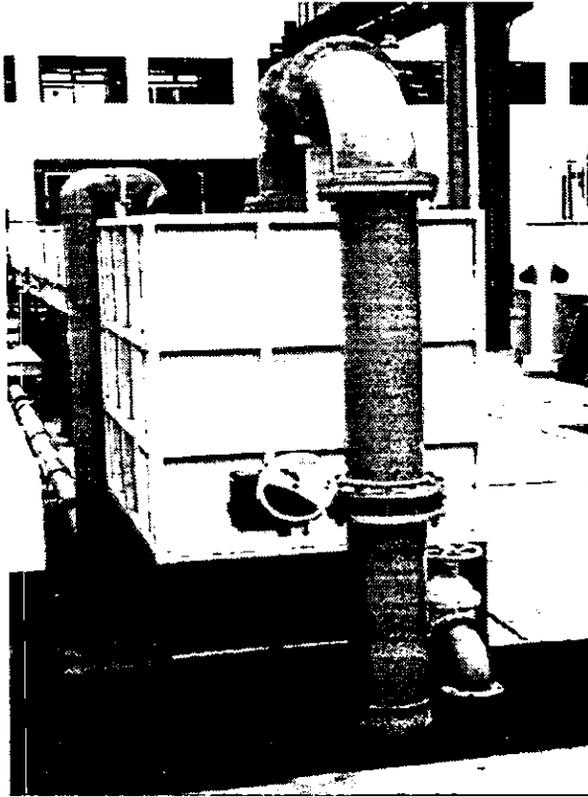


Foto 3.6 Tanque de llamada. Vista posterior.

3.1.2. Modificaciones a la ubicación de los cilindros o pistones elevadores.

Se había previsto la posición de los pistones elevadores como apoyos equidistantes, pero por la longitud de desarrollo del vástago que resultó más corto, se reubicaron quedando como se muestra en el plano general.

No se emplearon seis unidades, solo se colocaron cuatro pistones en tres puntos de elevación. En el punto de apoyo mas lejano del apoyo articulado se colocaron dos pistones uno a continuación del otro con objeto de alcanzar la longitud total de desarrollo necesaria.

Esta modificación se debió a que los pistones especificados en el diseño se debían fabricar sobre pedido y el tiempo de entrega del proveedor rebasaba el programa de ejecución. Pero estructuralmente no hubo ningún problema ya que la capacidad de carga de los pistones resultó muy por encima de lo especificado (25 ton). Solo se deberá tener cuidado de no cambiar la posición del canal cuando éste se encuentre lleno, para evitar una flexión de la viga fuera de lo calculado. Se debe recordar que en el análisis de carga para diseño se consideró el canal totalmente lleno en su sección de trabajo (ver plano vista lateral).

3.1.3. Modificaciones de los soportes guía.

Al probar el funcionamiento de elevación de la estructura, se observó que los soportes guía diseñados solo evitarían desplazamientos laterales y serían los pistones elevadores los que sostuvieran el nivel establecido quedando siempre el sistema presurizado, lo cual no es conveniente en caso de una rotura accidental de mangueras o empaques, ya que provocaría que el canal quedara sin sustento y bajara hasta topar con el tanque de salida ocasionado una fuerte flecha al quedar la viga solo en dos soportes a sus extremos. Otro inconveniente resulta al tener cargas que no fueran uniformemente distribuidas sobre cada pistón, el pistón que recibiera mayor carga transmitiría presión adicional al sistema y obligaría a los otros a equilibrar la presión con un aumento de su longitud, lo que en consecuencia generaría deformaciones adicionales a la estructura. Considerando la seguridad de operación del módulo experimental, se modificaron los soportes para que no solamente resistieran empujes laterales accidentales, sino que además trabajaran cargando la estructura al quedar liberados de presión los pistones elevadores. Los soportes son barras de acero macizo de 5.04 cm de \varnothing (ver planos en la pág. 113 y 115) que descansan en un



tetrápodo. Su articulación superior permite que siempre permanezcan verticales no importando la inclinación de la viga del bastidor del canal. El perfil superior del tetrápodo está reforzado con una placa perforada para dar paso a la barra soporte, que entra y sale según sea la pendiente de la viga. La barra está roscada y una tuerca colocada contra la placa determina la posición de trabajo.

Foto 3.7 Soportes diseñados para cargar el peso de la estructura cuando los cilindros elevadores se encuentran sin presión. Junto con el marco soporte al final de la viga del bastidor, impiden desplazamientos laterales por cargas accidentales.

3.1.4. Modificaciones al apoyo articulado y al marco soporte al extremo de la viga.

Así mismo, se observó que para el caso la pendiente máxima positiva y eventualmente la compuerta de control cerrada y el canal lleno, era una condición no prevista. En esta situación se ejercería sobre el apoyo articulado un momento que debía ser resistido no solamente por el anclaje al piso, sino también por un apoyo lateral adicional o contraventeo (Foto 3.8).

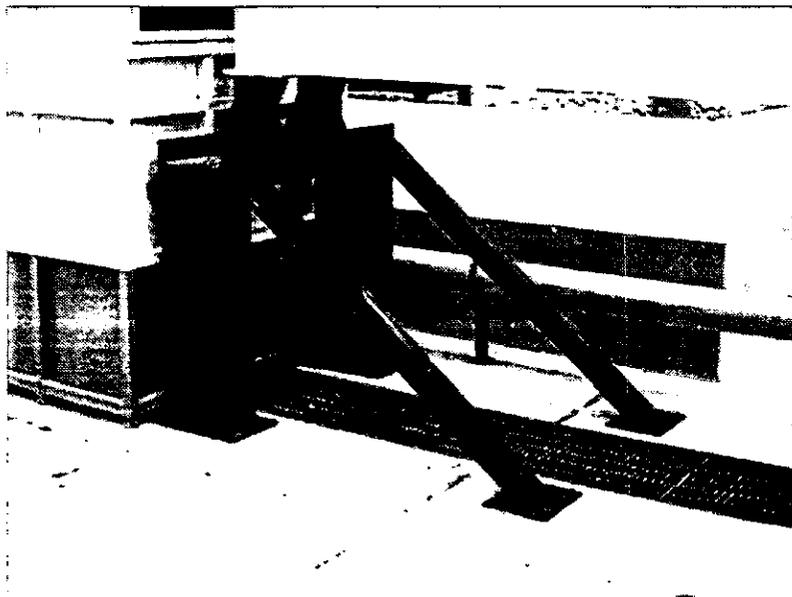


Foto 3.8 Soporte articulado en el inicio de la viga bastidor del canal de pendiente variable. El contraventeo junto con el anclaje del apoyo, resisten la carga que ejerce el canal en dirección de su eje longitudinal cuando la pendiente positiva es máxima, la compuerta está cerrada y la sección de trabajo se llena.

El marco soporte al extremo final de la viga se modificó añadiendo otro par de correderas o baleros a cada lado de la estructura de la viga, ya que en caso de cargas accidentales estos baleros, que fueron diseñados para mantener el canal dentro de su eje de trabajo evitando que la viga se convierta en una gran palanca, permitirán dar rigidez al bastidor en cuanto que resistirá momentos que provoquen torsión en la viga del bastidor, en forma similar al trabajo que desarrolla el perno del apoyo articulado.

Los baleros están montados de tal forma que fácilmente se pueden ajustar entre el marco soporte y la viga (Foto 3.9).

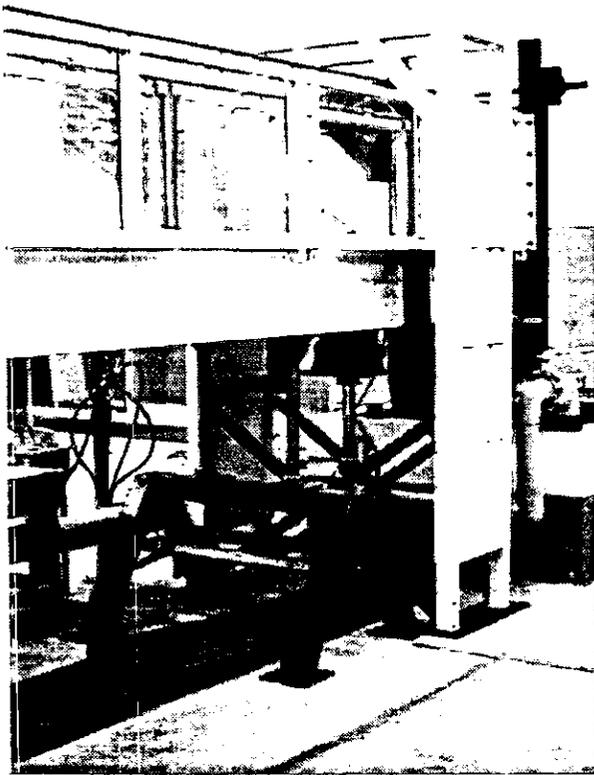


Foto 3.9 Marco soporte al extremo final de la viga. Esta estructura anclada al piso evita que la viga se convierta en una gran palanca y permite dar rigidez al bastidor en cuanto que resiste momentos que provoquen torsión en la viga del bastidor. Los baleros deslizan lateralmente y se ajustan para conservar el canal dentro de su eje de trabajo, en caso de cargas accidentales.

3.1.5. Adaptación del tanque canal Rehbock como cárcamo de bombeo.

Se aprovechó equipo de bombeo existente en el laboratorio de hidráulica para instalar un sistema de recirculación propio del módulo experimental, empleando el tanque canal Rehbock, para lo cual, la placa vertedora se intercambiará por una placa ciega que permita llenar el tanque canal

convirtiéndolo en cárcamo de bombeo. De esta manera será posible independizar el módulo del suministro de la red del laboratorio, aunque solo sea para gastos pequeños. El sistema de recirculación está compuesto de tres equipos de bombeo de 3 HP c/u tipo centrífuga vertical, la tubería de PVC es de 6"ø, con válvulas para regular el gasto, una de ellas funciona como by pass, al descargar parcialmente el gasto de recirculación, al cárcamo.

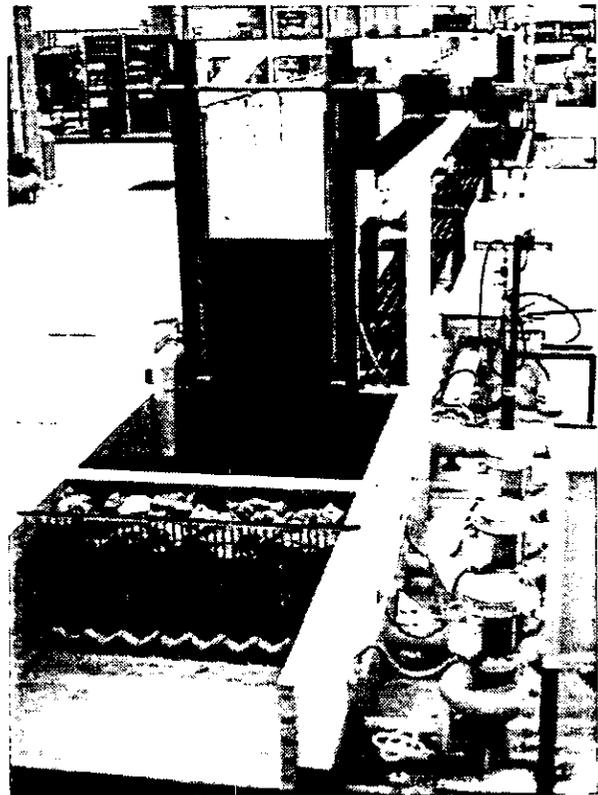


Foto 3.10 Compuerta de control de niveles a la salida del canal, accionada con un mecanismo elevador. Esta compuerta permite la descarga como vertedor o como orificio, según sea necesario. Se observa también la instalación del sistema de recirculación del módulo experimental.

3.2. Características de operación.

Concluida la instalación del módulo experimental se procedió a efectuar una serie de pruebas con objeto de determinar su capacidad real de operación.

3.2.1. Medida de la pendiente del fondo del canal en sus condiciones extremas.

Se instaló una regla o escala para medir la distancia vertical del canal desde su posición horizontal hasta donde se fije la pendiente. La distancia medida desde el apoyo articulado (eje del perno) hasta la regla es de 17.7m. La resolución de la regla es de 0.1mm con lo que se puede definir la pendiente hasta en 0.000565% (que equivale a 0.00032 grados). La posición que se obtiene de los pistones elevadores cuando actúa la bomba manual es de 0.6 mm si la carrera del pistón de dicha bomba es completa.

En esta misma escala es posible medir la elevación del canal por encima de su posición horizontal para definir la pendiente negativa.

De esta forma la pendiente está dada por la medida de la regla (en metros) dividida entre 17.7m.

La posición de la pendiente máxima positiva y pendiente máxima negativa se midió dando la longitud de desarrollo necesaria a los pistones elevadores, tanto en su punto totalmente recogido y limitado por la altura del tanque de salida, como en su extensión total, limitada por la longitud del pistón elevador central. Dicha longitud es de 36 cm pero se fijó un tope al llegar a los 35.5 cm. Es posible rebasar esta medida, y la estructura del canal puede sufrir algún tipo de deformación, ya que los pistones elevadores del punto extremo tienen una carrera total de 72cm. Por esta razón el tope se fijó mediante una alarma audible, la cual se activa cuando el canal llega al nivel máximo en cuanto a su pendiente, tanto en condición positiva como negativa.

En las fotografías 3.11 a 3.14 se observa el módulo experimental en sus posiciones extremas de pendiente, obteniéndose los siguientes resultados:

Pendiente	De Diseño	Real
Máxima positiva	0.0277700	0.0282485
Máxima negativa	0.0055000	0.0050847



Foto 3.11 Vista desde aguas abajo del canal de pendiente variable en la posición más elevada de su extremo.

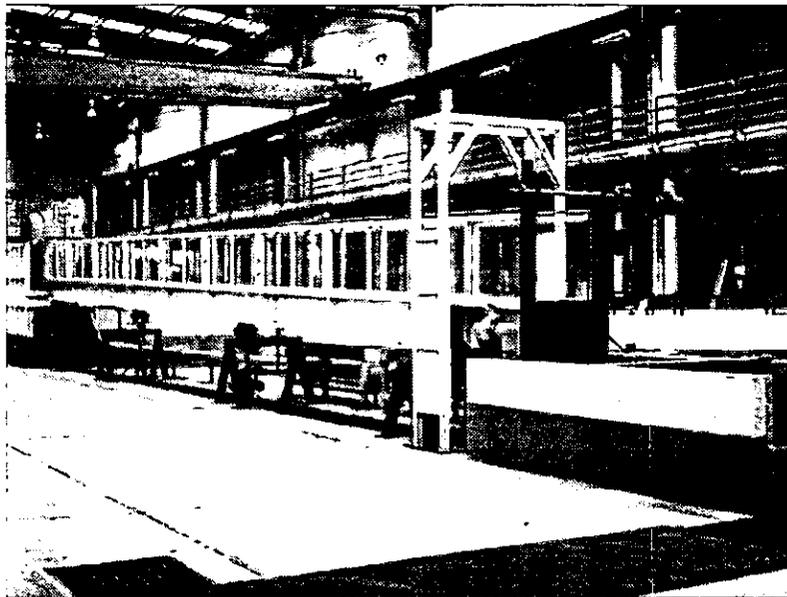


Foto 3.12 Vista desde aguas abajo del canal de pendiente variable en la posición más baja de su extremo.

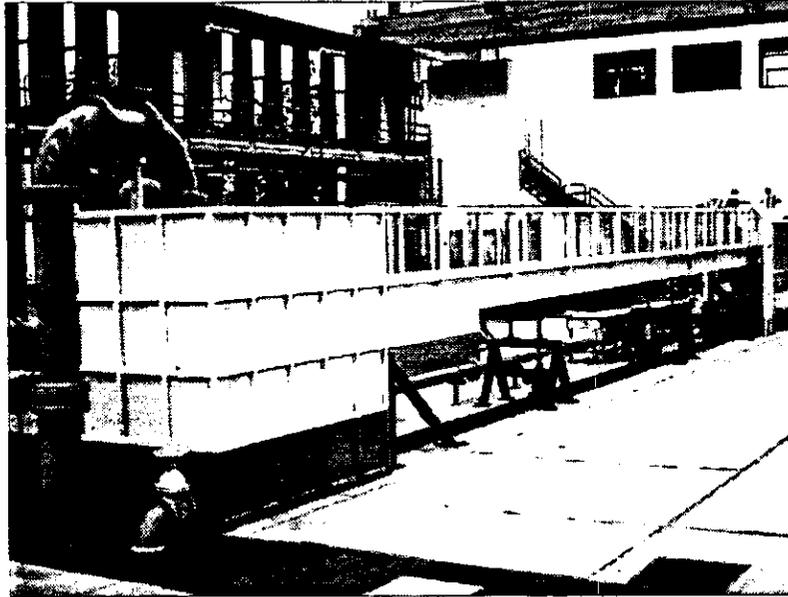


Foto 3.13 Vista desde aguas arriba del canal de pendiente variable en la posición más elevada de su extremo.

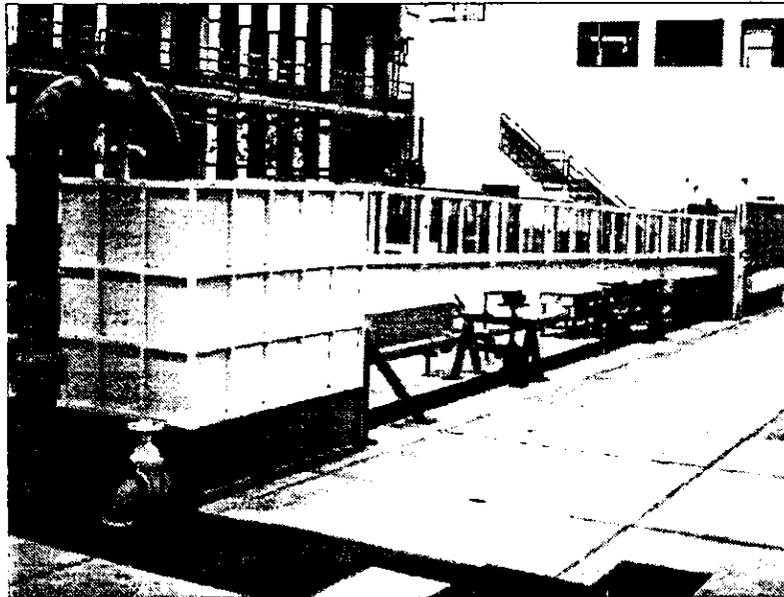


Foto 3.14 Vista desde aguas arriba del canal de pendiente variable en la posición más baja de su extremo.

3.2.2. Aforo en la estación pitométrica para el canal de pendiente variable.

Se instaló una válvula de inserción en la tubería de 14"Ø que alimenta el canal de pendiente variable, procediendo a obtener el perfil de velocidades en la sección haciendo un barrido a lo largo del diámetro con lo cual se obtiene el factor de velocidad, el cual será empleado en mediciones subsecuentes. Se empleó un programa de cómputo* para obtener dicho factor. En las siguientes gráficas se muestran las pantallas que maneja el software de cálculo.

PITOMETRIA		Fichero:		IMTALAB	
Ficheros	Datos	Resultados	Imprimir	Información	DOS
	Datos Generales				
Nombre del acueducto	:	IMTALAB			
Nombre de la sección	:	Canal de pendiente variable			
Fecha de la calibración	:	4 de Junio de 1997			
Material de la tubería	:	ACERO			
Diámetro nominal (mm)	:			355.6	
Diámetro real (mm)	:			336.4	
Tipo de Pitot (S- Simplex, C-Cole)	:	S			
Coefficiente del Pitot (Simplex)	:			0.805	
Proyección válv. de inserción (mm)	:	0			
Puntos medidos para la calibración	:			12	
Mediciones de velocidad central	:			1	
F1 Ayuda					

PITOMETRIA		Fichero:		IMTALAB	
Ficheros	Datos	Resultados	Imprimir	Información	DOS
	Datos Generales				
	Calibración				
	Vel. central (datos generales)				
Fecha	hora	Bombas operando	Densidad	Núm de lect.	
04/06/97	13.30	no	1.4550	21	
F1 Ayuda					

* V.G.Tzatchkov, PROGRAMA PROCESAMIENTO DE DATOS DE PITOMETRIA VERS. 1.03.

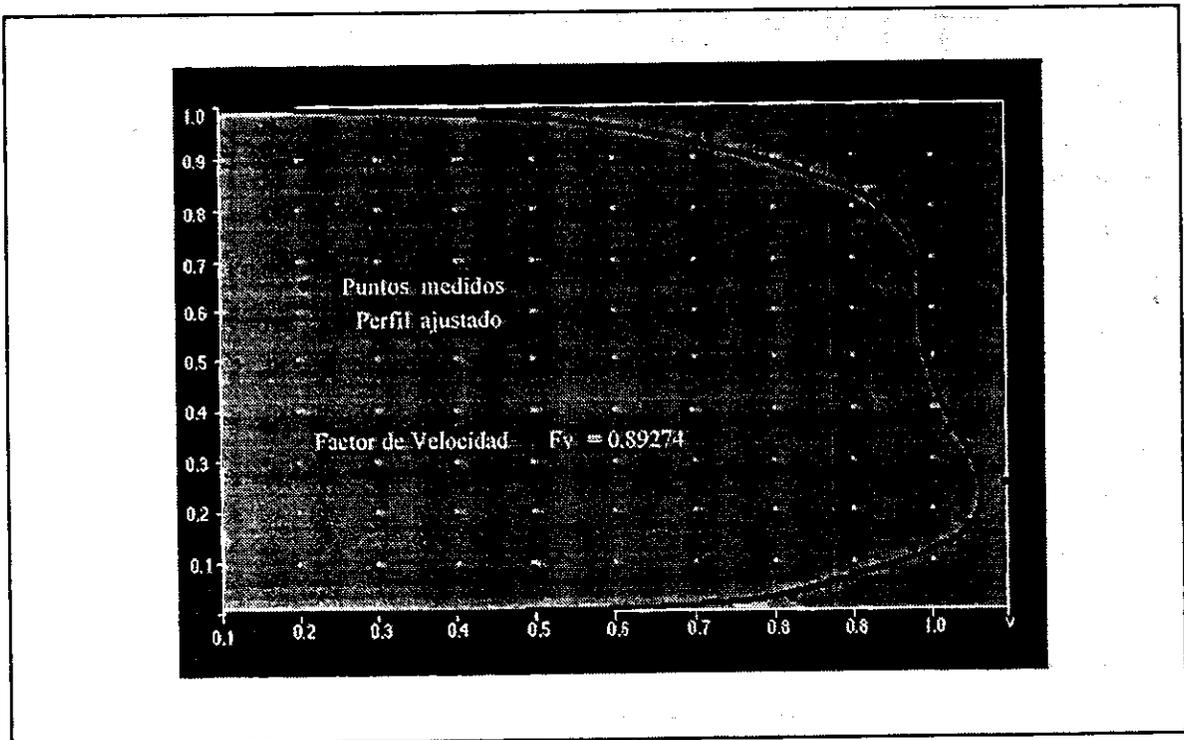
Paquete de Programas I.M.T.A. No. de Catálogo PM V.1.03.1994, México, junio de 1992.

PITOMETRIA			Fichero: IMTALAB		
Ficheros	Datos	Resultados	Imprimir	Información	DOS
	Datos Generales Calibración				
	R anillo (mm)	h (mm)	hc (mm)		
1	160.79	53.0	218.0		
2	145.66	113.0	215.0		
3	128.50	155.0	216.0		
4	108.48	187.0	215.0		
5	84.10	180.0	216.0		
6	48.44	194.0	215.0		
7	-48.44	223.0	212.0		
8	-84.10	254.0	211.0		
9	-108.48	230.0	215.0		
10	-128.50	205.0	215.0		
F1 Ayuda					

PITOMETRIA			Fichero: IMTALAB		
Ficheros	Datos	Resultados	Imprimir	Información	DOS
	Datos Generales Calibración Vel. central (datos generales) Vel. central (deflecciones en mm)				
	Med. 1				
1	220				
2	215				
3	217				
4	212				
5	213				
6	209				
7	220				
8	212				
9	212				
10	210				
F1 Ayuda					

PITOMETRIA				Fichero:	IMTALAB
Ficheros	Datos	Resultados	Imprimir	Información	DOS
		Perfil de velocidades			
Factor de velocidad Fv				0.89274	
Coeficiente C del Pitot				0.80500	
Area de la sección				0.08888	
Corrección debida a la válv. inserción				1.00000	
Bombas operando		V centr.	V media	Coef.Cc	Gasto
1	no	1.11	0.991	1.00000	88.10

F1 Ayuda



Gráfica 3.1 Perfil de velocidades medido en la tubería de la red del laboratorio (diámetro = 14")

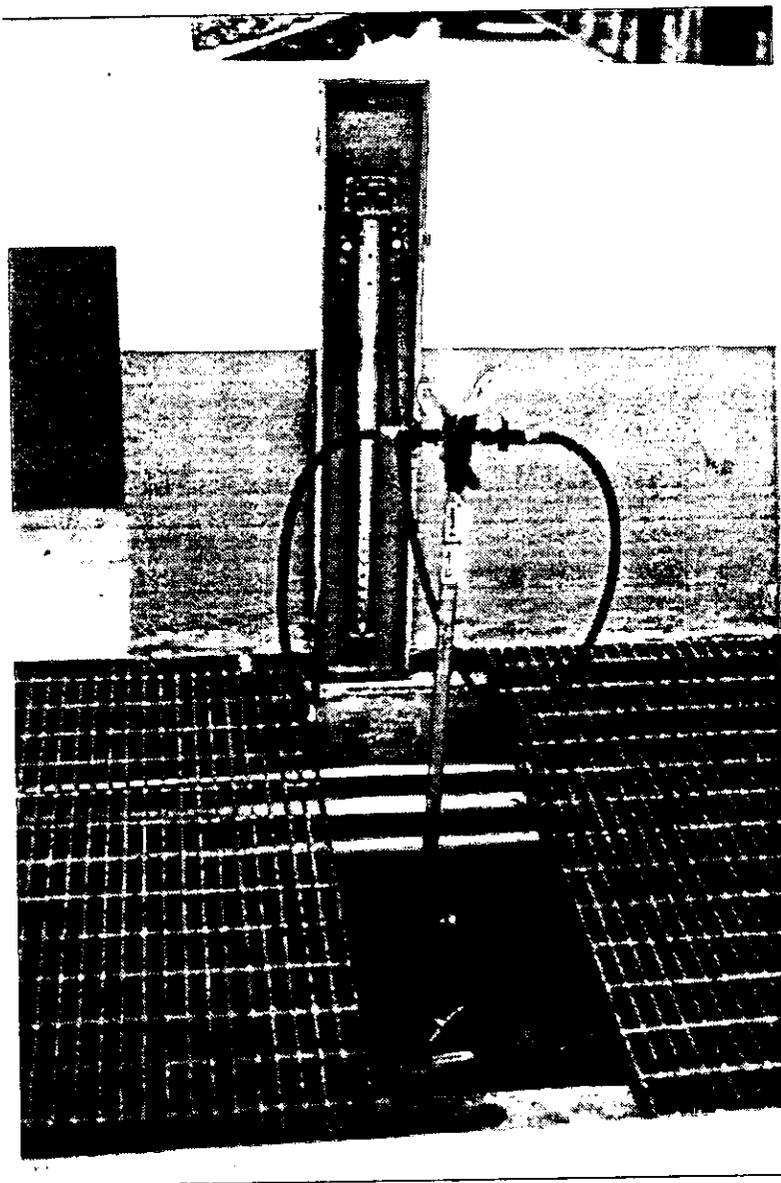


Foto 3.15 La estación pitométrica en la tubería de la red de alimentación a los módulos experimentales, se instaló próxima a la descarga hacia el tanque de llamada del Canal de Pendiente Variable, ateniéndose lo más posible a las especificaciones de instalación, sin embargo el tramo de tubería disponible quedó ligeramente fuera de los límites respecto a los accesorios antes y después, lo que posiblemente originó que la forma del perfil de flujo sea diferente al teórico esperado.

Una vez determinado el factor de velocidad de la tubería, se efectuó un aforo para determinar los gastos máximos y mínimos posibles de medir con el procedimiento de pitometría y con el líquido manométrico disponible*.

Para este caso, los datos empleados son los siguientes:

Densidad del fluido manométrico	$d = 1.495 \text{ kg/cm}^3$
Factor de velocidad para la tubería	$F.V. = 0.89274$
Area de la tubería	$A = 0.0888 \text{ m}^2$
Coefficiente del tubo de Pitot	$c = 0.805$

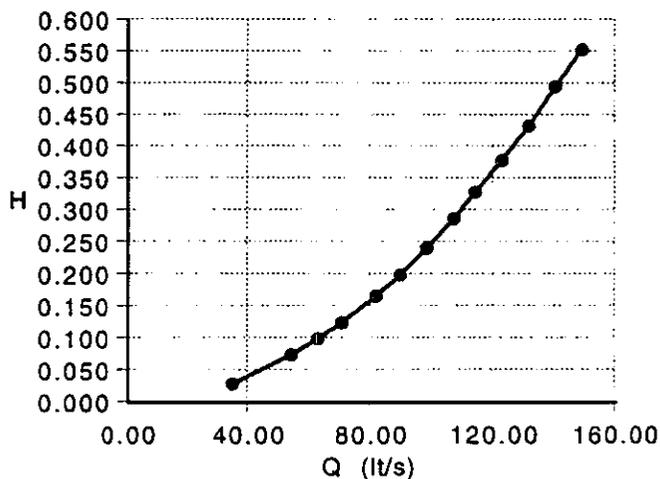
$$V_c = c \sqrt{2gH(d-1)} \quad [L \ T^{-1}] \dots\dots(3.1)$$

$$V_m = (F.V.) V_c \quad \dots\dots(3.2)$$

$$Q = A V_m \quad [L^3 \ T^{-1}] \dots\dots(3.3)$$

Tabla y gráfica de lecturas de carga de presión de estancamiento para la determinación del gasto.

H(m) Pitot	Vc(m/s)	Vm(m/s)	Q (lt/s)
0.030	0.43430	0.3877	34.46
0.073	0.67747	0.6048	53.75
0.098	0.78495	0.7008	62.28
0.126	0.89004	0.7946	70.62
0.167	1.02467	0.9148	81.30
0.202	1.12694	1.0061	89.42
0.242	1.23349	1.1012	97.87
0.289	1.34796	1.2034	106.96
0.330	1.44040	1.2859	114.29
0.378	1.54160	1.3763	122.32
0.435	1.65375	1.4764	131.22
0.495	1.76412	1.5749	139.98
0.556	1.86967	1.6691	148.35



*De acuerdo al manual del usuario del equipo de pitometria marca LEOPOLD.
 Bulletin No. SPE - 100, Leopold Simplex Pitot Equipment, Section I,
 Instructions for use of Simplex Pitot Tube and Manometer.,
 The F.B. Leopold Company 227 South Division Street Zelienople, Pennsylvania 16063., USA 1986.

Estos valores fueron obtenidos haciendo un aforo en la estación pitométrica para el canal de pendiente variable con el procedimiento recomendado por la International Standard ISO 2975 para medición de flujo de agua en conductos cerrados.

Con el líquido manométrico empleado se midieron: un gasto mínimo de 34 lt/s y un máximo de 148 lt/s. Para gastos menores a 34 lt/s debe emplearse un fluido manométrico de menor densidad y para gastos mayores de 150 lt/s debe usarse mercurio.

Máximo gasto medido en la estación pitométrica: 148 lt/s

Mínimo gasto medido en la estación pitométrica: 34 lt/s

Los gastos menores de 100 lt/s se pueden medir fácilmente en el canal Rehbock. Gastos mayores a 100 lt/s provocan en el canal de llamada del medidor Rehbock fuertes turbulencias y altas velocidades de acercamiento al vertedor.

Será conveniente emplear algún tipo de dissipador de energía para poder medir gastos mayores en esta estructura.

3.2.3. Levantamiento longitudinal del perfil de fondo.

Debido a la flexibilidad del acrílico empleado en la plantilla del canal se efectuó un levantamiento topográfico longitudinal en tres ejes paralelos con el fin de identificar la deformación del fondo y en su caso efectuar correcciones. En las ordenadas de las siguientes gráficas se aprecia la elevación en cm y en las abscisas la longitud del canal en cm. El cero se tomó a la entrada del canal.

En dichas gráficas se puede apreciar que predomina una deformación del fondo del canal hacia la mitad de la sección de trabajo. Se graficó la media y la desviación estandar para los datos obtenidos en el eje del canal. En estas gráficas se aprecia un desnivel entre el punto medido más alto y el más bajo de 1cm.

	MARGEN DERECHA	EJE CENTRAL	MARGEN IZQUIERDA
MEDIA	33.71	33.67	33.59
DESVIACION STD	0.1578	0.1659	0.1804

Este desnivel se corrige soportando con cuñas metálicas apoyadas entre la placa del fondo (acrílico) y las soleras del fondo de cada módulo del canal y será conveniente efectuar esta corrección con objeto de garantizar los resultados de experimentos en los que influya la deformación de la plantilla del canal.

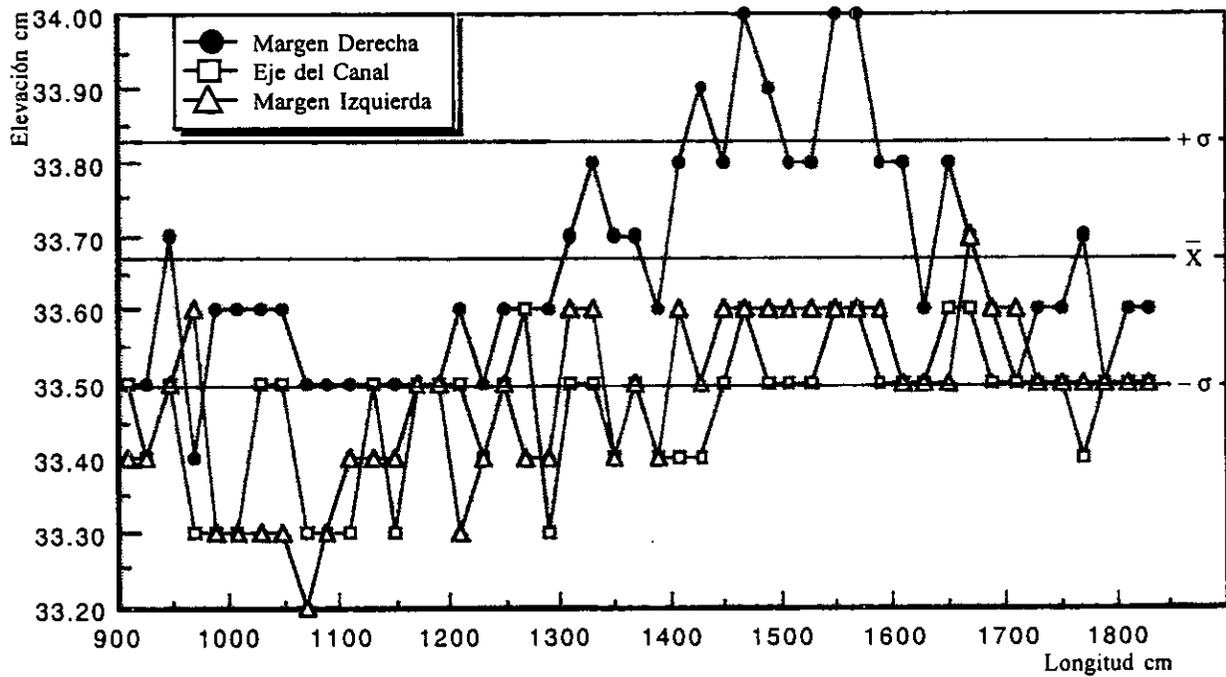
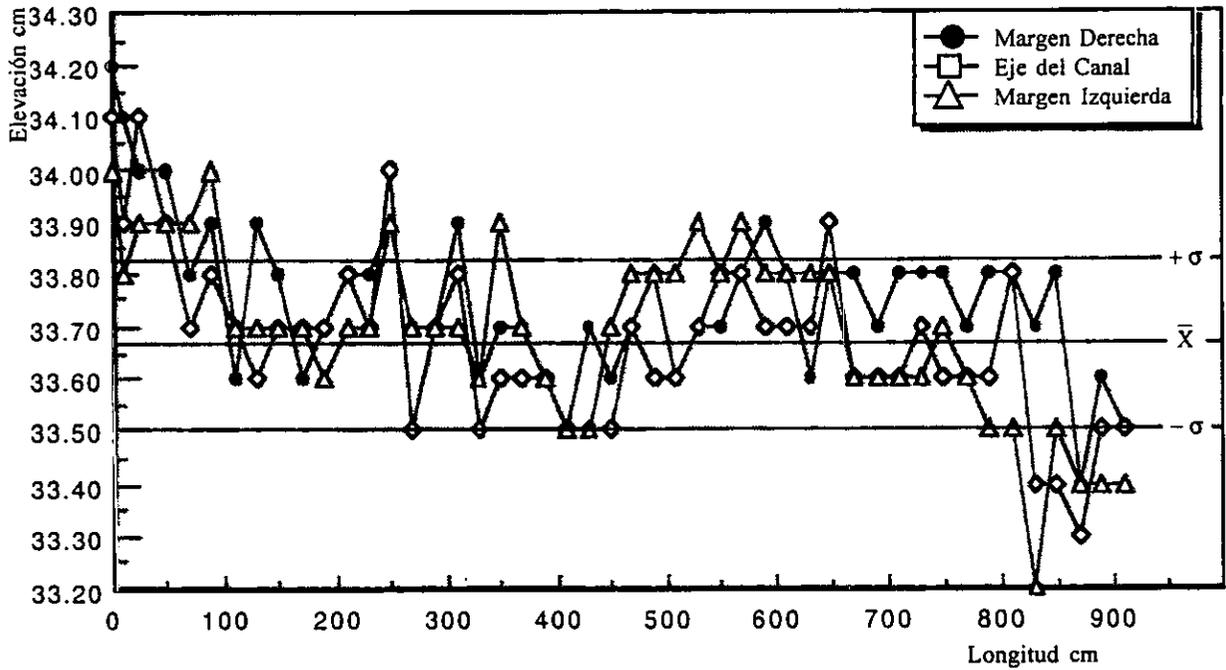
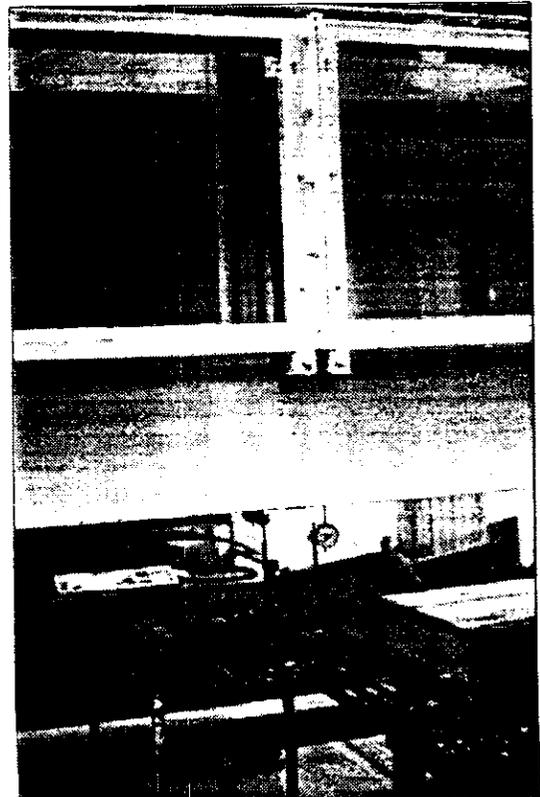




Foto 3.16 Medición de la deformación de la viga del bastidor del canal de pendiente variable.

Foto 3.17 Se llenó paulatinamente el canal y se registraron las lecturas de los micrómetros. La deformación fue de un 38% del total esperado, considerando que el tirante no alcanzó la altura total de la sección de trabajo, que es de 70 cm.

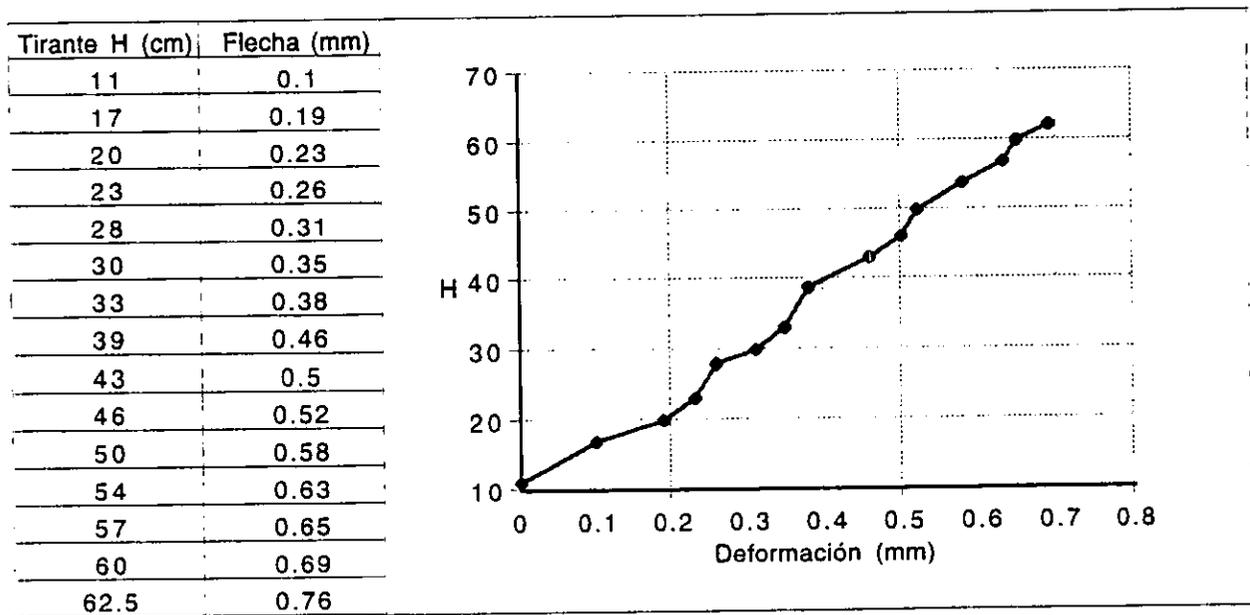


3.2.4. Medición de la flecha de la viga.

En el diseño de la viga que soporta la sección de trabajo, se consideró una flecha máxima de 2mm cuando la sección está totalmente llena. Para probar el efecto de la carga en la deformación del bastidor, se colocaron micrómetros con resolución 0.01mm al centro de cada claro, es decir, al centro de los apoyos del canal de pendiente variable. Posteriormente se cerró la compuerta a la salida de la sección de trabajo y se fué llenando hasta alcanzar un tirante de 62.5cm, (que es el máximo que permite el tamaño de la compuerta) con lo que se midió una flecha máxima de 0.76mm, mucho menor a la deformación esperada.

En la gráfica se aprecia el comportamiento de la deformación medida en el claro mas grande (6.15m).

Al vaciar, la deformación de la viga se eliminó, siendo la recuperación de la viga totalmente elástica.



3.2.5. Planos complementarios.

Se elaboraron los planos de las partes y piezas que se modificaron, con el fin de integrar la totalidad del proyecto tal y como se concluyó.

Los planos son:

Vista lateral del canal de pendiente variable

Planta General del canal de pendiente variable

Bastidor Canal - Planta

Tanque de llamada - Vistas

Sistema hidráulico -Esquema de inyección hidráulica

Sistema de elevación - Detalle de ensamble de cilindros en apoyo 3

Detalle unión articulación-zapata

Ubicación de soportes

Componentes de soporte

Soporte del canal de pendiente variable, vista lateral

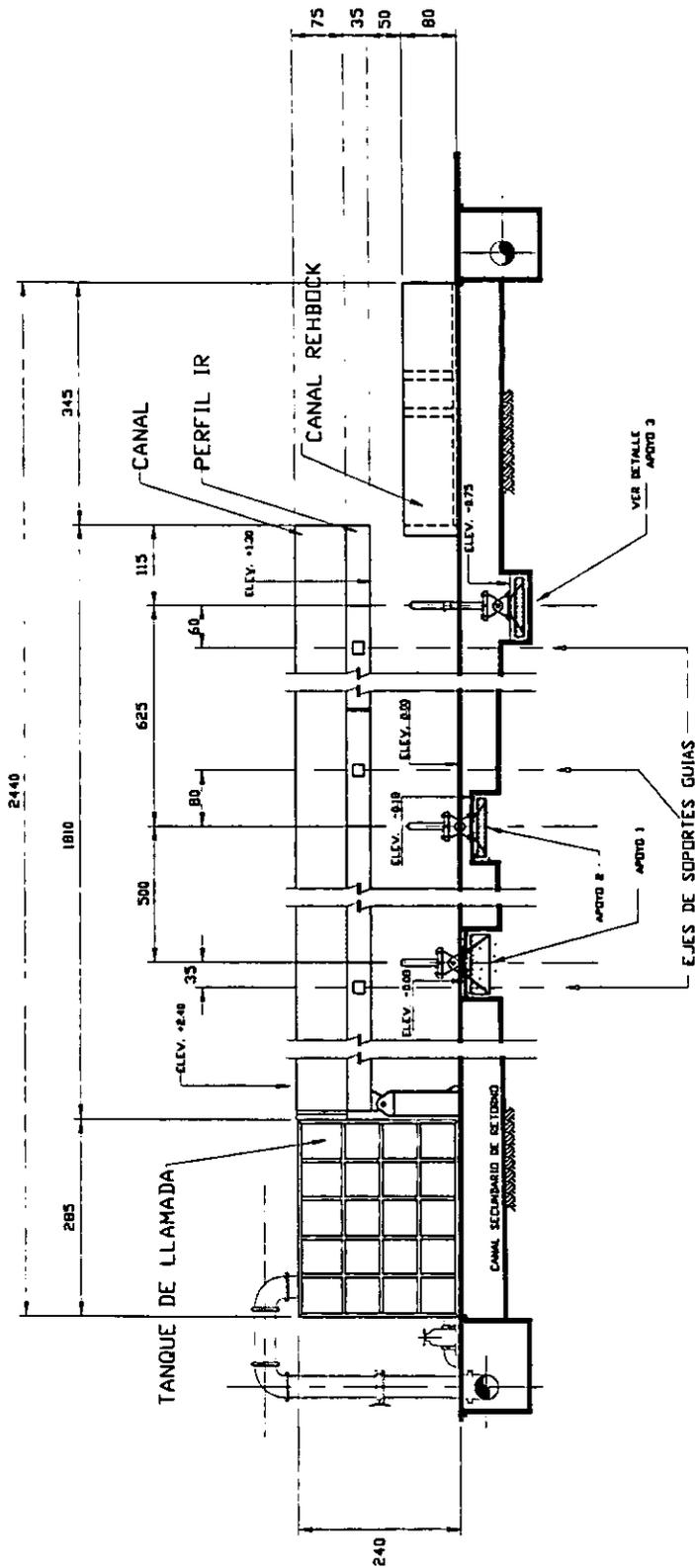
Soporte del canal de pendiente variable, detalle

Soporte principal

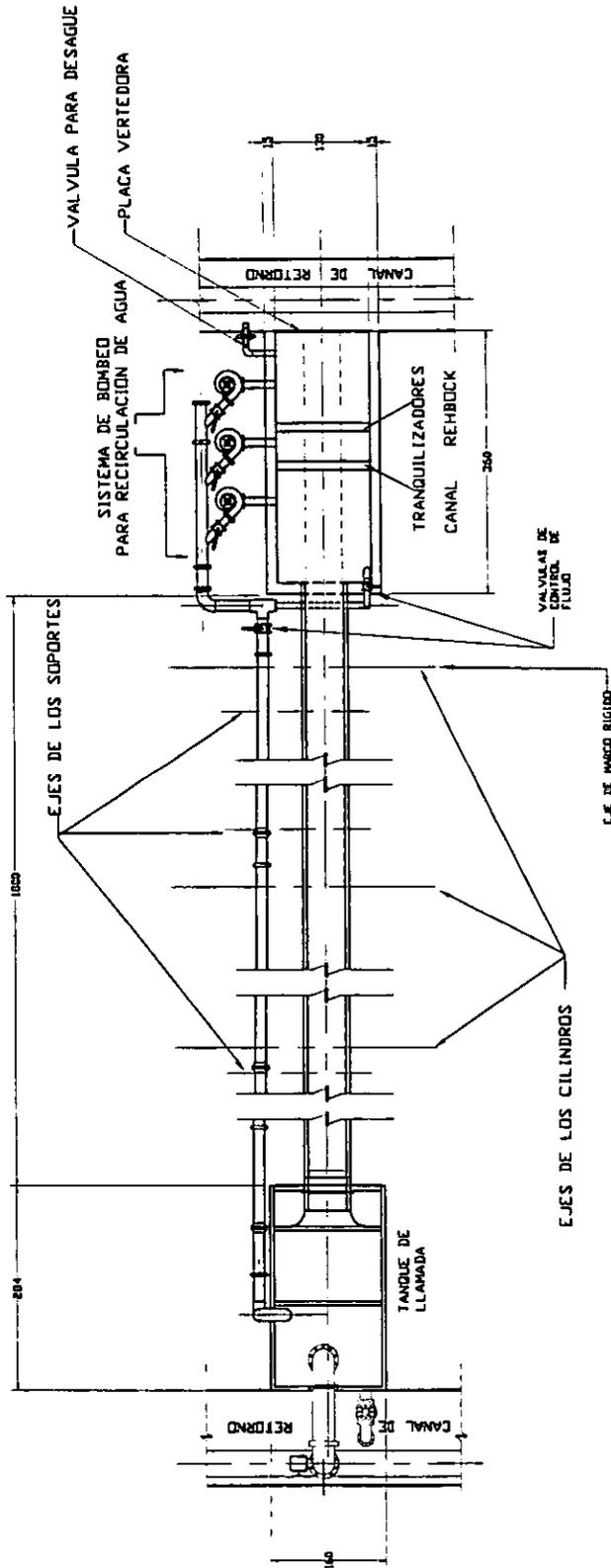
Marco rígido de perfil estructural

Sistema eléctrico - Ubicación y diagrama unifilar

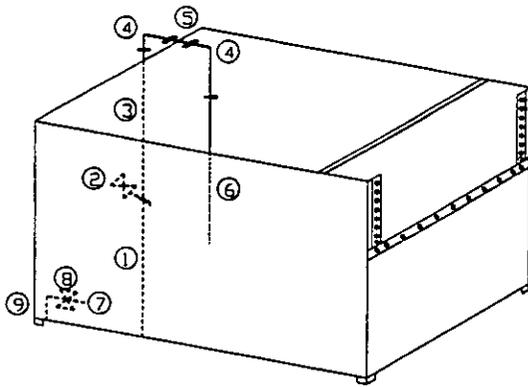
Base del centro local de control de motores



 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
VISTA LATERAL	
DISEÑO INGENIERO RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA
DIBUJO J. OCTAVIO DOMÍNGUEZ M.	HOJA 14



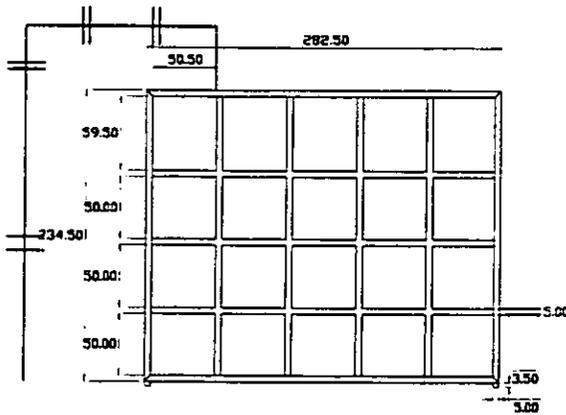
 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANTA GENERAL	
DISEÑO ING RICARDO A. ALVAREZ B	ESCALA
DIBUJO J. OCTAVIO DOMINGUEZ M	FECHA 14/01/18



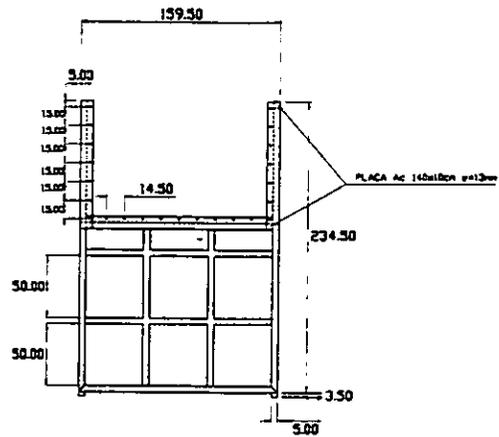
LISTA DE MATERIALES

- 1 Reducción bridada de acero de 14"x12.4 cm
- 2 Válvula de mariposa motorizada de 12" de diámetro
- 3 Carrete de acero de 12"x133 cm
- 4 Codo bridado de acero de 12"x90°
- 5 Carrete de acero de 12"x57 cm
- 6 Extremidad de acero de 12"x204 cm
- 7 Extremidad de acero de 6"x30 cm
- 8 Válvula de compuerta de 6" de diámetro
- 9 Codo de Fo. Fo. de 6"x90°
- 10 Solera 1 1/2 x 1/4 " perforada

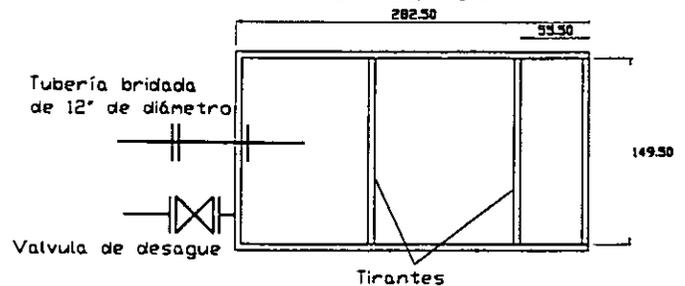
VISTA LATERAL



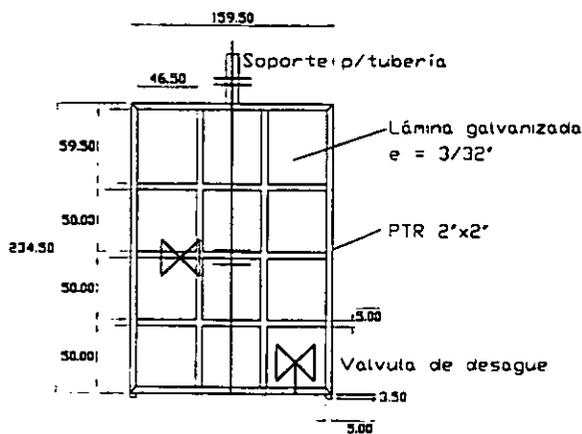
VISTA FRONTAL



VISTA DE PLANTA

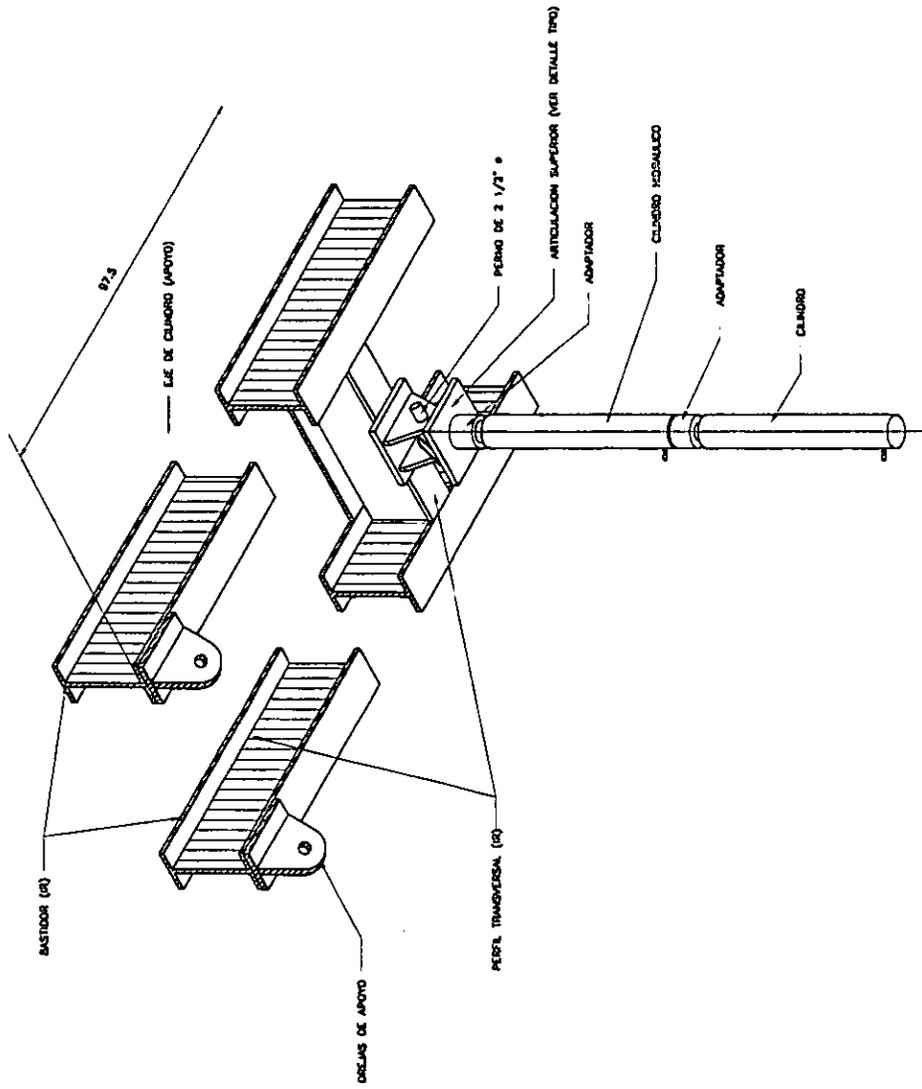


VISTA POSTERIOR



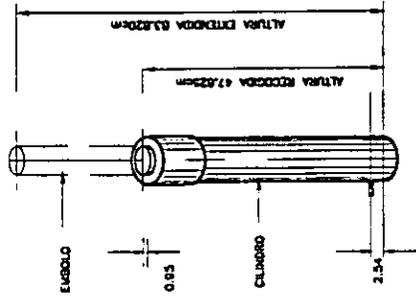
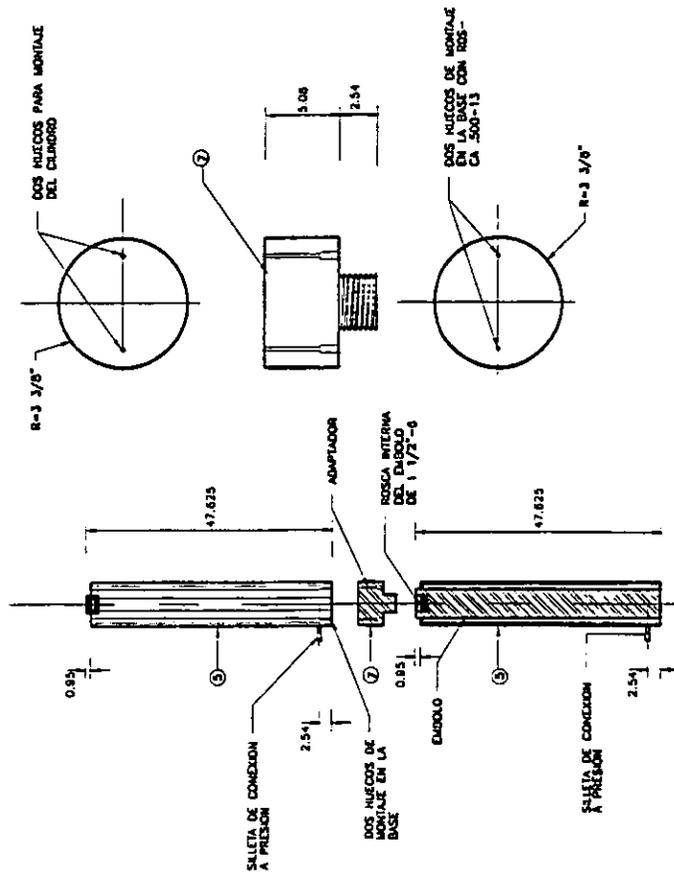
 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA		
CODA		
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE		
PLANO		
TANQUE DE LLAMADA		
DISENO	ING. RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA
DISUJO	ALEJANDRO MORENO M.	ACOT. CM

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
CILINDRO - ARTICULACION - BASTIDOR	
DISEÑO ING. BECARRO A. ALVAREZ B.	ESCALA 1/1" = 1'-0"
MODELO J. OCTAVIO RODRIGUEZ M.	HOY 18



CILINDROS PARA APOYO 3

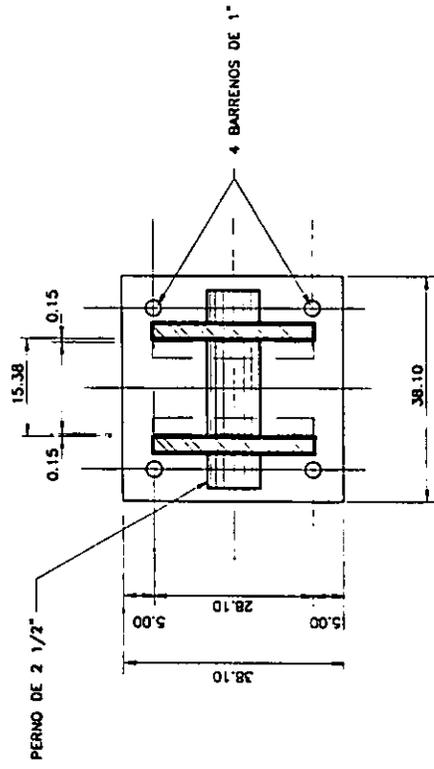
ISOMETRICO VISTA INFERIOR



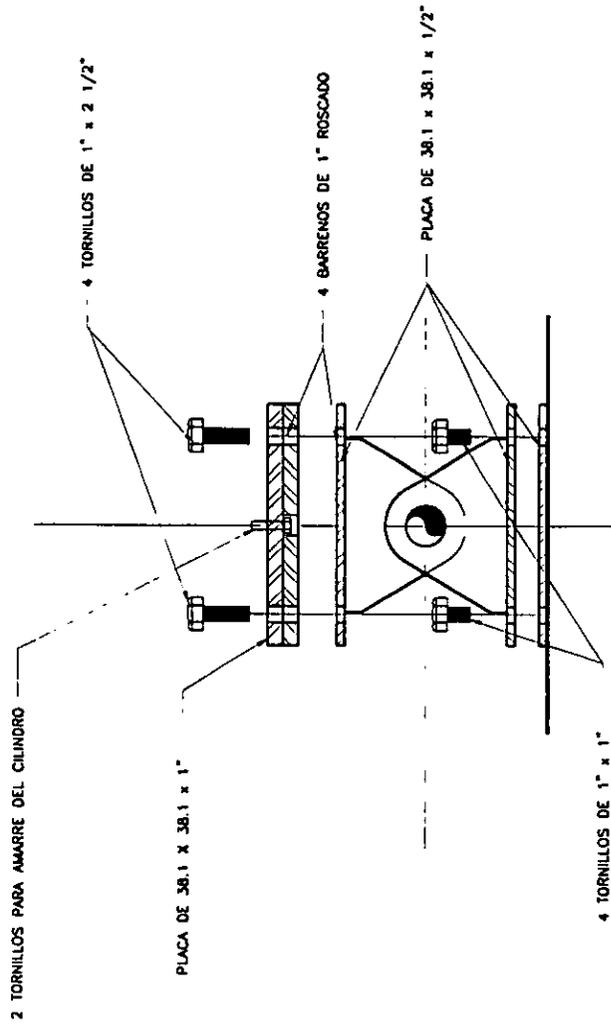
CILINDRO HIDRAULICO DE EMBOLO SOLIDO
 MODELO RC-2514
 SIN ESC.

DETALLE DE ENSAMBLE DE CILINDROS EN APOYO 3
 SIN ESC.

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
SISTEMA DE ELEVACION	
SEALA	INSCALA
PLANS	INPLANS
DISEÑO DRG RICARDO A. ALVAREZ B.	DISEÑO J. OCTAVIO DOMINGUEZ M.
DISEÑO J. OCTAVIO DOMINGUEZ M.	DISEÑO J. OCTAVIO DOMINGUEZ M.

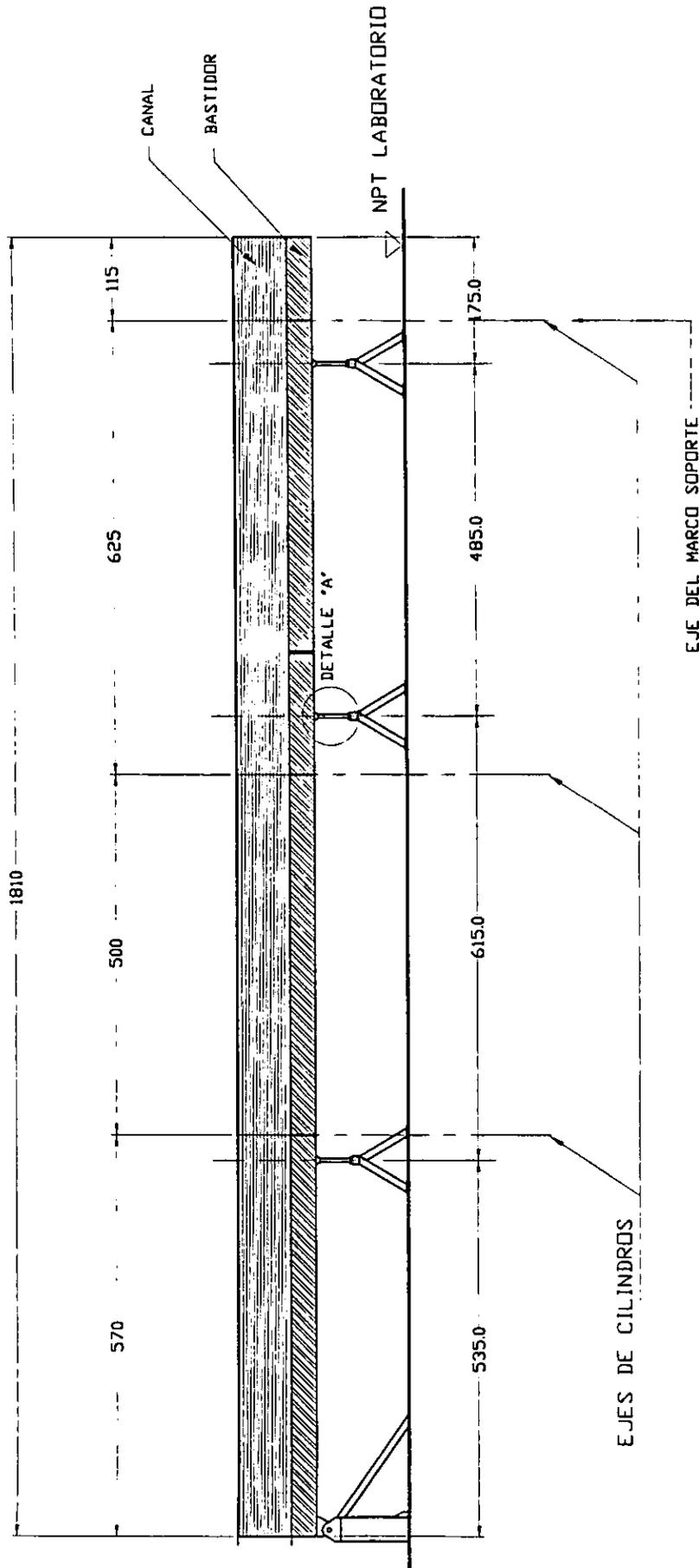


PLANTA



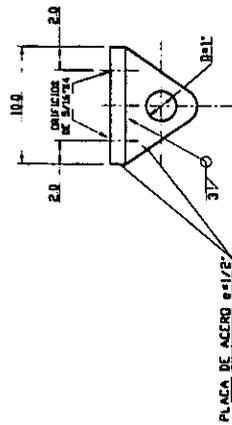
ELEVACION

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
DETALLE UNION ARTICULACION-ZAPATA	
PROYECTO	ING. RICARDO A. ALVAREZ B.
ESCALA	1:1
REVIZOR	J. OCTAVIO DOMÍNGUEZ M.
FECHA	14/01/18

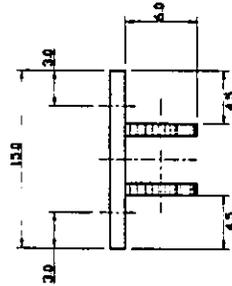


 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
VISTA LATERAL	
DISEÑO ING RICARDO A. ALVAREZ B	ESCALA
CALIFICADO J. OCTAVIO DOMÍNGUEZ M	FECHA 14/07/08

UBICACION DE SOPORTES



VISTA LATERAL

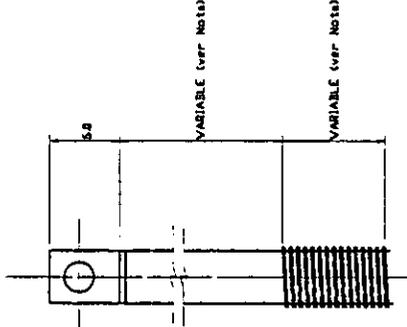


VISTA FRONTAL

ELEMENTO DE UNION BASTIDOR-SOPORTE

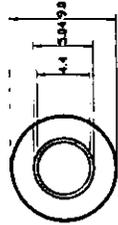


VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL

BARRA DE ACERO ROSCADA

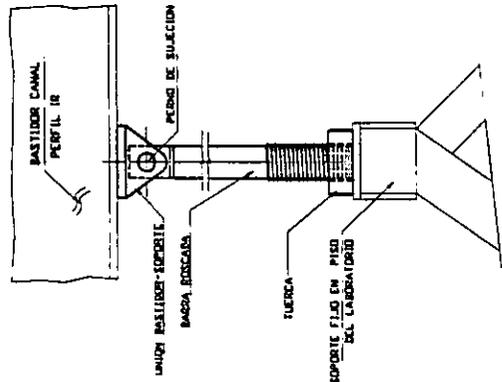


VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL

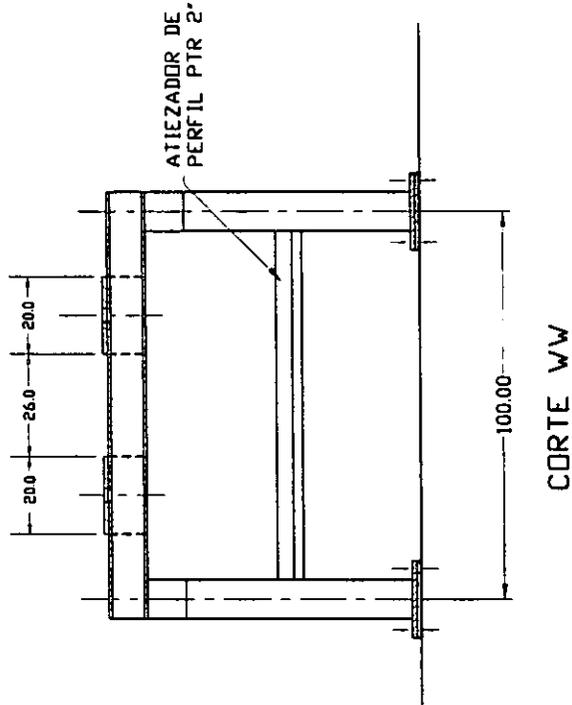
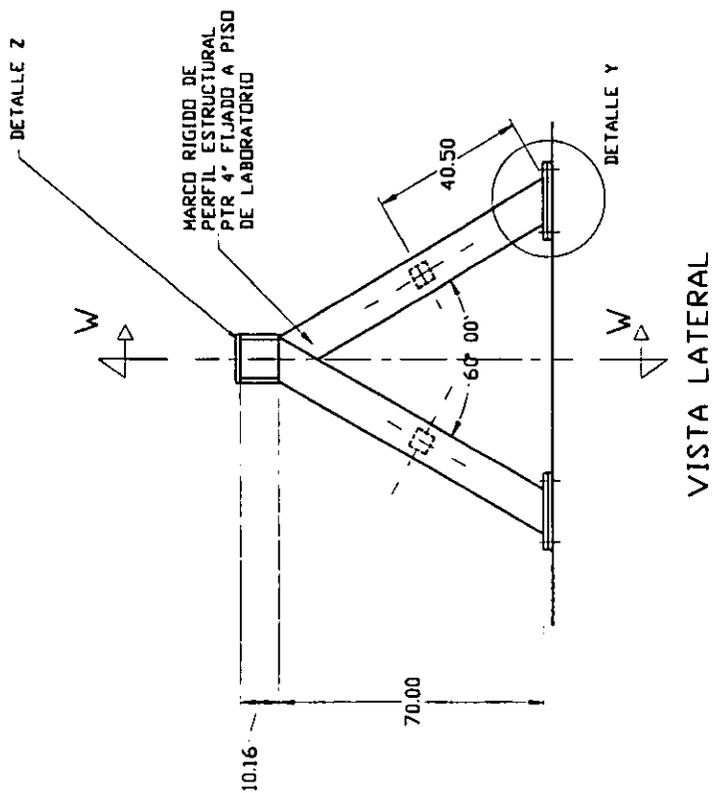
TUERCA PARA FIJACION DE NIVEL DEL CANAL



DETALLE "A"
CONJUNTO

NOTA
 LAS LONGITUDES DE BARRA ROSCADA EN LA UBICACION DEL SOPORTE EN EL BASTIDOR DEL CANAL ASI PUES, EL MAS ALICADO DEL TANGUE DE LLAMADA TENDRA CUERDA EN CADA TOTA SU LONGITUD.
 LA TUERCA FUNCIONA SOLO COMO SOPORTE UNA VEZ QUE EL CANAL SE UBICABA EN EL NIVEL DEBIDO AL BASTIDOR DEL CANAL Y AL BASTIDOR DEL TANGUE DE LLAMADA TENDRA CUERDA EN CADA TOTA SU LONGITUD.

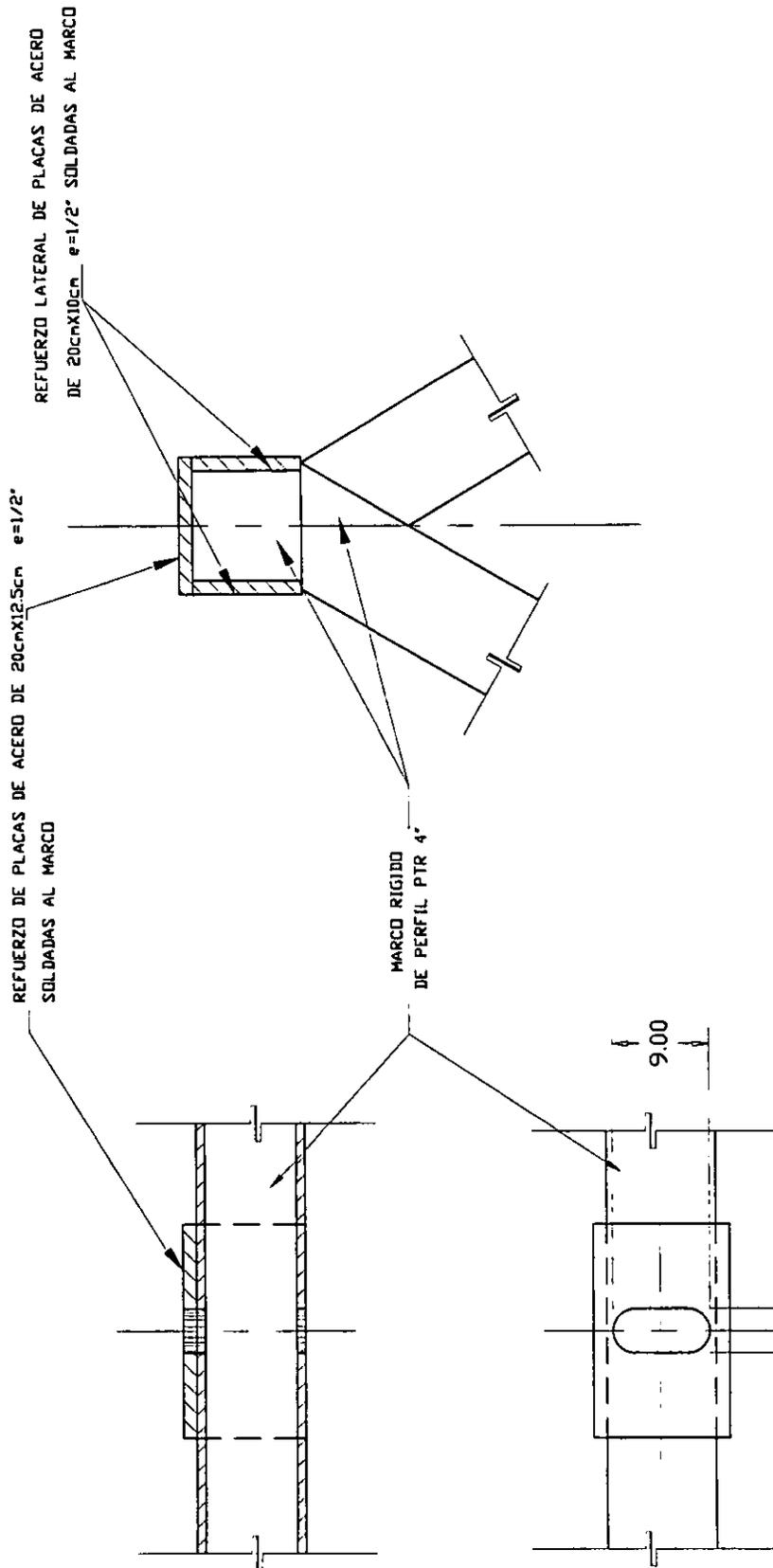
IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
COMPONENTES DE SOPORTE	
DISEÑO ING RICARDO A. ALVAREZ B	ESCALA 1:1
DIBUJO J. OCTAVIO DOMINGUEZ M	HOJA N. 401 DE 40



CORTE WW

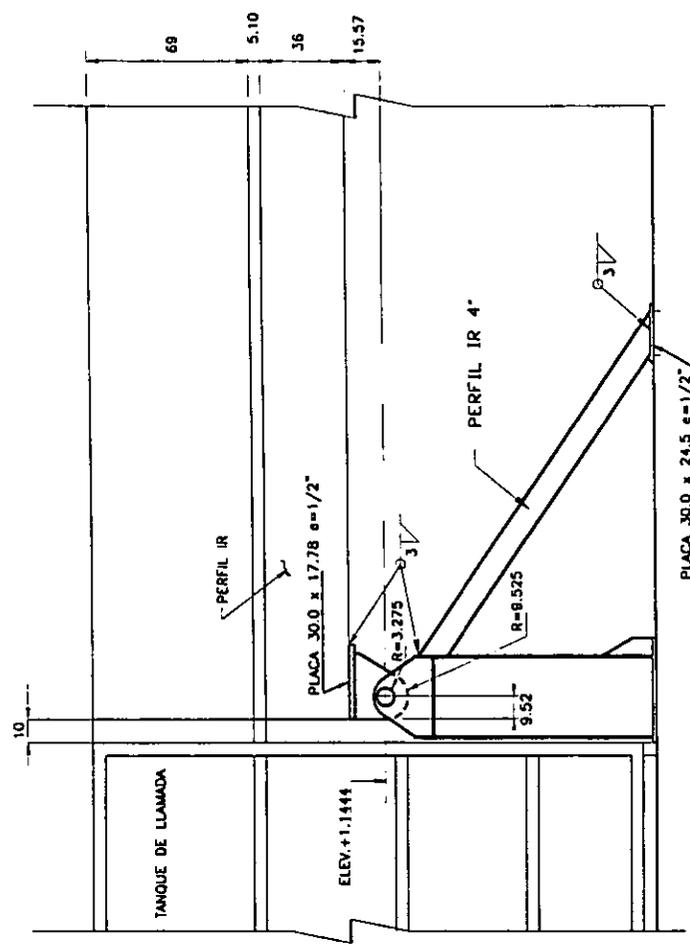
VISTA LATERAL

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
OSEA CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
N.º PROY. SOPORTE	
CEE/66 ING RICARDO A ALVAREZ B	ESCALA
DESAR. J OCTAVIO DOMINGUEZ M.	FECHA ABR 14

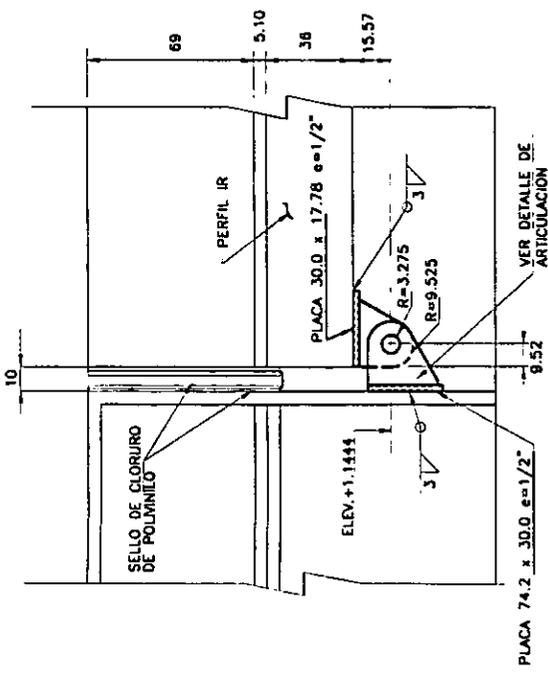


 IMTA INSTITUTO VENEZOLANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO	SOPORTE
DISEÑO	DRG. RICARDO A. ALVAREZ B.
ESCALA	1:1
FECHA	1 OCTUBRE 2008

DETALLE Z



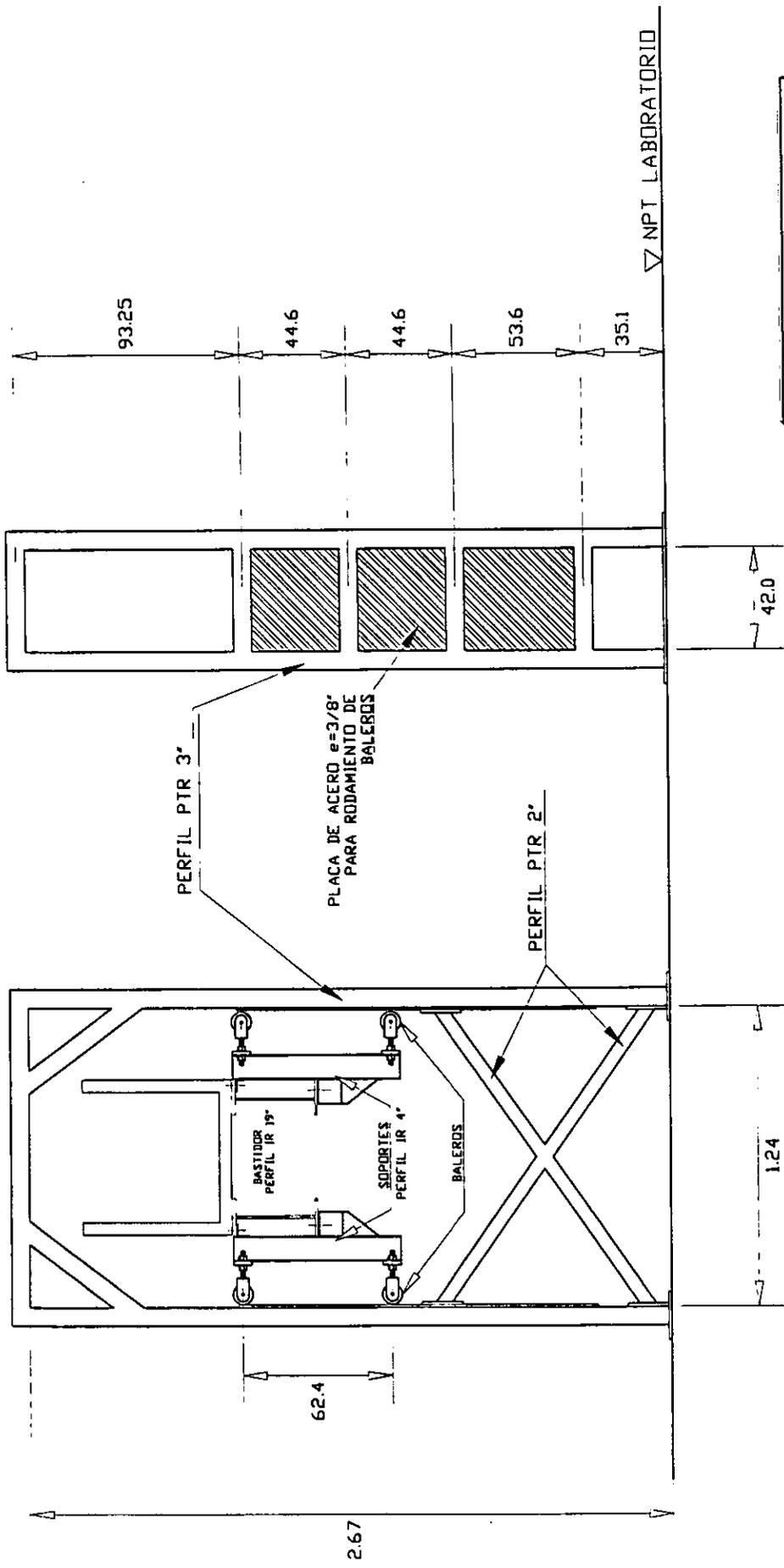
PROPUESTA FINAL



PROPUESTA ORIGINAL

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
OBRA: CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO: SOPORTE PRINCIPAL	
DISEÑO: ING RICARDO A ALVAREZ B	ESCALA:
DIBUJO: J OCTAVIO DOMINGUEZ M	ADO: 08

CAMBIOS REALIZADOS



▽ NPT LABORATORIO

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	ESCALA
MARCO RIGIDO DE PERFIL ESTRUCTURAL	AUT.
ING. RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA
J. OCTAVIO DOMINGUEZ M.	AUT.

VISTA LATERAL

VISTA FRONTAL

CROQUIS DE CONJUNTO

DISEÑO MODIFICADO

UBICACION DE LA ACOMETIDA ELECTRICA

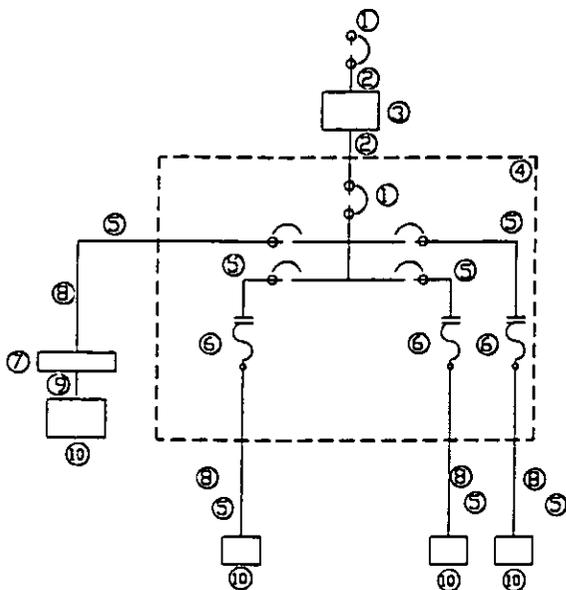
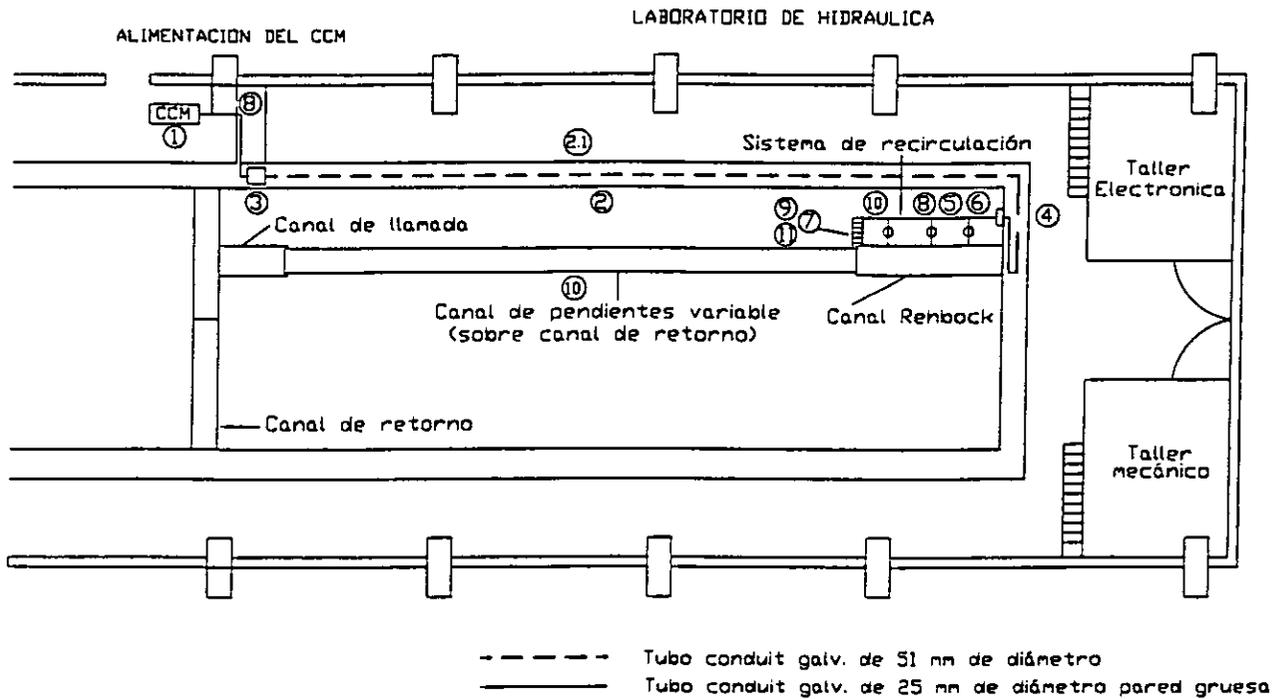


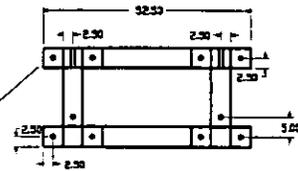
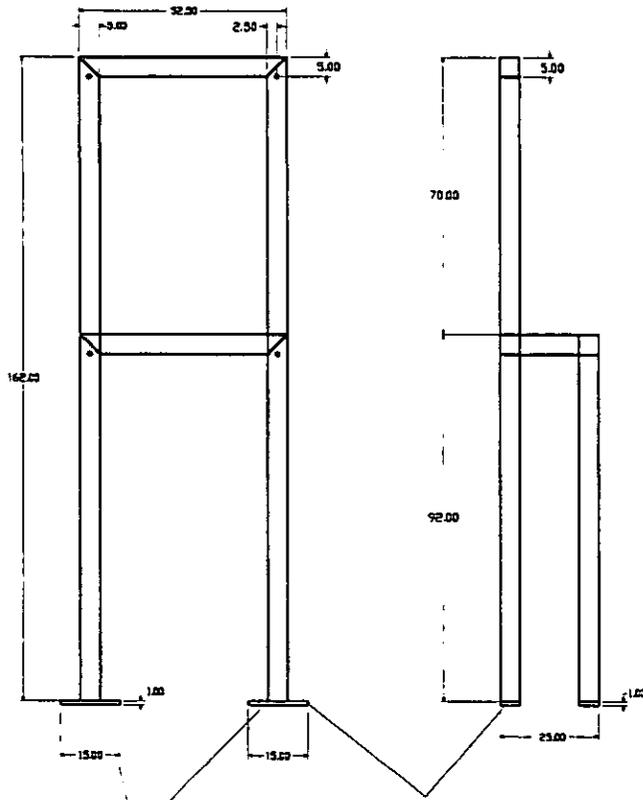
DIAGRAMA UNIFILAR DE DISTRIBUCIÓN

LISTA DE MATERIALES

- 1 Interruptor termomagnético 3x50 Amp. a 240 V.
- 2 3 conductores #4 AWG, 600 V., 1 conductor desnudo #8
- 2.1 Tubo conduit pared gruesa de 51 mm de diámetro
- 3 Electronegistro serie rectangular
- 4 Centro local de carga de motores
- 5 2 conductores # 10 AWG, 1 conductor desnudo #14
- 6 Arrancador tipo perilla
- 7 Arrancador manual reversible 15 A. a 220 V trifasico
- 8 Tubo conduit pared gruesa de 25 mm de diámetro
- 9 3 conductores para uso rudo 1x14 AWG
- 10 Motobombas de 3 H.P. 220/440 V.
- 11 Motorreductor de 1/2 H.P. 220/440 trifasico con freno electromagnético

IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
CANA CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO SISTEMA ELECTRICO	
DISEÑO	ING. RICARDO A. ALVAREZ B.
DISEÑO	ALEJANDRO MORENO M
ESCALA	ACOT

OR 51 mm x 51 mm x 4.0 mm



VISTA EN PLANTA

Perforaciones de 11.1 mm (7/16") de diámetro para tornillos de cabeza hexagonal de 63.5 mm x 9.5 mm

Perforaciones de 11.1mm (7/16") de diámetro

Solera 51 mm x 7.9 mm

VISTA DE FRENTE

VISTA LATERAL

Nota: la base será empotrada al piso con 8 taquetes de expansión metálicos, con tornillos de cabeza hexagonal de 9.5 mm (3/8) de diámetro con tuercas y roldanas

 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA	
OBRA CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	
PLANO "BASE DEL CENTRO LOCAL DE CONTROL DE MOTORES"	
DISEÑO ING. RICARDO A. ALVAREZ B.	ESCALA
DIBUJO ALEJANDRO MORENO M.	ACOT. CG

4 INSTRUMENTACION BASICA

En este capítulo se señalarán los equipos básicos de medición con los que se debe contar en un módulo experimental como es el caso del canal de pendiente variable, describiendo su empleo característico.

En todo caso, para un experimento que requiera de alta precisión en la medición de los parámetros de interés, deberá revisarse la instalación y prevenir la instrumentación adecuada al nivel de los estudios que se estén desarrollando, teniendo en cuenta la aproximación requerida y los posibles errores que se pueden cometer en el proceso de medición (errores sistemáticos y aleatorios).

Las mediciones que generalmente se realizan son la elevación de la superficie libre del agua, presiones, velocidad de la corriente y gastos; y se visualizan las trayectorias de las líneas de corriente.

4.1 Medición de tirantes o niveles.

Para medir el tirante o nivel de agua en una sección transversal se emplean limnímetros, los cuales pueden ser de gancho o punta.

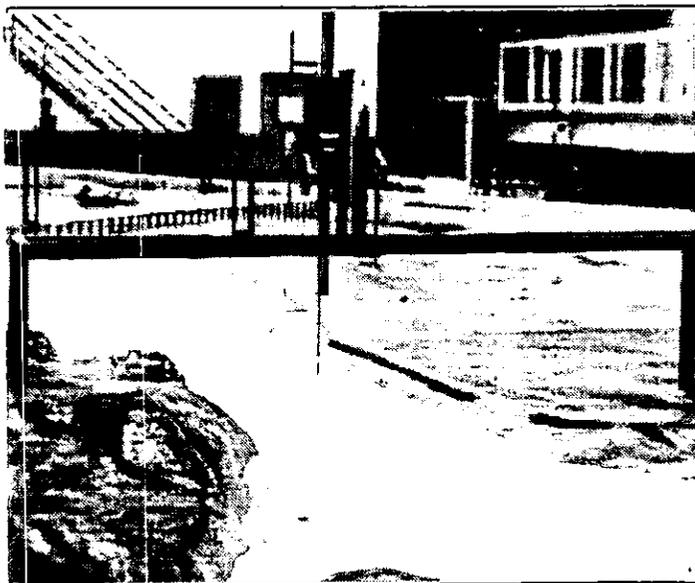


Foto 4.1 Limnómetro de punta para medir niveles en un modelo hidráulico

Este aparato tiene una regla graduada y un vernier. Los terminados en punta se utilizan para medir directamente la elevación del agua cuando esta en movimiento y los de gancho cuando está en reposo.

Resulta más fácil medir cuando el nivel del agua no se mueve, para lo cual se emplea el principio de los vasos comunicantes, conectando al área de interés, por medio de un conducto

flexible, un pequeño depósito dentro del cual el agua estará en reposo y se mantendrá al nivel del área de interés. Debe tomarse en cuenta que al tocar la superficie del agua intervendrá inmediatamente la tensión superficial y ocasionalmente no resulta claro cual es el punto a medir sobre todo si se requiere de mucha precisión. Para disminuir el error que pudiera cometerse (se estima un error de casi 1mm) es recomendable que se establezca siempre el mismo procedimiento para acercar la punta del limnómetro a la superficie del agua. Por ejemplo, acercar lentamente la punta y en el instante en el que se forme el menisco por efecto de la tensión superficial, se deberá tomar la lectura en la escala.

La manguera y el depósito harán las veces de un filtro de onda, siendo muy poco sensible a los cambios de alta frecuencia (oleaje), y responderá mas lento a las variaciones del nivel de agua (onda de baja frecuencia) en el área de interés, mientras más estrecho sea el diámetro de la manguera y más grande el área transversal del depósito. Por esto es importante permitir un lapso de tiempo apropiado para que se efectúe la lectura y ésta sea representativa del nivel del agua en el área de interés.

Otro punto a considerar en el empleo de este instrumento, es que debe tomarse siempre un nivel de referencia, que puede ser el fondo del canal, o los rieles del carro de soporte para equipos de medición del canal de pendiente variable o bien, algún otro definido arbitrariamente, para que todas las lecturas sean congruentes.

Cuando el agua está en movimiento y es necesario hacer mediciones directamente sobre el área de interés, la punta debe acercarse lentamente y fijar su posición, en la que en promedio, la punta es tocada el mismo número de veces por el agua en un intervalo de tiempo dado.

Los limnómetros tienen una capacidad de medición tal que en un intervalo de 50cm registran las variaciones de nivel hasta con una precisión de 0.1 mm.

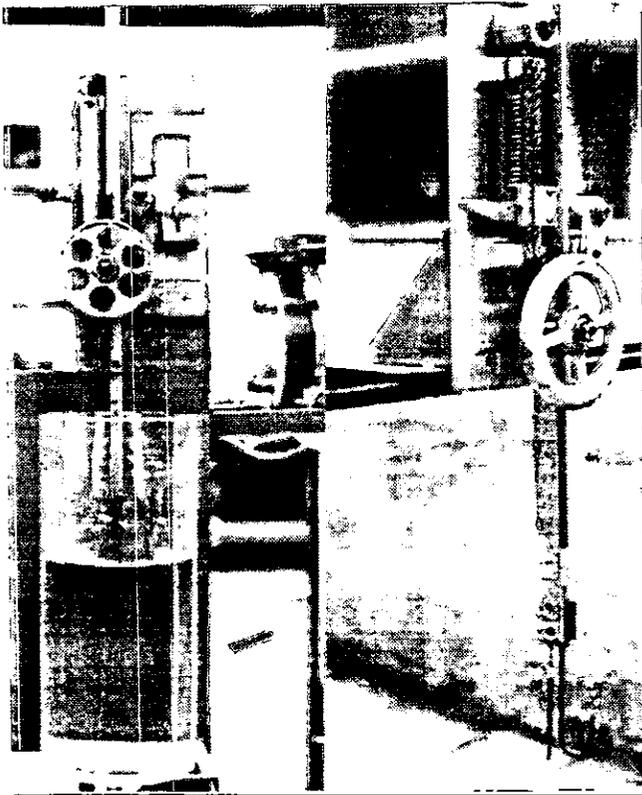


Foto 4.2 Limnómetro con punta y gancho

4.2 Medición de presiones.

La presión es una fuerza por unidad de área. Como tal, tiene las mismas unidades de esfuerzo, (las fuerzas resultantes de las fatigas en los sólidos se designan como esfuerzos), y en sentido general puede considerarse como un tipo de esfuerzo, sin embargo el concepto de presión solo se limita a los sistemas fluidos.

Se considera para fines prácticos, presiones

manométricas y absolutas. La presión manométrica representa la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local, presión que por lo regular se emplea

como punto de referencia.

La unidad estándar del sistema internacional (SI) para la presión es el Newton por metro cuadrado (N/m^2) o pascal (Pa), aunque con frecuencia, la presión se expresa en términos de la altura de una columna de fluido, por ejemplo mercurio, el cuál, a una temperatura de 20 °C soporta la presión atmosférica estándar, con una columna de 760 mm de altura. (La densidad del mercurio es $13.5951 g/cm^3$).

1 Kgf / cm ²	=	10 m. c. a. (metros de columna de agua)
1 atmósfera (atm)	=	1.01325 x 10 ⁵ Pa
1 atmósfera (atm)	=	1.01325 Kgf /cm ²
1 bar	=	100 KPa
1 torr	=	1 mm de Hg

En los estudios de Ingeniería que involucran fluidos, la cuantificación de la presión resulta de gran importancia, pues su magnitud condiciona otros parámetros que ayudan a entender el fenómeno físico en cuestión. De acuerdo con la ecuación fundamental de la estática de los fluidos, se define la presión como:

$$P = \gamma H \dots\dots\dots(4.1)$$

donde:

$$P = \text{Presión [F, L}^{-2}\text{]}$$

$$\gamma = \rho g = \text{Peso específico del fluido [F, L}^{-3}\text{]}$$

$$H = \text{Columna del fluido [L]}$$

con lo que; si se conoce la presión, se puede determinar la profundidad de inmersión o el equivalente de una columna de fluido de peso específico dado.

La presión puede medirse con diversos tipos de instrumentos dependiendo de si la presión es estática o dinámica. En el primer caso se puede emplear un manómetro de Bourdon, o un manómetro de columna de fluido (conocido como piezómetro si el fluido es el mismo del sistema por medir), o un micromanómetro para pequeñas presiones ó por medio de transductores electrónicos si lo que se pretende es medir la variación en el tiempo de la presión (presión dinámica).

4.2.1 Piezómetro

Este instrumento de medición es frecuentemente empleado en estudios de conducciones de agua a superficie libre, midiendo pequeñas presiones.

Está formado por un conducto de plástico transparente, conectado uno de sus extremos al punto donde se desee hacer la medición mediante un cuerpo cilíndrico (metálico o plástico) que tiene un orificio en su eje, y el otro extremo abierto a la atmósfera . El diámetro del conducto de plástico debe ser por lo menos de 10 a 15 mm para reducir el efecto de la tensión superficial. El orificio

del cuerpo cilíndrico puede ser de 0.39 m hasta 6 mm, ésta última medida se recomienda para conductos cerrados de diámetros mayores a 50.8 mm^{*}. El orificio debe instalarse de tal manera que quede perpendicular a la pared del conducto, sin aristas redondeadas ni bordes o rebabas que puedan causar errores de medición. El diámetro del orificio del piezómetro funciona como un filtro, mientras más pequeño sea, la lectura será menos sensible a fluctuaciones de presión de alta frecuencia y por lo tanto debe efectuarse la lectura del piezómetro después de un lapso de tiempo suficiente para que el nivel que indique sea el que se desea medir. Un orificio de 1 mm es lo más común en canales. Al emplear este dispositivo se debe tener la precaución de que tanto en el cuerpo cilíndrico como en el tubo flexible que lo conecta al dispositivo de medición (tubo transparente con escala donde se observa la altura de la columna de agua) no existan burbujas de aire, ya que éstas se comprimen y provocan variaciones en la altura de la columna de agua.

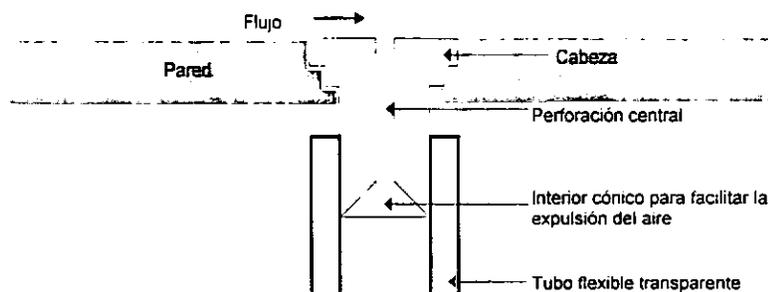


Fig. 4.1 Piezómetro

Cuando las presiones son menores que la atmosférica, el piezómetro puede ser usado siempre y cuando la colocación de la columna sea la adecuada para poder medir la presión de vacío.

4.2.2 Manómetros de Bourdon

Son producidos comercialmente y existen muchos y de un amplio espectro de medición de presión, no solamente presiones mayores que la atmosférica sino también de vacío, estos dispositivos son empleados para medir la presión en un punto o diferencias de presión entre dos puntos. En el caso de la instalación del canal de pendiente variable, es más común emplear piezómetros debido al tamaño de las presiones que se manejan.

* R. W. MILLER, *Flow measurement engineering handbook*, Second Edition, Mc Graw Hill Co. USA, 1989

4.2.3 Celdas de presión

Un gran número de dispositivos medidores transforman los valores de las magnitudes físicas en señales equivalentes, es decir, son dispositivos en los cuales hay conversión de energía, por ejemplo, energía mecánica a energía eléctrica. Dichos dispositivos se llaman transductores; normalmente tienen una fuente auxiliar de potencia que suministra gran parte de la potencia de salida, lo cual permite hacer las mediciones. Las celdas de presión o transductores pueden emplearse para registrar señales de baja frecuencia y aún estáticas o bien ser empleadas para registrar variaciones de presión de alta frecuencia de acuerdo a su diseño.

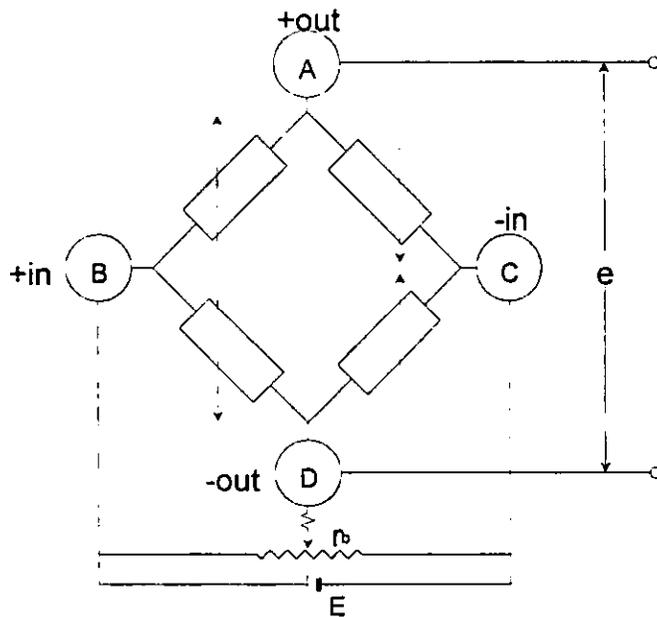


Fig. 4.2 Circuito básico del puente de Wheatstone

Estos transductores funcionan a base de la deformación que sufre una membrana metálica muy delgada, al estar sujeta a fuerzas debidas a la presión de un fluido. La fuerza resultante es transmitida desde la membrana hasta el elemento transductor, constituido por un puente de Wheatstone, por medio

de aceite de silicón o alguna sustancia similar.

La deformación mecánica causada por la presión provoca un cambio en la resistencia de un conductor piezoresistivo. Aplicando un voltaje correcto, el circuito del puente se equilibra dando la señal proporcional de la presión.

Las celdas se instalan en el punto donde se desea medir la presión, aunque a veces conectarlas directamente en el punto de interés no es posible y hay que instalarlas a través de un conducto el cual debe dimensionarse para evitar que funcione como filtro, sobre todo si se trata de medir

cual debe dimensionarse para evitar que funcione como filtro, sobre todo si se trata de medir variaciones de alta frecuencia.

4.3 Medición de velocidad.

La velocidad de la corriente en una sección transversal del canal puede medirse con un tubo de Pitot o un micromolinete. El primero se utiliza generalmente para medir velocidades arriba de 0.5 m/s, además al introducirlo dentro de la corriente debe evitarse que provoque alteraciones dentro de ella colocándolo paralelo a las líneas de corriente. En la fig.4.3 se muestra el esquema de un tubo Pitot.

Los micromolinetes se usan frecuentemente en canales pequeños, modelos fluviales y otros donde la velocidad de la corriente sea mayor de 0.01 m/s y hasta 0.46 m/s.

Para conocer la velocidad media del flujo en una sección de área conocida, solo se requiere medir la velocidad registrada en diferentes puntos de la sección transversal de interés, ya sea con el micromolinete o con el tubo de Pitot y se forma un plano llamado de isotacas (su construcción es semejante al de las curvas de nivel en Topografía o isoyetas en Hidrología) y se obtiene la velocidad media en la sección con la siguiente ecuación:

$$V_{med} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n V_i \cdot \Delta A_i \dots\dots\dots(4.2)$$

donde:

- V_{med} velocidad media de la sección, [L T⁻¹]
- A área total de la sección, [L²]
- V_i velocidad media entre dos isotacas consecutivas, [L T⁻¹]
- ΔA_i área entre dos isotacas consecutivas, [L²]

Esto es posible siempre y cuando el flujo sea permanente, es decir, sin cambio alguno en el periodo de tiempo en que se efectúan las mediciones.

Existen otros dispositivos para medir la velocidad como son el tubo de Prandtl fig.4.3 y los anemómetros de hilo caliente. El primero es una combinación del tubo Pitot y un piezómetro; el segundo sirve para medir velocidades pequeñas del orden de mm/ s; su desventaja es que es muy sensible a los cambios de temperatura y solo da buenos resultados cuando el agua se encuentra libre de impurezas.

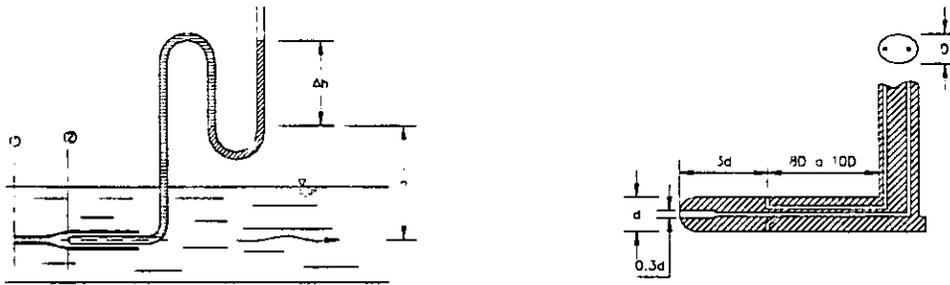


Fig. 4.3 Tubo de Pitot y Tubo de Prandtl

En la figura 4.3; en la sección 1, según la ecuación de Bernoulli la energía está dada por :

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1$$

y es igual a la energía en la sección 2 siendo nula la velocidad en éste punto, así se tiene que:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma}$$

ya que se considera que la sección 1 está en el mismo nivel de la sección 2, es decir $Z_1 = Z_2$.

Además las pérdidas de fricción entre 1 y 2 son despreciables. Entonces:

$$v_1 = \left[2g \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

* Frank M. White, Mecánica de Fluidos, De. Mc Graw Hill, 1983, México.



Foto 3. Tubo de Prandtl instalado junto con un limnómetro para definir su posición

La presión en 2 está dada por la columna de fluido dado que:

$$P = \gamma h$$

$$P_2 = \gamma_w h + \gamma_s \Delta h$$

donde:

γ_w = peso específico del agua

γ_s = peso específico del líquido manométrico

la presión en 1 es la presión hidrostática dada por la profundidad a la que se encuentra colocado el tubo de Pitot. Por ello es más fácil medir la velocidad del flujo con el tubo de Prandtl ya que este tiene tomas de presión estática.

4.4 Medición del Gasto

El canal de pendiente variable, como toda instalación de experimentación hidráulica, cuenta con dispositivos para medir el gasto.

Es posible determinar el gasto que entra al tanque de llamada del canal midiendo la velocidad del flujo dentro de la tubería de suministro y multiplicando por el área de su sección transversal. Este procedimiento se puede efectuar con equipos de medición

como son:

- Aforador sónico
- Pitot
- Medidor de propela tipo magnético
- Medidor volumétrico

Otro procedimiento adecuado para determinar el gasto es encontrando la velocidad media del flujo que pasa por una sección del canal de la cual su área es conocida.

$$Q = A V_{med}$$

donde Q gasto en $[L^3, T^{-1}]$

A área de la sección en $[L^2]$

V_{med} velocidad media m/s $[L, T^{-1}]$

A la salida del canal de pendiente variable el gasto se mide con un vertedor tipo Rehbock el cual fue diseñado para éste módulo experimental. Conocidas sus características geométricas, el gasto es calculado con las ecuaciones 2.6 y 2.7

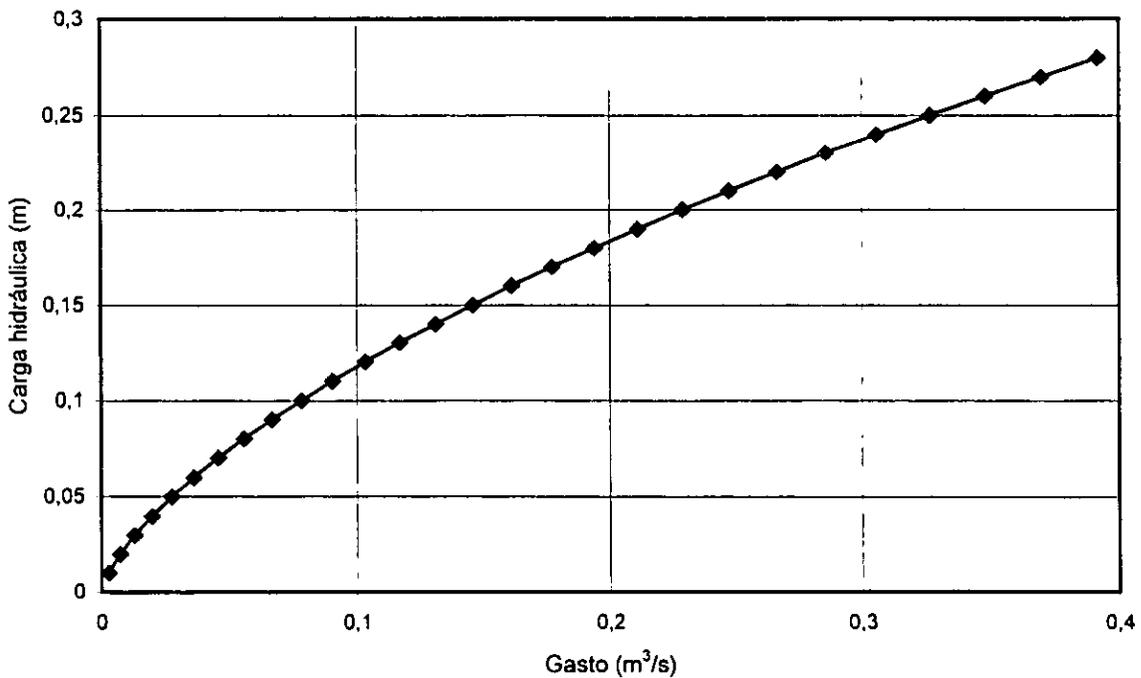
$$Q = 2.95 \mu b h^{1.5}$$

donde:

$$\mu = \left(0.6035 + 0.0813 \frac{(h + 0.0011)}{0.28} \right) \left(\left(1 + \frac{0.0011}{h} \right)^{1.5} \right)$$

h (m)	Q (m ³ /s)						
0.01	0.0027	0.08	0.0555	0.15	0.1458	0.22	0.2662
0.02	0.0072	0.09	0.0664	0.16	0.1613	0.23	0.2857
0.03	0.0129	0.10	0.0780	0.17	0.1773	0.24	0.3058
0.04	0.0197	0.11	0.0903	0.18	0.1939	0.25	0.3264
0.05	0.0274	0.12	0.1032	0.19	0.2111	0.26	0.3476
0.06	0.0360	0.13	0.1168	0.20	0.2289	0.27	0.3693
0.07	0.0454	0.14	0.1310	0.21	0.2473	0.28	0.3916

GRAFICA 4.1 RELACION GASTO CARGA HIDRAULICA
VERTEDOR TIPO REHBOCK

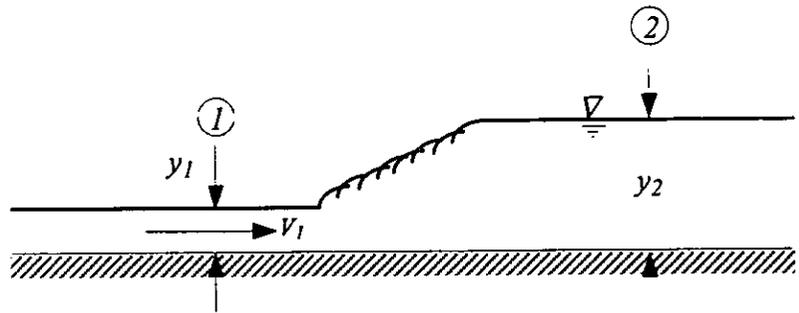


5. APLICACIONES

Se presentan dos aplicaciones como ejemplos prácticos de los fines a los que puede dedicarse la instalación del canal de pendiente variable, una de tipo didáctico experimental y otra de apoyo para la medición de flujo a superficie libre.

5.1 Salto hidráulico

Cuando el flujo en una sección dada es supercrítico y las condiciones aguas abajo son de flujo subcrítico, se presenta un cambio brusco de la elevación de



la superficie libre del agua, este cambio conocido como salto hidráulico, implica una pérdida significativa de energía mecánica mediante el mezclado turbulento que se presenta en el flujo.

Para definir las características del salto hidráulico,* se parte de las ecuaciones básicas de continuidad, cantidad de movimiento y de la ecuación de la energía para un canal rectangular y de pendiente nula, las ecuaciones para el cálculo de los tirantes conjugados y la pérdida de carga, a saber:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} [k - 1] \quad k = (1 + 8 Fr_1^2)^{0.5} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

donde	y	tirantes [L]
	Fr	No. de Froude (adim.)
	V	velocidad [LT^{-1}]
	h_f	pérdida de carga [L]
	E_1	Energía específica [L]

$$h_f = \frac{E_1 [k - 3]}{8 [k - 1] [Fr_1^2 + 2]} \quad E_1 = \frac{V_1^2}{2g} + y_1$$

*W.Fox Robert, McDonald Alan T., Introducción a la Mecánica de Fluidos, Editorial Interamericana, México D.F. 1986

5.1.1. Objetivo de la práctica

Determinar experimentalmente si estas ecuaciones proporcionan resultados adecuados para pendientes pequeñas, es decir, para cuando en la inclinación del fondo del canal se cumple que: $\tan\alpha = \text{sen}\alpha$, donde α es el ángulo respecto de la horizontal.

Es importante hacer notar que para obtener las ecuaciones arriba mencionadas, se hicieron además las siguientes suposiciones.

a) Flujo permanente

Esta condición se logra si el gasto se mantiene constante durante el proceso de medición.

b) Flujo uniforme en cada sección

Al ser la sección de trabajo del canal de pendiente variable igual a todo lo largo, el flujo será uniforme en cada sección.

c) Flujo incompresible

En la práctica, para las presiones que se manejan, el agua se considera como flujo incompresible

d) No influyen fuerzas viscosas ni fuerzas de tensión superficial.

La turbulencia generada en el interior del fluido permiten hacer despreciables los efectos de la viscosidad del agua así como los efectos de tensión superficial por ser la magnitud del canal de prueba suficientemente ancho.

e) La distribución de presiones es hidrostática

Al ser el flujo permanente y uniforme, el tirante se mantendrá dinámicamente igual, por lo que la presión que el flujo ejerce en las paredes del canal y el fondo se puede considerar hidrostática.

5.1.2. Metodología.

Para provocar el salto hidráulico se empleará una compuerta de descarga baja y regulando el tirante de aguas abajo con la compuerta a la salida del canal se ubicará el salto dentro de la sección de trabajo. Una vez establecida la posición de la compuerta, no se volverá a mover.

Para un gasto dado se medirá la velocidad media y el tirante en la sección 1 y se comparará el tirante calculado con el medido en la sección 2.

Se iniciará el proceso con pendiente nula y se irá variando la elevación del extremo en 0.002mm.

Se medirá la velocidad y el tirante en la misma sección pero en tres ejes distintos; margen derecha,

eje central y margen izquierda. Se llevará un registro de las mediciones.

5.1.3. Instalación.

En las siguientes fotografías se puede apreciar la instalación del sistema instalado en el canal de pendiente variable.

Foto 5.1 Instalación de la compuerta con descarga baja.

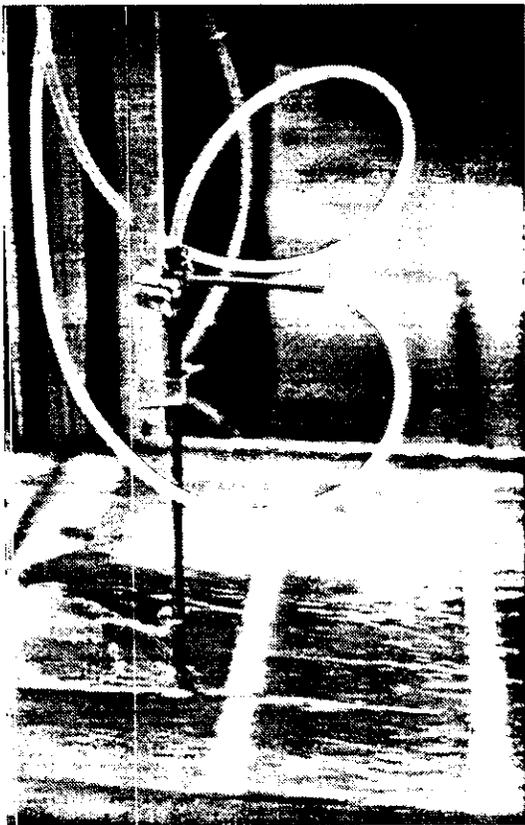
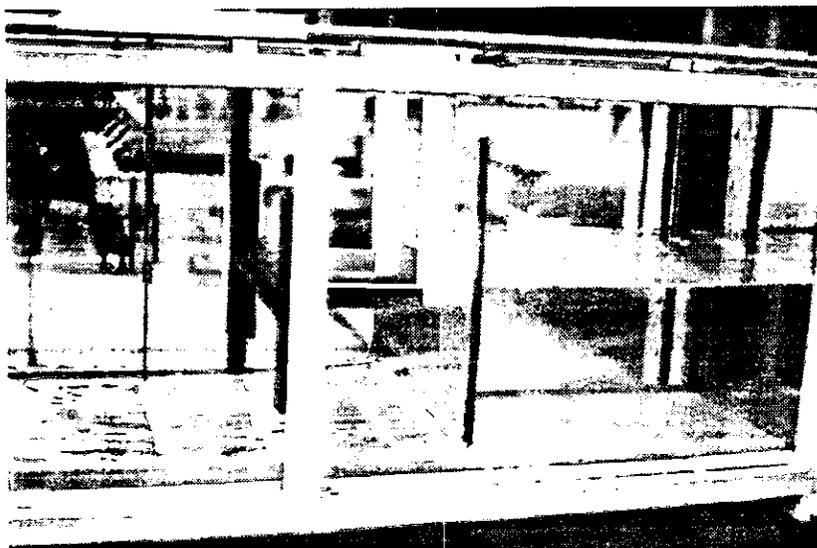


Foto 5.2 Instalación del tubo de Pradlt para medición de la velocidad del flujo aguas abajo de la compuerta.

5.1.4. Desarrollo.

Las pendientes que se probarán se determinan en la tabla 1, donde se observa que se cumple la condición $\tan \alpha = \text{sen} \alpha$, al bajar el extremo del canal de dos en dos milímetros, hasta 16 mm. La columna C de la tabla es igual a la columna E, pero conforme aumenta H empieza a existir una pequeña diferencia entre el valor de $\tan \alpha$ y $\text{sen} \alpha$.

Tabla 1. Magnitud de las pendientes de prueba.

A	B	C	D	E
No. de Prueba	Altura en el extremo del canal H(m)	Pendiente $S = H/17.17$ $S = \tan \alpha$	$\tan^{-1} S = \alpha$	$\text{sen} \alpha$
1	0.002	0.000112994	0.000112994	0.000112994
2	0.004	0.000233918	0.000233918	0.000233918
3	0.006	0.000350877	0.000350877	0.000350877
4	0.008	0.000467836	0.000467836	0.000467836
5	0.010	0.000584795	0.000584795	0.000584795
6	0.012	0.000701754	0.000701754	0.000701754
7	0.014	0.000818713	0.000818713	0.000818713
8	0.016	0.000935673	0.000935672	0.000935672

Gasto de prueba $Q = 45.5$ lt/s; abertura de la compuerta 5 cm; nivel del agua, aguas arriba de la compuerta 32.25 cm.

Se observa en la tabla 2, que la velocidad y el tirante medido en la sección 1 se mantienen prácticamente sin variación no obstante que la pendiente aumenta gradualmente.

Tabla 2. Medición de tirantes y velocidades en la sección 1.

No.	MDI					ECI				MII			VPI	YPI
	yD	h1	h2	VD	yC	h1	h2	VC	yD	h1	h2	VI		
0	3.50	33.70	8.50	2.22	3.70	33.75	8.20	2.24	3.70	33.70	8.10	2.24	2.23	3.63
1	3.75	34.50	4.70	2.42	3.65	34.50	4.70	2.42	3.30	34.40	5.20	2.39	2.41	3.57
2	3.60	34.50	5.00	2.40	3.65	34.51	5.10	2.40	3.70	34.40	5.20	2.39	2.40	3.65
3	3.50	34.40	5.10	2.40	3.65	34.40	5.15	2.39	3.85	34.50	5.30	2.39	2.39	3.67
4	3.60	34.00	5.15	2.38	3.65	34.00	5.15	2.38	3.57	34.00	5.20	2.38	2.38	3.61
5	3.50	34.00	4.95	2.39	3.70	34.10	5.15	2.38	3.65	34.00	5.15	2.38	2.38	3.62
6	3.50	34.00	5.05	2.38	3.65	33.70	5.10	2.37	3.70	33.70	5.25	2.36	2.37	3.62
7	3.50	34.10	5.10	2.38	3.68	34.10	5.15	2.38	3.68	34.00	5.25	2.37	2.38	3.62
8	3.55	34.05	5.00	2.39	3.66	34.10	5.10	2.38	3.70	34.15	5.20	2.38	2.38	3.64

Donde:

yD = tirante medido en el eje de la margen derecha. (cm)
 h1 = columna de agua en el piezómetro correspondiente a la presión de estancamiento. (cm)
 h2 = columna de agua en el piezómetro correspondiente a la presión estática. (cm)

VD = velocidad calculada para el eje de la margen derecha. (m/s)
 VP1 = velocidad promedio de los tres ejes, en la sección 1. (m/s)
 YP1 = tirante promedio de los tres ejes, en la sección 1. (cm)

Por consiguiente, cuando en la tabla 3 se calcula el No. de Froude en la sección 1, se tiene que su valor también se mantiene alrededor de un mismo valor (de 4).

Tabla 3. Comparación del tirante medido y el calculado en la sección 2

No. Prueba	VP1	YP1	Fr1	y2 medido	y2 calc
0	2.23	3.63	3.74	17.38	17.50
1	2.41	3.57	4.07	16.86	18.84
2	2.40	3.65	4.01	16.93	18.96
3	2.39	3.67	3.99	16.63	18.96
4	2.38	3.61	4.00	16.75	18.67
5	2.38	3.62	4.00	16.36	18.74
6	2.37	3.62	3.98	15.70	18.64
7	2.38	3.62	4.00	15.17	18.73
8	2.38	3.64	3.99	15.23	18.80

De éstas observaciones se podría afirmar que el valor del tirante calculado será el mismo aún y cuando la pendiente sufra variaciones. Sin embargo el tirante calculado en comparación con el tirante medido en la sección 2 solo es semejante en el caso de pendiente nula. Para otros casos en el que la pendiente se hace mayor, el tirante calculado es mayor que el medido. Esto puede deberse a dos razones, una porque el flujo, al ser sujeto a una pendiente mayor, incrementa su velocidad en la sección 2, lo que disminuye el tirante; así el salto hidráulico se “barre”, es decir; conforme aumenta la pendiente, el salto se aleja de la posición respecto a la compuerta. Esto se aprecia en la tabla 4, al incrementarse la pendiente, el salto se aleja de su posición original (cuando la pendiente es cero), disminuyendo considerablemente el tirante en la sección 2 y se aprecia una disminución de la longitud del salto hidráulico.

Tabla 4. Características geométricas del salto hidráulico.

No. de prueba	Longitud del salto hidráulico(cm)	Ubicación respecto a la compuerta(cm)	y2 medido (cm)
0	77.00	74.00	17.38
1	60.80	120.70	16.86
2	60.00	160.50	16.93
3	55.00	174.00	16.63
4	55.50	203.00	16.75
5	46.00	227.00	16.36
6	39.00	252.50	15.70
7	39.00	277.50	15.17
8	42.50	320.00	15.23

La longitud del salto se midió aproximadamente entre el punto donde inicia la tubulencia totalmente desarrollada y el punto donde la corriente superficial se aleja de la estructura del salto, esto es, si se pone un flotador sobre el salto hidráulico,

se puede encontrar un punto en el que el flotador no regresa sobre el “lomo” del salto, sino que es arrastrado hacia aguas abajo, éste punto se considera que es donde el salto hidráulico termina.

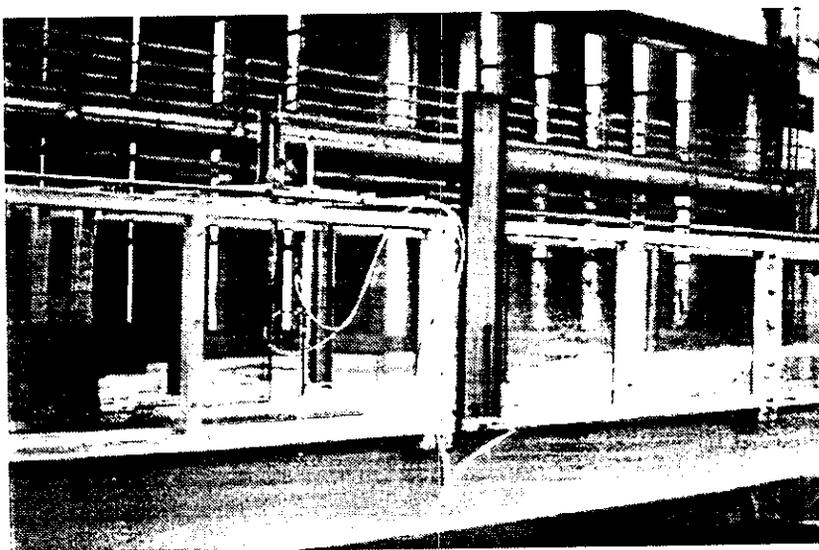
La otra razón puede deberse a que las mediciones efectuadas en la sección 1 siempre se mantuvieron en la misma posición respecto a la compuerta sin considerar los cambios de ubicación del salto hidráulico y los tirantes y las velocidades deben cambiar hacia aguas abajo.

Para corroborar el objeto de ésta práctica, se propone:

-Ir cambiando la sección 1 de la misma manera que se mueve o barre el salto al cambiar la pendiente, para que los tirantes conjugados sean medidos precisamente al inicio y al final del salto hidráulico.

-O bien, obligar a que el salto hidráulico permanezca en su sitio, cambiando la posición de la compuerta.

Foto 5.3 Instalación experimental en el canal de pendiente variable para probar el comportamiento del salto hidráulico. El piezómetro se emplea para determinar la diferencia de presiones entre la de estancamiento y la hidrostática.



5.2 Caracterización de micromolinetes mecánicos

El canal anular para caracterización de molinetes del IMTA no cuenta actualmente con accesorios que permitan obtener la curva característica de micromolinetes mecánicos. Estos aparatos permiten medir velocidades del flujo a superficie libre entre un intervalo de 0.01 a 0.4 m/s, registrando el número de vueltas de su hélice con un contador mecánico que interrumpe su conteo cuando el operador disminuye la tensión

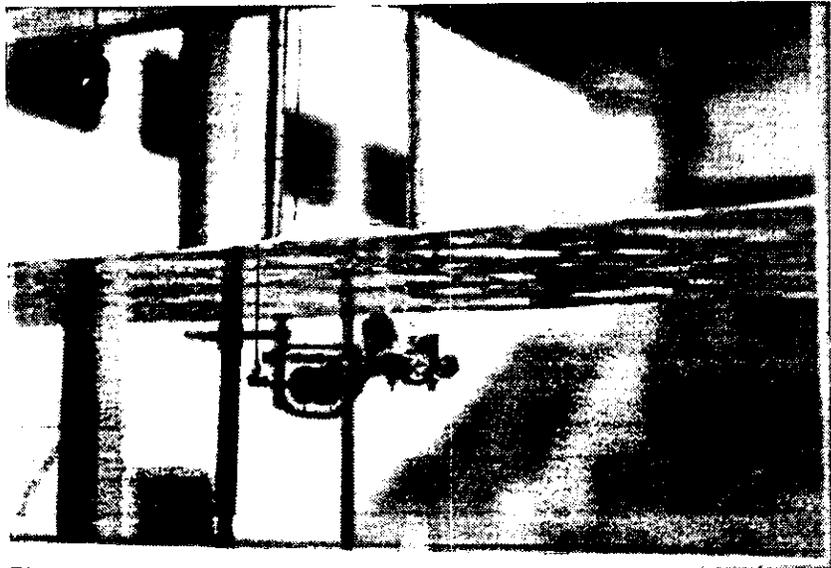


Foto 5.4 Instalación y pruebas para determinar el comportamiento de un micro-molinete mecánico.

del muelle, entonces la hélice continúa su movimiento pero el número de vueltas ya está marcado. El operador establece un intervalo de tiempo en el que se efectúe el conteo, de esta forma, se tiene que hacer la lectura en el mismo aparato para lo cual hay que sacarlo de la corriente de la cual se desea determinar la velocidad.

Todas estas maniobras no permiten emplear la instalación del canal anular para obtener la curva que relaciona el número de vueltas por unidad de tiempo con la velocidad del flujo que impulsa la hélice del micro-molinete mecánico.



Foto 5.5 El micro-molinete mecánico tiene un muelle que activa o desactiva manualmente el mecanismo contador de revoluciones.

Para poder caracterizar este tipo de molinete se instaló en el canal de pendiente variable un molinete enano electromecánico previamente caracterizado en el canal anular, de forma que sirva

como patrón. Paralelamente se colocó el molinete mecánico por caracterizar y al mismo nivel del enano.

Se mantuvo un tirante de 30 cm dentro del canal de pendiente variable y la velocidad se varió cambiando gradualmente la pendiente de la sección de trabajo. Cuando el tirante disminuía de la magnitud fijada, se aumentaba poco a poco el

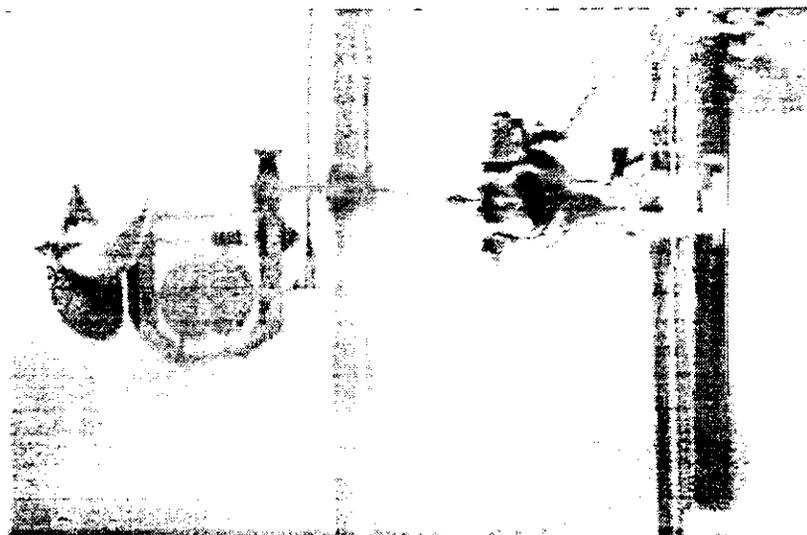


Foto 5.6 Un molinete enano hizo las veces de patrón de comparación, ya que previamente a esta prueba, fue caracterizado en el canal anular del laboratorio de hidráulica "Enzo Levi".

gasto. La lectura de ambos molinetes se hizo simultáneamente para cada velocidad establecida. La lectura del molinete patrón permitía, conocidas sus revoluciones por minuto, establecer la velocidad del flujo, a la que también el molinete mecánico estaba sujeto. De esta forma la lectura del número de vueltas por minuto del molinete mecánico se relaciona con la velocidad del flujo y así es posible obtener la gráfica de revoluciones - velocidad que lo caracteriza.

Es importante hacer notar que este procedimiento de caracterización resulta mas costoso que cuando se impulsa el molinete en agua estanca, pues es necesario bombear un gran volumen de agua para que fluya por el canal.



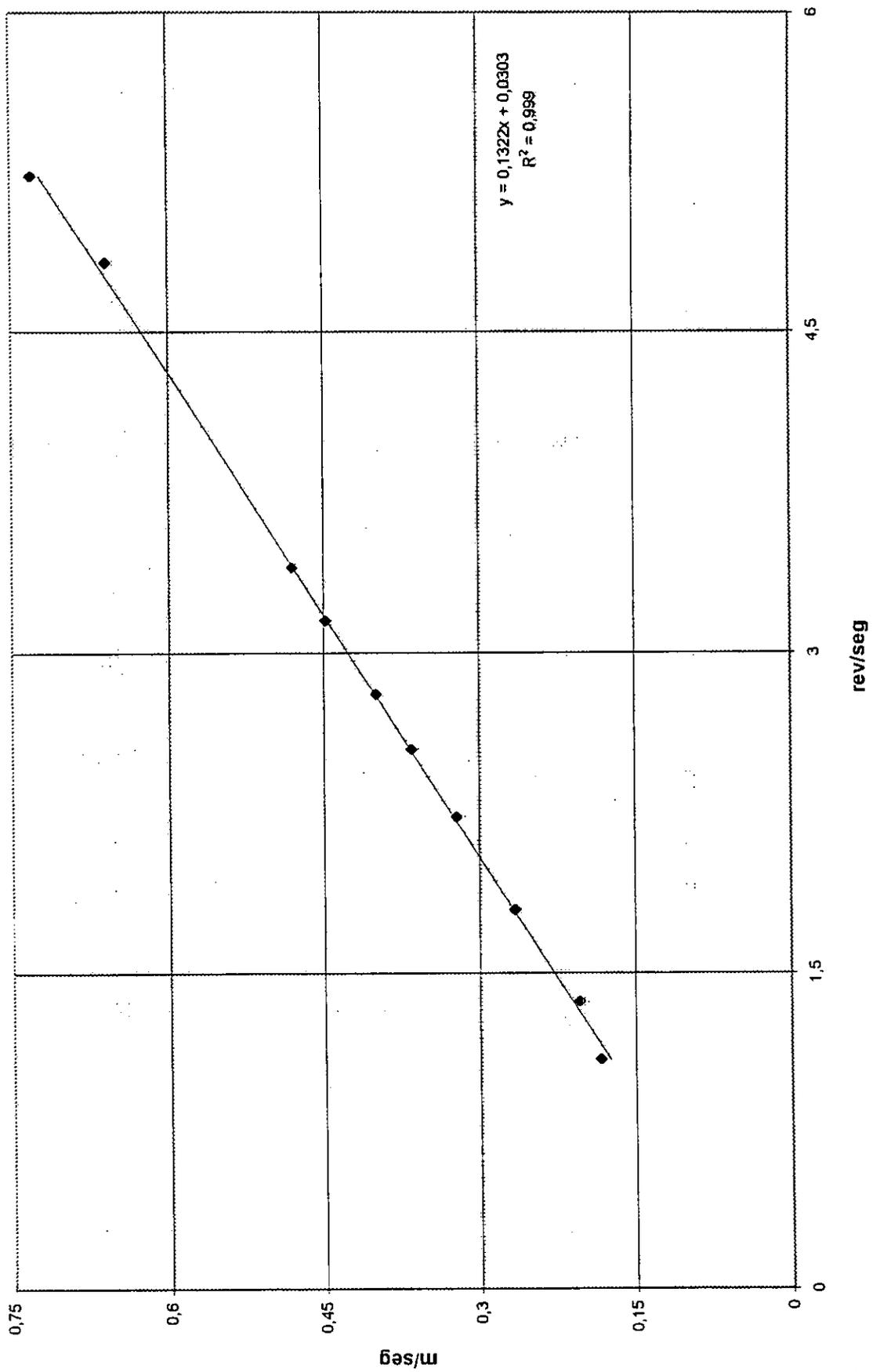
Los registros obtenidos así como las curvas características se muestran a continuación.

Foto 5.7. Ambos molinetes fueron instalados a la misma profundidad y sujetos a las mismas condiciones de flujo.

CARACTERIZACIÓN DE MOLINETES

DATOS GENERALES					
Marca/modelo:	KEMPTEN BAYERN	Tipo:	A.OTT MECÁNICO		
Clave:	CNA-TAM-M-425	Núm. de serie:	8575		
Propiedad de:	CNA TAMAULIPAS	Responsable:			
Fecha de prueba:	09/04/97	Próx. prueba:	EN SEIS MESES		
PARÁMETROS					
Ecuación actual: $V = 0.1322N + 0.0303$, $R^2 = 0.999$		Rango de caracterización: 0.184 - 0.730 m/seg			
DATOS DE PRUEBA					
VEL. MOL. PATRÓN m/s	LECT. INIC. Rev.	LECT. FIN. Rev.	REVOLUCIONES	TIEMPO (S)	Rev/seg
0.366	200	303	103	40.77	2.5451
0.400	303	416	113	40.31	2.8033
0.445	416	543	127	40.28	3.1529
0.481	543	680	137	40.29	3.4003
0.659	680	874	194	40.22	4.8235
0.322	1085	1175	90	40.40	2.2277
0.266	1175	1247	72	40.18	1.7919
0.204	1247	1302	55	40.32	1.3641
0.184	1302	1346	44	40.28	1.0923

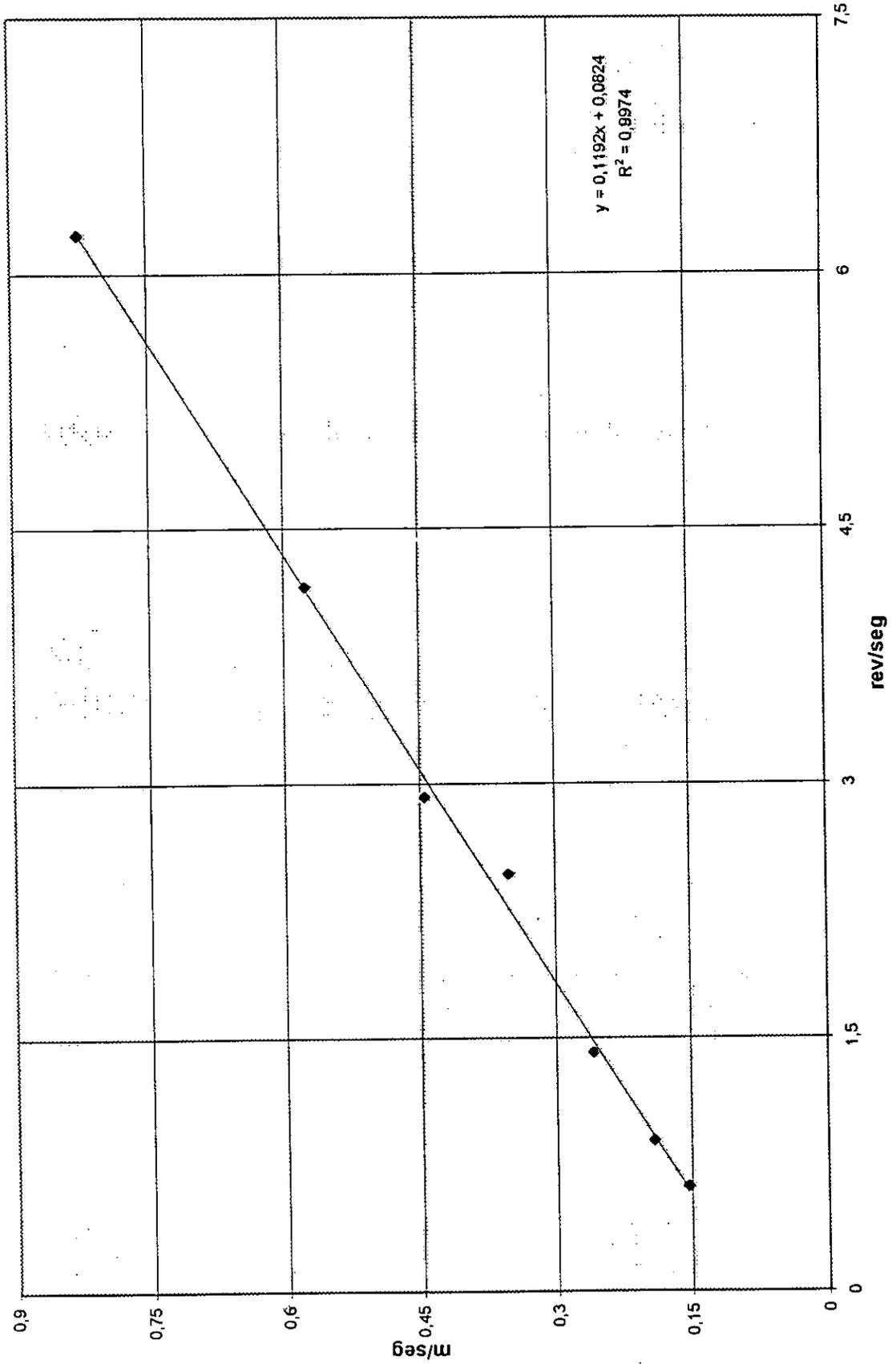
MOLINETE No. 8575



CARACTERIZACIÓN DE MOLINETES

DATOS GENERALES					
Marca/modelo:	KEMPTEN BAYERN	Tipo:	A.OTT MECÁNICO		
Clave:	CNA-TAM-M-427	Núm. de serie:	10287		
Propiedad de:	CNA TAMAULIPAS	Responsable:			
Fecha de prueba:	09/04/97	Próx. prueba:	EN SEIS MESES		
PARÁMETROS					
Ecuación actual: $V = 0.1192N + 0.0824$, $R^2 = 0.9974$			Rango de caracterización: 0.154 - 0.826 m/seg		
DATOS DE PRUEBA					
VEL. MOL. PATRÓN m/s	LECT. INIC. Rev.	LECT. FIN. Rev.	REVOLUCIONES	TIEMPO (S)	Rev/seg
0.154	0	25	25	40.35	0.6196
0.192	25	61	36	40.44	0.8902
0.259	61	118	57	40.35	1.4126
0.352	118	217	99	40.18	2.4639
0.445	217	335	118	40.37	2.9229
0.577	335	502	167	40.19	4.1553
0.826	502	753	251	40.31	6.2267

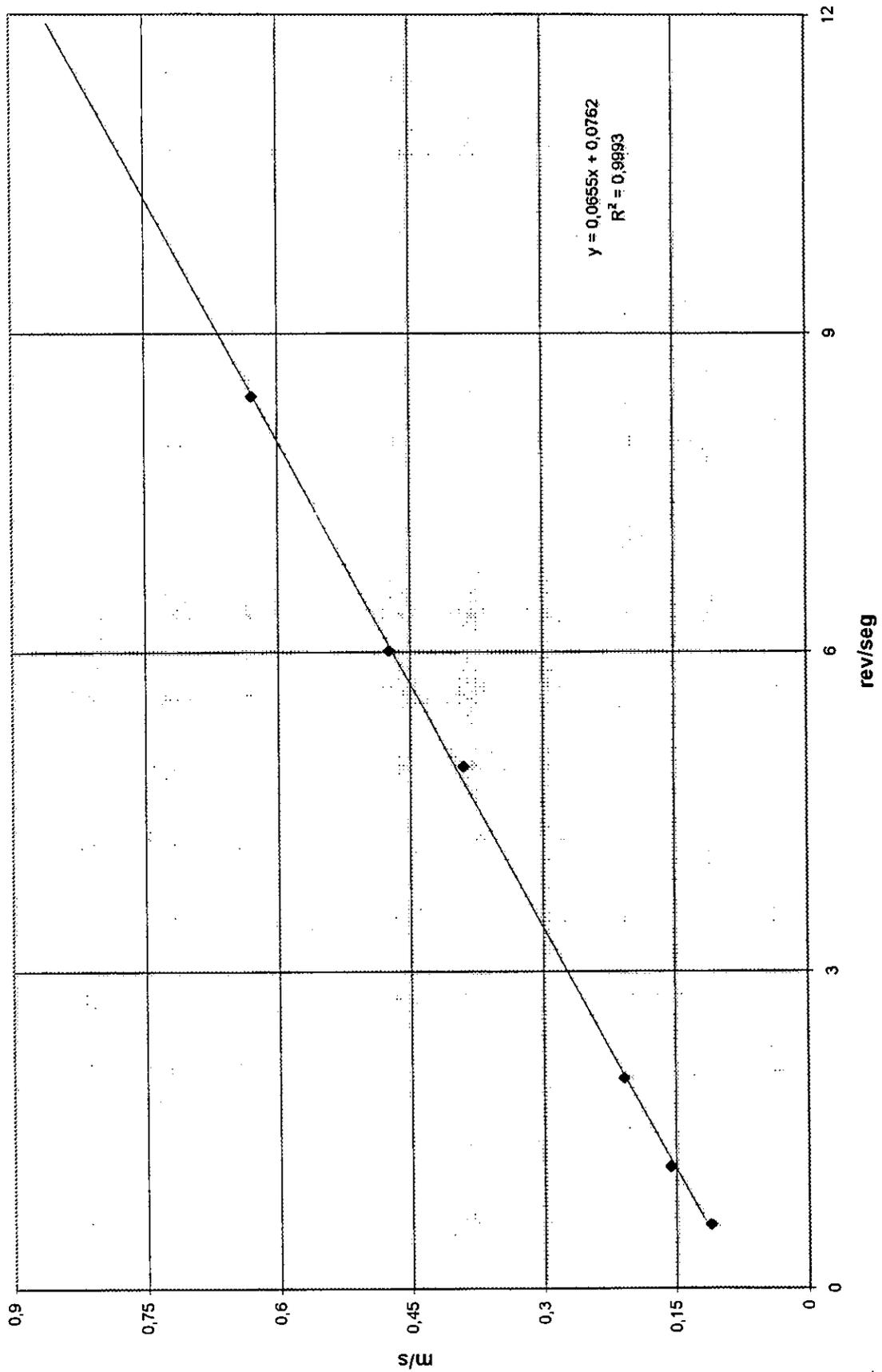
MOLINETE No. 10287



CARACTERIZACIÓN DE MOLINETES

DATOS GENERALES					
Marca/modelo:	ROSSBACH	Tipo:	A.OTT MECÁNICO		
Clave:	CNA-QUE-M-549	Núm. de serie:	7503		
Propiedad de:	CNA QUERETARO	Responsable:			
Fecha de prueba:	04/10/97	Próx. prueba:	EN SEIS MESES		
PARÁMETROS					
Ecuación actual: $V = 0.0655N + 0.0762$, $R^2 = 0.9993$		Rango de caracterización: 0.112 - 0.763 m/seg			
DATOS DE PRUEBA					
VEL. MOL. PATRÓN m/s	LECT. INIC. Rev.	LECT. FIN. Rev.	REVOLUCIONES	TIEMPO (S)	Rev/seg
0.112	60	84	24	40.31	0.5954
0.156	84	130	46	40.15	1.1457
0.209	314	395	81	40.69	1.9906
0.390	404	602	198	40.18	4.9278
0.474	602	843	241	40.10	6.0099
0.629	843	1180	337	40.09	8.4061
0.763	1180	1662	482	40.44	11.9189

MOLINETE No.7503



6. RECOMENDACIONES

Debido a las modificaciones efectuadas en el diseño original del sistema de elevación del canal de pendiente variable, *se recomienda efectuar el cambio de pendiente cuando la sección de trabajo esté sin agua* para evitar una flexión de la viga fuera de lo calculado. Se debe recordar que en el análisis de carga para diseño se consideró el canal totalmente lleno en su sección de trabajo y los apoyos equidistantes.

Nunca exceder los máximos de pendiente con los que fue diseñada la estructura y que están marcados en la regleta donde se mide la pendiente.

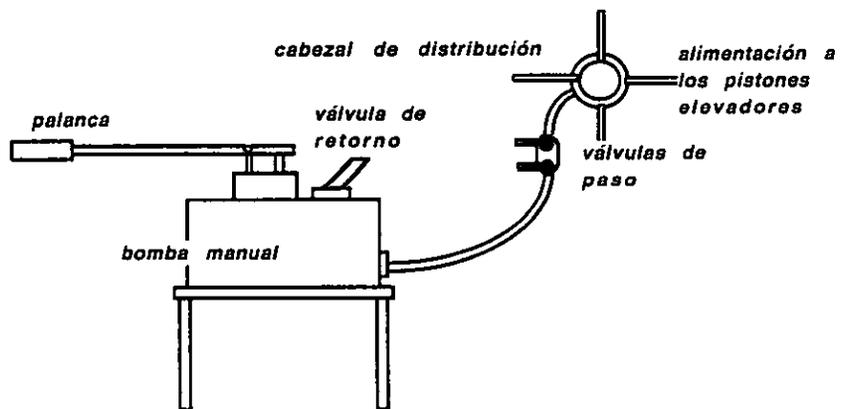
Para operar el sistema de elevación, el fluido hidráulico a emplear siempre deberá ser el indicado por el proveedor de los pistones.

Será conveniente emplear algún tipo de disipador de energía para poder medir gastos mayores en el tanque canal Rehbock.

Para accionar el sistema de elevación se debe proceder como sigue:

Para aumentar la pendiente.

- a) Abrir las válvulas de paso del aceite hidráulico en el cabezal de distribución.
- b) Retirar el seguro de la palanca de bombeo y accionarla bombeando varias veces para elevar la estructura del canal y liberar las tuercas de seguridad de los soportes verticales.
- c) Subir las seis tuercas de los soportes verticales considerando la siguiente posición deseada de la pendiente del canal.
- d) Bajar el canal a la posición deseada abriendo lentamente la válvula que libera la presión en la bomba manual,



así los pistones bajarán la estructura; al llegar al punto que define la posición final, cerrar la válvula, para después bajar las tuercas hasta que lleguen al tope pero sin apretar. Abrir nuevamente para liberar la presión de los pistones y hacer que los seis apoyos fijos trabajen.

e) Cerrar las válvulas de paso del aceite hidráulico en el cabezal de distribución.

Para disminuir la pendiente.

a) Abrir las válvulas de paso del aceite hidráulico en el cabezal de distribución.

b) Retirar el seguro de la palanca de bombeo y accionarla bombeando varias veces para elevar la estructura del canal; de ésta forma se liberan los soportes verticales.

c) Llegar a la pendiente requerida accionando la palanca de la bomba.

d) Bajar las seis tuercas de los soportes verticales hasta que lleguen al tope pero sin apretar. Abrir la válvula de retorno para despresurizar liberando los pistones y hacer que los seis apoyos fijos soporten la estructura.

e) Cerrar las válvulas de paso del aceite hidráulico en el cabezal de distribución.

En caso de requerir cambiar el tamaño o la forma de la sección de trabajo del canal de pendiente variable, deberá analizarse el peso muerto de la nueva estructura y el peso cuando su volumen sea ocupado en su totalidad sin dejar bordos libres. La suma de ambas cargas no deberá sobrepasar la carga de diseño de la viga del bastidor del canal de pendiente variable.

La nueva sección no deberá ser mas ancha que un 100% del diseño original, de esta forma se evitará que la carga salga del tercio medio del ancho de la viga del bastidor donde se apoyará la nueva estructura.

Como todo mecanismo, el canal de pendiente variable debe contar con un programa de mantenimiento preventivo para cada una de sus partes, de esta manera el mantenimiento correctivo será muy esporádico.

Cuadro del programa de mantenimiento preventivo.

Descripción	Limpieza	Engrasado	Pintura	Empaques	Sellado
Tanque de llamada	c/mes	n/r	c/12mes	n/r	rev/2mes
Sección de trabajo	c/mes	n/r	c/12mes	n/r	rev/mes
Sistema de soporte	c/mes	c/12mes	c/12mes	n/r	n/r
Sistema de elevación	c/3mes	c/12mes	n/r	rev/2mes	n/r
Sistema de recirculación	c/mes	c/3mes	c/12mes	rev/2mes	rev/mes
Tanque de salida	c/mes	n/r	c/12mes	n/r	rev/12mes
Válvulas	c/6 mes	c/12mes	c/12mes	rev/6mes	rev/mes
Compuerta	c/mes	c/2mes	c/12mes	rev/12mes	rev/mes

Recomendaciones.

Como todo mecanismo, el canal de pendiente variable debe contar con un programa de mantenimiento preventivo para cada una de sus partes, de esta manera el mantenimiento correctivo será muy esporádico.

Cuadro del programa de mantenimiento preventivo.

Descripción	Limpieza	Engrasado	Pintura	Empaques	Sellado
Tanque de llamada	c/mes	n/r	c/12mes	n/r	rev/2mes
Sección de trabajo	c/mes	n/r	c/12mes	n/r	rev/mes
Sistema de soporte	c/mes	c/12mes	c/12mes	n/r	n/r
Sistema de elevación	c/3mes	c/12mes	n/r	rev/2mes	n/r
Sistema de recirculación	c/mes	c/3mes	c/12mes	rev/2mes	rev/mes
Tanque de salida	c/mes	n/r	c/12mes	n/r	rev/12mes
Válvulas	c/6 mes	c/12mes	c/12mes	rev/6mes	rev/mes
Compuerta	c/mes	c/2mes	c/12mes	rev/12mes	rev/mes

En caso de requerir cambiar el tamaño o la forma de la sección de trabajo del canal de pendiente variable, deberá analizarse el peso muerto de la nueva estructura y el peso cuando su volumen sea ocupado en su totalidad sin dejar bordos libres. La suma de ambas cargas no deberá sobrepasar la carga de diseño.

La nueva sección no deberá ser mas ancha que un 100% del diseño original, de esta forma se evitará que la carga salga del tercio medio del ancho de la viga del bastidor donde se apoyará la nueva estructura.

Debido a las modificaciones efectuadas en el diseño original del sistema de elevación del canal de pendiente variable, se recomienda efectuar el cambio de pendiente cuando la sección de trabajo esté sin agua para evitar una flexión de la viga fuera de lo calculado. Se debe recordar que en el análisis de carga para diseño se consideró el canal totalmente lleno en su sección de trabajo y los apoyos equidistantes.

Nunca exceder los máximos de pendiente con los que fue diseñada la estructura y que están marcados en la regleta donde se mide la pendiente.

Para operar el sistema de elevación, el fluido hidráulico a emplear siempre deberá ser el indicado por el proveedor de los pistones.

7. CONCLUSIONES

El canal de pendiente variable es una instalación básica en los laboratorios de hidráulica, que ha venido evolucionando con el tiempo. Aprovechando estas experiencias se ha diseñado, construido, probado y evaluado como una instalación que mejora otras existentes en México, tanto en operación como en costo.

El canal de pendiente variable, tal como fue diseñado, cumple las expectativas de una instalación experimental para el desarrollo de pruebas de laboratorio que permite probar o modificar hipótesis sobre el comportamiento de flujos en conducciones abiertas.

Este diseño puede retomarse como parte de la infraestructura de un laboratorio de hidráulica dedicado a la docencia y/o a la investigación, modificando las dimensiones de acuerdo a la disponibilidad de espacio y recursos, así como para los fines a los que será dedicada la instalación del canal de pendiente variable.

Con la puesta en operación de la instalación experimental, se comprobó la funcionalidad de los elevadores hidráulicos conectados en paralelo al mismo suministro de presión, aún y cuando no están colocados en forma equidistante y dos de ellos se acoplaron longitudinalmente para conseguir la distancia necesaria para cambiar la pendiente del canal como se tenía previsto.

Con este tipo de sistema de elevación se simplifica cualquier diseño y la operación de una estructura similar.

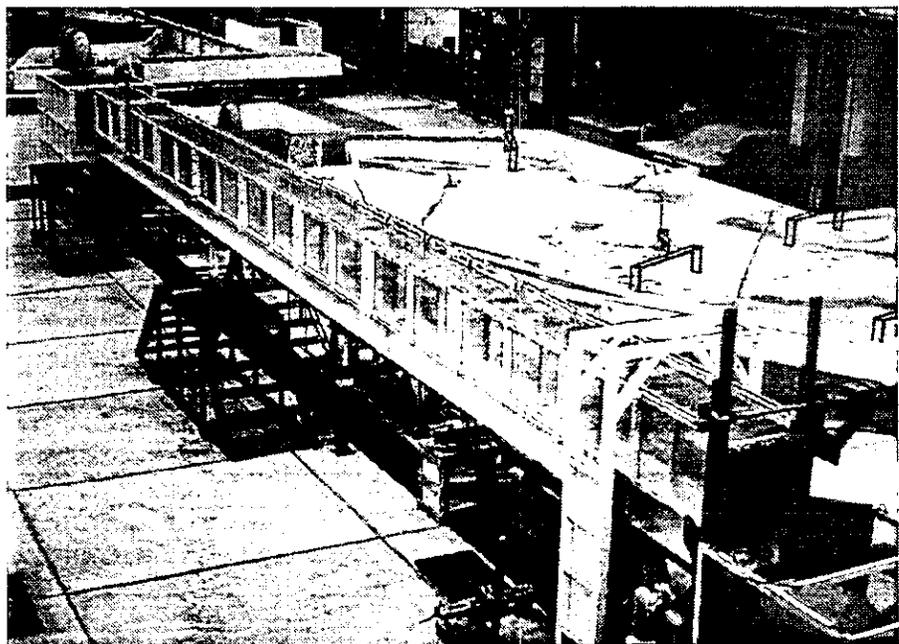


Foto 6.1 Vista general de la instalación.

BIBLIOGRAFIA

Hydraulics Laboratory, National Water Research Institute, TRIPTICO DE PRESENTACION, Canada Centre for Inland Waters, Burlington, Ontario. 17R 4A6.

Dr. P. Martínez A., Dr. F. Arreguín C. , PROGRAMA HIDRAC VERS.2 , Hidráulica de Canales, Paquete de Programas I.M.T.A. - D.E.P.F.I. U.N.A.M. , México, febrero de 1989.

Sotelo Avila G., HIDRAULICA GENERAL, Vol 1, Editorial LIMUSA, México, 1985.

R.W. Miller, FLOW MEASUREMENT ENGINEERING HANDBOOK, Second Edition, Mc Graw Hill Co. USA, 1989.

Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A.C., MANUAL DE CONSTRUCCION EN ACERO, Editorial LIMUSA, México, 1987.

Altos Hornos de México S.A. MANUAL DE CONSTRUCCION EN ACERO. México, 1980.

Mc.Cormack, Jack, ANALISIS ESTRUCTURAL, Impreso en México. 1986.

Bulletin No. SPE - 100, Leopold Simplex Pitot Equipment, Section 1, Instructions for use of Simplex Pitot Tube and Manometer., The F.B. Leopold Company 227 South Division Street Zelienople, Pensnsylvania 16063., USA 1986

V.G.Tzatchkov , PROGRAMA PROCESAMIENTO DE DATOS DE PITOMETRIA VERS. 1.03 , Paquete de Programas I.M.T.A. No. de Catálogo PM V.1.03.1994, México, junio de 1992.

R.W. Miller, FLOW MEASUREMENT ENGINEERING HANDBOOK, Second Edition,
Mc Graw Hill Co. USA, 1989.

Frank M. White, MECANICA DE FLUIDOS, Mc Graw Hill Co., 1983, Impreso en México.

W. Fox Robert, Mc Donald Alan T., INTRODUCCIÓN A LA MECANICA DE FLUIDOS,
Editorial Interamericana, México D.F. 1986.