

T-199



---

Facultad de Ingeniería

**Análisis de un Modelo Hidráulico de la Obra  
de Excedencias de la Presa Las "Higueras"**

**T E S I S**

Que para obtener el título de :  
**INGENIERO CIVIL**  
p r e s e n t a :  
**LEOPOLDO RODRIGUEZ NIETO**

---

México, D F

1979





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

**ANALISIS DE UN MODELO HIDRAULICO  
DE LA OBRA DE EXCEDENCIAS DE LA  
PRESA LAS "HIGUERAS"**

**CAPITULO I .- Introducción**

**CAPITULO II.- Generalidades del Prototipo**

**CAPITULO III.- Síntesis de la Teoría de los Modelos Hidráulicos**

**CAPITULO IV.- Estudio del Modelo Hidráulico**

**CAPITULO V .- Conclusiones y Recomendaciones**

## CAPITULO I

### I N T R O D U C C I O N

- .- MODELOS HIDRUALICOS
- .- ANTECEDENTES.
- .- METAS DEL PROYECTO

.- Introducción.

Dentro de los problemas que se presentan en la Hidráulica moderna, existen algunos que pueden tratarse satisfactoriamente por la vía Analítica y otros que además de su análisis requieren para su solución de una confirmación y rectificación por medio de la experimentación y finalmente aquellos que deben tratarse experimentalmente.

Al primer grupo pertenecen las redes de tuberías, los canales con régimen uniforme, etc., en la segunda clasificación podemos situar los canales con régimen variado, las obras de toma y de excedencias, las obras de rectificación de cuces de ríos y algunos problemas marítimos, etc. y dentro del tercer grupo podemos citar los problemas de estuarios, la rectificación de cuces de ríos con problemas de material sólido, agitación y resonancia en vasos portuarios, etc.

Conviene recordar que los proyectos de estructuras hidráulicas, estén basados en fórmulas teóricas, a las cuales se les han hecho algunas simplificaciones para poderlas aplicar, lo cual trae como resultado, que el comportamiento real de la estructura, no sea igual al comportamiento teórico; por lo que es indispensable recurrir a la experimentación; es decir a la técnica de los MODELOS HIDRAULICOS.

.- MODELOS HIDRAULICOS.

Un modelo hidráulico es una representación generalmente más pequeña de una obra, denominada "Prototipo". El modelo, para serlo, - debe poseer cualidades tales que permitan transferir las observaciones, resultados y conclusiones obtenidas de él a la escala y magnitud del prototipo que pretende representar.

No hay que pensar que el modelo, es un dispositivo que automáticamente de la respuesta ó solución exacta al problema planteado. El verdadero valor del modelo radica en la habilidad que tengan los técnicos para diseñarlo, construirlo, operarlo y fundamentalmente para interpretarlo.

Existen ciertas simplificaciones al construir y operar un modelo, debido a que hay muchos factores, que no es posible tomar en consideración, por su complejidad, así, en un fenómeno real intervienen un cierto número de magnitudes físicas y sólo una, la fundamental es tomada en cuenta, pasando a segundo plano otras, y despreciando unas terceras, por sus efectos insignificantes.

Por lo anterior, existen ciertas discrepancias entre lo observado en el modelo y lo que realmente pasa en el prototipo, que se conoce con el nombre de "efecto de escala". Este efecto es lógicamente indeseable y se puede minimizar aumentando el tamaño del modelo, pero ésto casi siempre lo impide el aspecto económico.

Es decir, el modelo debe ser lo suficientemente grande para poder reducir el efecto de escala, y así poder obtener resultados confiables; pero ela vez debe ser lo suficientemente pequeño, para que sea económico y con ello posible su construcción.

Las investigaciones hidráulicas requieren un cierto costo, pero éste es sólo una fracción de lo que supondría hacer las pruebas a tamaño -- natural; ó sea que las economías y perfeccionamientos logrados en la obra - real, justifica plenamente la utilización de los modelos.

Actualmente, no es aventurado afirmar que una obra de gran importancia no se lleva a cabo sin que un modelo de la misma haya sido previamente construido, probado, rediseñado y vuelto a probar, hasta que su comportamiento haya sido completamente satisfactorio.

Generalmente, puede decirse que la confiabilidad de los resultados de los modelos, dentro de las limitaciones esperadas, se clasifican como buenos, y lo atestigua el correcto funcionamiento de muchas estructuras diseñadas a partir de ensayos sobre un Modelo Hidráulico.

#### .- Modelos Hidráulicos. ( construcción )

Para construir un modelo hidráulico es necesario contar con el espacio suficiente, además de tener las instalaciones necesarias para su - ensayo; éstas condiciones son obtenidas generalmente en todo laboratorio -- hidráulico.

Al construir y ensayar un Modelo Hidráulico se deberán tomar en cuenta las siguientes normas:

- 10).- Contar con todos los planos necesarios de Proyecto del Prototipo, como son: Levantamientos Topográficos, batimetrías aerofotografías, perfiles geológicos, planos de cálculo -- teórico, etc.
- 20).- Buscar una escala ó escalas para construir el modelo, de acuerdo al espacio que se tenga disponible y al tipo de modelo a experimentarse.
- 30).- El modelo será una réplica lo más exacta posible a escala del prototipo.
- 40).- En la construcción del Modelo se deberá tener cuidado, de dar las mediciones correctas a escala, ya que una falla pequeña en ellas, implicaría errores en el prototipo.
- 50).- Deberá estar equipado con dispositivos adecuados, para -- asegurar el control y medida del gasto a emplearse.
- 60).- Deberá llevarse un registro fotográfico de los detalles -- pertinentes.
- 70).- Deberá contarse con los instrumentos de medición lo más -- exactos posibles.
- 80).- Deberá estar de acuerdo con su objeto y costo.

## .- ANTECEDENTES

El proyecto se destinará al control del Arroyo "Las Higueras", para aprovechar sus aguas en riego de 1,266 Has., de terrenos situadas en ambas márgenes.

A fin de tener un panorama general de las condiciones existentes en la entidad donde se localiza el proyecto "Las Higueras" base de ésta tesis profesional, para la obtención del Título de Ingeniero Civil se examina brevemente en éste capítulo, las características climatológicas de la región; así como su desarrollo económico y social.

### .- Características Climatológicas.

El clima predominante de la región, según la clasificación de C.W. Thornthwaite, es del tipo semi-árido, tropical con lluvias deficientes en invierno. Durante los meses de enero a junio, la precipitación es muy escasa e irregular, empezando el período de estiaje a fines de marzo y se prolonga hasta el mes de junio, con sequías extremas a fines de mayo.

Las lluvias torrenciales que se presentan durante los meses de julio, agosto y septiembre, son producidas por las corrientes de las vientos alisios, que acarrean una considerable cantidad de humedad y al chocar con la cordillera, producen las más grandes precipitaciones del año. Existe otro período de lluvias de corta duración que tiene lugar en invierno, que son producidas por las grandes masas de aire frío que viene del norte, que al chocar con masas de aire húmedo, establecen los llamados "frentes" a lo largo de los cuales se producen lloviznas persistentes en los meses de diciembre y enero.

La precipitación anual oscila entre los 800 y 900 m.m. con vientos dominantes del Sur-este, las que tienen velocidades medias de 20 m/seg.

Las temperaturas registradas son del orden de 45°C, la máxima y de -3.50°C, la mínima y una temperatura media anual de 25.20 C.

La flora de la región está representada por el mezquite, el vainero blanco, el amapa, el pochote, el palo Brasil, el guamúchil, el palo pinto vegetación de las llamadas chaparrales y pastizales, ocasionalmente se encuentra también la pitehaya.

#### .- DESARROLLO ECONOMICO.

Con respecto a su desarrollo económica, podemos decir que la explotación agrícola de los terrenos se hace en un porcentaje muy bajo, probablemente en menos del 20 % . Se debe esta pequeña explotación a la falta de obras de riego ya que los cultivos exclusivamente de temporal no prosperan con éxito ó tienen rendimientos muy bajos.

Los principales cultivos que se practican en ésta región en orden de importancia son: maíz, frijol, ajonjolí, tomate, trigo, garbanzo, algodón, chile, plátano, chícharo, cártamo, sandía, melón, y hortalizas en general.

Otros fuentes de trabajo de importancia son: la ganadería, poco desarrollada y la explotación de los recursos minerales en lo que se puede llamar industria minera incipiente estando buena parte de la fuerza laboral técnicamente adiestrada, para ésta clase de trabajo.

El aumento de población, esté condicionado a la influencia ejercida por las inundaciones y las sequías que son muy frecuentes ya que su economía depende de:

La abundancia o ausencia de lluvias, la existencia de pastos para el ganado y las enfermedades no controladas del mismo. Factores similares rigen el índice de natalidad viéndose influenciado por la carencia total de -- servicios municipales y sanitarios de las poblaciones.

El municipio de Rosarita, abarca una superficie de 2,723.00 Km<sup>2</sup>, en la que viven 39,728 habitantes (1970), representando el 4.69% de la superficie del Estado y 3.14% de su población.

Las deficiencias detectadas a nivel Municipal y Local, en lo que se refiere a la vivienda, alimentación, educación, servicios, rendimientos agrícolas e ingresos, motivó a la S.R.H., para que através de la Dirección General de Obras de Riego para el Desarrollo Rural, se estudiara, la posibilidad de mejorar las condiciones económicas con la construcción de una obra para riego.

En las inmediaciones del Poblado de Petrerillas, se localizó un sitio adecuada, tanto geológica como topográficamente, para la construcción de una presa de almacenamiento, por lo que se procedió a recopilar los siguientes datos:

#### .- DATOS AEROLÓGICOS.

Se dispone de 820 Has. de 1a. clase y 454 de 2da. clase, superficie que abarcará un alto porcentaje de la zona de riego, por lo que los cultivos que se realicen, tienen perspectivas de buenas rendimientos.

Por la cercanía de la Carretera México-Nogales, con la zona de riego y su proximidad de ésta con la cabecera Municipal y el Puerto de Mazatlán, así como de todas las ciudades que comunica la carretera, los productos agrícolas que se obtengan, tendrán una fácil comercialización.

En el Municipio el 95.62 % tiene ingresos menores de \$ -- \$ 4,000.00 mensuales, siendo el salario mínimo de \$ 112.00 diarios, el 43.17 % tiene ingresos menores de \$ 2,000.00 mensuales y consecuentemente menores al salario mínimo que representa \$ 3,406.68 al mes, suponiendo que se trabajen los 365 días al año.

La obra de riego incrementará el ingreso familiar de los futuros usuarios de \$ 5,068.71 mensual a \$ 49,001.56 en el sexto año en que se considera se estabilizará la producción del sistema de riego, teniendo desde el 1er. año que rieguen, un incremento de 3.35 veces el ingreso actual.

Considerando que el fortalecimiento económico del Poblado de Patrerillos, se reflejará en el fortalecimiento del Municipio, -- tanto económico, alimenticio y social, así como en el incremento de las fuentes de trabajo, se pone a consideración de las Altas Autoridades su construcción.

**.- Metas del Proyecto.**

Las metas del proyecto "Las Higueras", son el de proteger contra inundaciones por desbordamiento del Arroyo "Las Higueras", a una faja de terreno que se extiende a lo largo de la propia corriente, que -- comprende terrenos de cultivo y localidades rurales.

Integrar los sistemas de riego a lo largo del Arroyo, para constituir una unidad homogénea sujeta a un reglamento único, controlada y operada por S.A.R.H.

Incrementar substancialmente el volumen y la calidad de la producción agrícola en la zona de riego, con el apoyo de un adecuado programa de extensionismo agrícola y de asistencia técnica, que permita lograr la máxima eficiencia de las explotaciones; así como reestructurar el sistema actual de tenencia de la tierra existente en la zona de riego, a fin de elevar a niveles más adecuados, los ingresos de la totalidad de los agricultores que laboran en el área del proyecto.

## CAPITULO II

### GENERALIDADES DEL PROTOTIPO

- .- Localización**
- .- Datos del Proyecto**
- .- Aspectos Técnicos**

## .- Localización.

El proyecto "Las Higueras", se localiza en la jurisdicción del Municipio del Rosario, sobre el Arroyo del mismo nombre en el Estado de Sinaloa a 2.5 Kms. del poblado de Potrerillos, asentado sobre la Carretera México-Nogales, el cuál dista 11.5 Kms. al norte de la cabecera Municipal, la que a su vez queda a 290 Kms. al sur de la Ciudad de Culiacán, Capital del Estado.

## .- Datos del Proyecto.

Con el Proyecto "Las Higueras", se pretende aprovechar los escurrimientos superficiales del Arroyo del mismo nombre, mediante la construcción de una Presa de Almacenamiento, para una capacidad total de 13.0 mill. de  $M^3$  con el fin de regar 1,266 Has. netas en una 1a. etapa, en beneficio de 147 familias de pequeños propietarios y ejidatarios.

La presa de almacenamiento, dispondrá de una cortina de materiales graduados, un vertedor de canal lateral en la margen derecha y obra de toma del tipo de Torre y Galería.

La cortina de 23.0 mts. de altura sobre el cauce, tendrá 6.0 mts. de ancho de corona y 194.0 mts. de longitud y un dique de 170.0 mts. de longitud, el corazón impermeable tendrá un talud de 0.25:1, en ambos parámetros, profundizándose hasta la roca, la cuál está a -15.0 mts. de profundidad bajo el cauce, sobre el material impermeable. Se recargará el material de transición, hasta un talud de 2:1 en ambos parámetros, el cuál se cubrirá con una capa de enrocamiento semi-acomodado de 1.0 mts. de espesor.

El vertedor localizado en la margen derecha del tipo de Canal Lateral, tendrá una cresta vertedora de 125.0 mts. de longitud, para dar paso a un gasto de  $1,279 \text{ m}^3/\text{seg.}$ , que será el de la avenida máxima regularizada a su salida, dispondrá de un Cifreco, para verter el agua al canal de descarga de 145.46 mts. de longitud con revestimiento de concreto armado.

La obra de toma se construirá en la margen derecha, dispondrá de una Torre de concreto reforzado de 14.50 mts. de altura de sección de 2.0 X 2.0 mts., dispondrá de una rajilla a la entrada de la obra con 2 compuertas deslizantes de 1.525 X 1.220 mts., una de servicio y la otra de emergencia; de una galería de 52.90 mts. de longitud para un  $Q_{normal} = 2.90 \text{ m}^3/\text{seg.}$  el agua desfogueará en un tanque amortiguador con una transición en la plantilla 1.25 a 2.00 mts. y de 28.30 mts. de longitud.

La zona de riego dispondrá de un canal principal en la margen derecha de 12.64 Kms. de longitud y sub-laterales y las estructuras necesarias, para el riego de 1,266 Has. netas en su 1a. etapa.

Para desalojar los excedentes se cuenta con un vertedor de canal lateral con capacidad de  $1,279 \text{ m}^3/\text{seg.}$  con una longitud de cresta del vertedor de 80.00 mts.; la elevación de la cresta del vertedor es igual a 50.85 mts. con carga para desalojar la avenida de 4.07 mts. y coeficiente de descarga de proyecto de 1.95 .

Hidrologicamente se dispone, de un escurrimiento medio anual de - 13,041,476  $\text{m}^3$ , con escurrimiento máximo anual de 56.4 mill. de  $\text{m}^3$  y mínimo anual de 12.9 mill. de  $\text{m}^3$ , requiriendose para un aprovechamiento de 42.40 % del escurrimiento, una presa de almacenamiento de 13.0 mill. de  $\text{m}^3$ , de capacidad total; con lo cual se regarán 1,266 Has. en 1a. etapa de cultivos mixtos.

Geológicamente la boquilla y el vaso, se localizan en una región eminentemente ígnea; formada por efusiones de magmas riolíticos, basálticos y andesíticos, quedando la boquilla labrada en toba riolítica y basalto, -- con un espesor máximo de acarreo en el cauce de 15.80 mts.

Además de los objetivos básicos del proyecto, también se desea dominar, con obras de riego, drenaje y caminos una área de 1,523.10 Has. netas de terrenos de cultivo, distribuyendose de la siguiente manera.

## SUPERFICIE En Has.

	Total	Dominada	Riego
Ejido Potrerillos	600.70	600.70	541.10
Pequeños propietarios	629.60	629.60	398.10
Ejido de Laguna de Beltranes	292.80	292.80	286.80
	<hr/> 1,523.10	<hr/> 1,523.10	<hr/> 1,226.00

## .- Aspectos Técnicos:

Proyecto: "Las Higueras"

Estado: Sinaloa

Municipio del Rosario

1.- Tipo de obra: Presa de Almacenamiento y Zona de riego.

2.- Clasificación: Obra de pequeña irrigación  
(251 a 500 Has.)

3.- Aprovechamiento superficiales

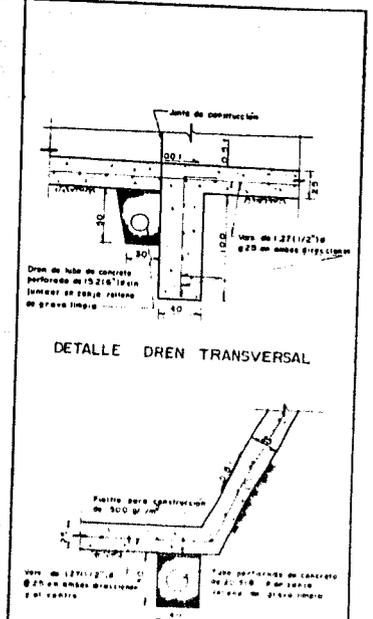
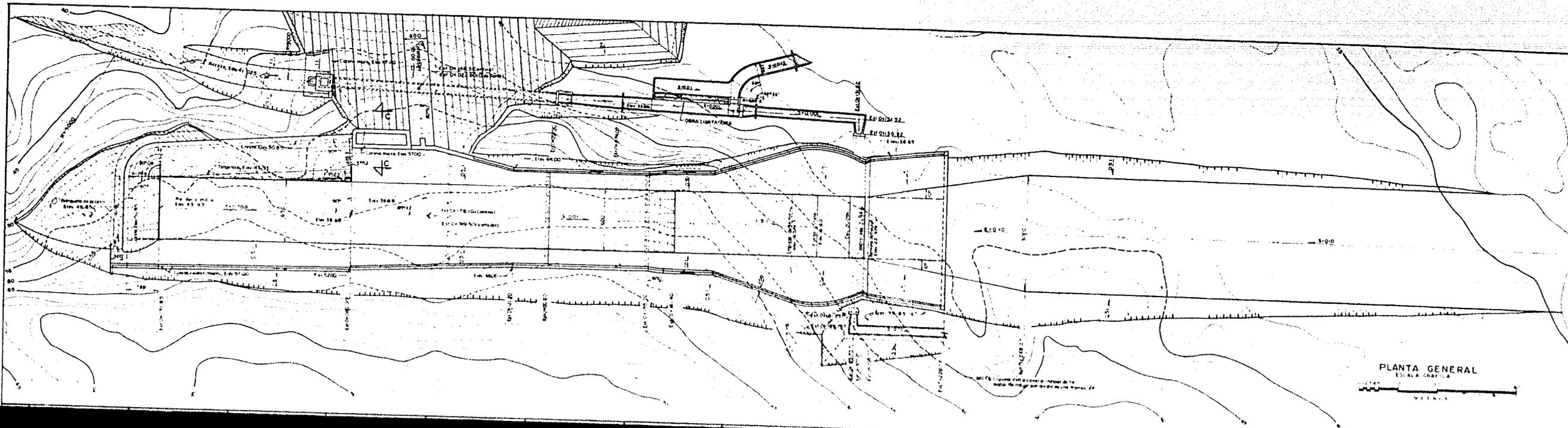
a).- Capacidad total de almacenamiento = 13 mill. de m<sup>3</sup>

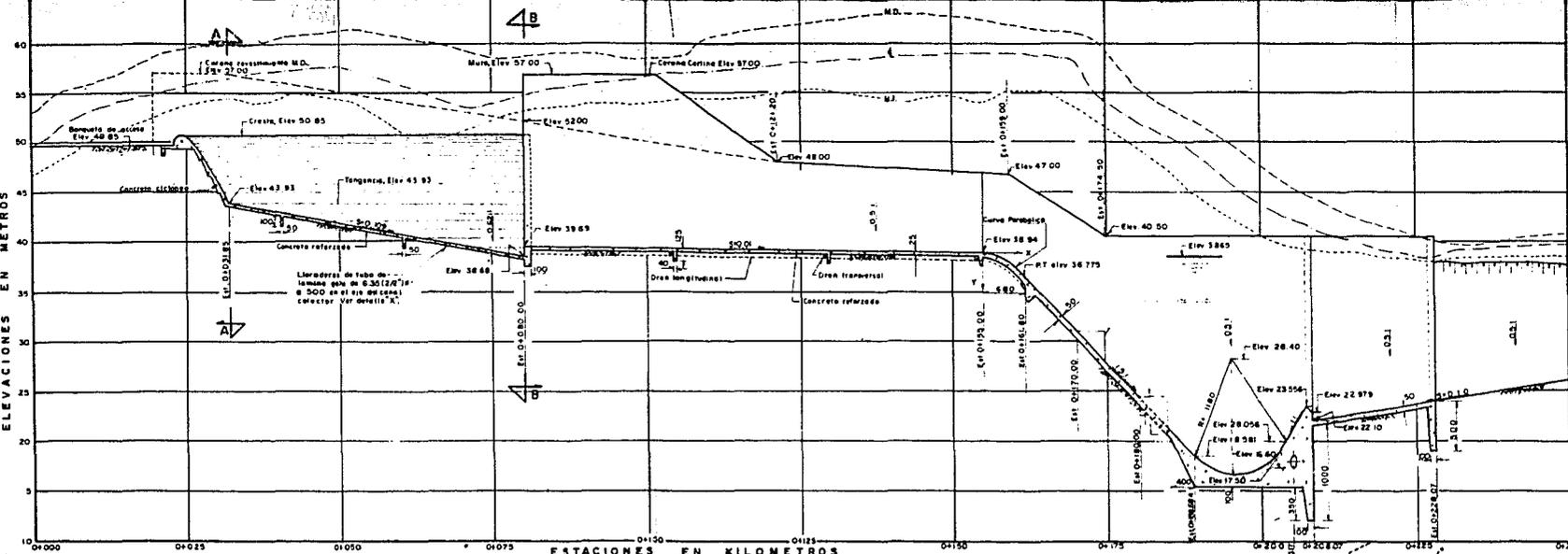
b).- Longitud del canal principal . . . . . = 12.6 Kms.

c).- Uso: Riego . . . . . = 1,266 Has.

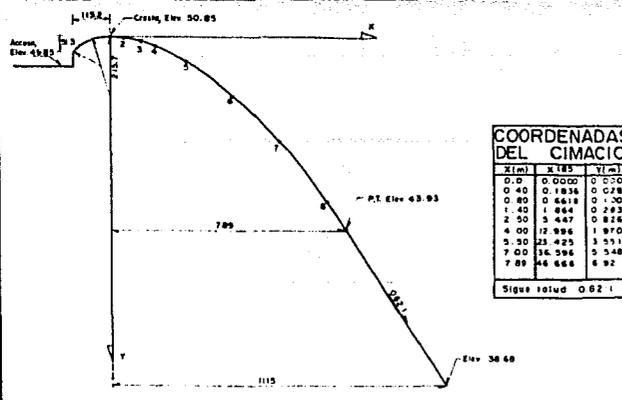
4.- Presupuesto: \$20.080 millones de pesos.

C O N C E P T O	millones de pesos	
cortina . . . . .	4.500	
vertedor . . . . .	1.200	
dique . . . . .	0.800	
obra de toma . . . . .	0.400	
zona de riego . . . . .	7.500	
tratamiento de cimentación . . . . .	1.731	
imprevistos . . . . .	1.129	16.133
dirección y administración . . . . .	2.620	17.260
	<hr/>	<hr/>
Total para obras: . .	20.080	



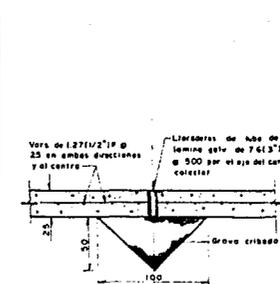


PERFIL DEL VERTEDOR POR LA LINEA DEL CENTRO



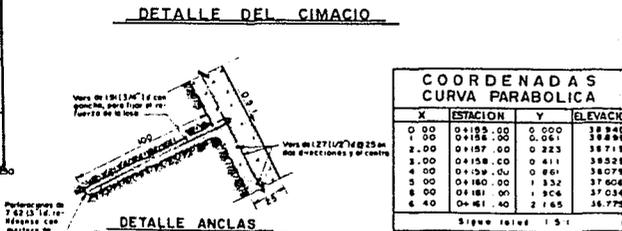
**COORDENADAS DEL CIMACIO**

X(m)	Y(m)	Z(m)
0.0	0.0000	0.000
0.40	0.1936	0.028
0.80	0.6618	0.100
1.20	1.2664	0.243
1.60	2.0000	0.450
2.00	2.8447	0.726
2.40	3.7896	1.070
2.80	4.8243	1.571
3.20	5.9496	2.226
3.60	7.1664	3.045
4.00	8.4756	4.028
4.40	9.8784	5.175
4.80	11.3760	6.492
5.20	12.9696	7.971
5.60	14.6592	9.612
6.00	16.4448	11.415
6.40	18.3264	13.280
6.80	20.3040	15.307
7.20	22.3776	17.498
7.60	24.5472	19.854
8.00	26.8128	22.375
8.40	29.1744	25.062
8.80	31.6320	27.915
9.20	34.1856	30.934
9.60	36.8352	34.119
10.00	39.5808	37.471
10.40	42.4224	40.990
10.80	45.3600	44.677
11.20	48.3936	48.532
11.60	51.5232	52.555
12.00	54.7488	56.746
12.40	58.0704	61.105
12.80	61.4880	65.632
13.20	65.0016	70.327
13.60	68.6112	75.190
14.00	72.3168	80.221
14.40	76.1184	85.420
14.80	79.9160	90.787
15.20	83.8096	96.322
15.60	87.8000	102.025
16.00	91.8872	107.896
16.40	96.0712	113.934
16.80	100.3520	120.139
17.20	104.7296	126.511
17.60	109.2040	133.050
18.00	113.7752	139.756
18.40	118.4432	146.629
18.80	123.2080	153.669
19.20	128.0792	160.876
19.60	133.0468	168.250
20.00	138.1112	175.791
20.40	143.2720	183.498
20.80	148.5296	191.371
21.20	153.8840	199.410
21.60	159.3352	207.615
22.00	164.8832	215.986
22.40	170.5280	224.523
22.80	176.2696	233.226
23.20	182.1080	242.095
23.60	188.0432	251.130
24.00	194.0752	260.331
24.40	200.2040	269.698
24.80	206.4296	279.231
25.20	212.7520	288.930
25.60	219.1712	298.795
26.00	225.6872	308.826
26.40	232.3000	319.023
26.80	238.9096	329.386
27.20	245.6160	339.915
27.60	252.4192	350.610
28.00	259.3192	361.471
28.40	266.3160	372.498
28.80	273.4096	383.691
29.20	280.6000	395.050
29.60	287.8872	406.575
30.00	295.2712	418.266
30.40	302.7520	430.123
30.80	310.3296	442.146
31.20	317.9040	454.334
31.60	325.5752	466.687
32.00	333.3432	479.205
32.40	341.2080	491.888
32.80	349.1696	504.736
33.20	357.2280	517.749
33.60	365.3832	530.927
34.00	373.6352	544.270
34.40	381.9840	557.778
34.80	390.4296	571.451
35.20	398.9720	585.289
35.60	407.6112	599.292
36.00	416.3472	613.460
36.40	425.1800	627.793
36.80	434.1096	642.291
37.20	443.1360	656.954
37.60	452.2592	671.782
38.00	461.4792	686.775
38.40	470.7960	701.933
38.80	480.2096	717.256
39.20	489.7200	732.744
39.60	499.3272	748.397
40.00	509.0312	764.215
40.40	518.8320	780.198
40.80	528.7296	796.346
41.20	538.7340	812.659
41.60	548.8452	829.137
42.00	559.0632	845.780
42.40	569.3880	862.588
42.80	579.8192	879.561
43.20	590.3568	896.699
43.60	600.9000	913.912
44.00	611.5488	931.290
44.40	622.3032	948.833
44.80	633.1632	966.541
45.20	644.1288	984.414
45.60	655.2000	1002.452
46.00	666.3768	1020.655
46.40	677.6592	1039.023
46.80	689.0472	1057.556
47.20	700.5408	1076.254
47.60	712.1400	1095.117
48.00	723.8448	1114.145
48.40	735.6552	1133.338
48.80	747.5712	1152.696
49.20	759.5928	1172.219
49.60	771.7200	1191.906
50.00	783.9536	1211.758
50.40	796.2936	1231.775
50.80	808.7400	1251.957
51.20	821.2928	1272.304
51.60	833.9520	1292.816
52.00	846.7176	1313.493
52.40	859.5896	1334.335
52.80	872.5680	1355.342
53.20	885.6528	1376.514
53.60	898.8440	1397.851
54.00	912.1416	1419.353
54.40	925.5456	1441.020
54.80	939.0560	1462.852
55.20	952.6728	1484.849
55.60	966.3960	1506.911
56.00	980.2256	1529.138
56.40	994.1616	1551.531
56.80	1008.2040	1574.090
57.20	1022.3528	1596.815
57.60	1036.6080	1619.706
58.00	1050.9696	1642.763
58.40	1065.4376	1665.986
58.80	1080.0120	1689.375
59.20	1094.6928	1712.929
59.60	1109.4800	1736.648
60.00	1124.3736	1760.532



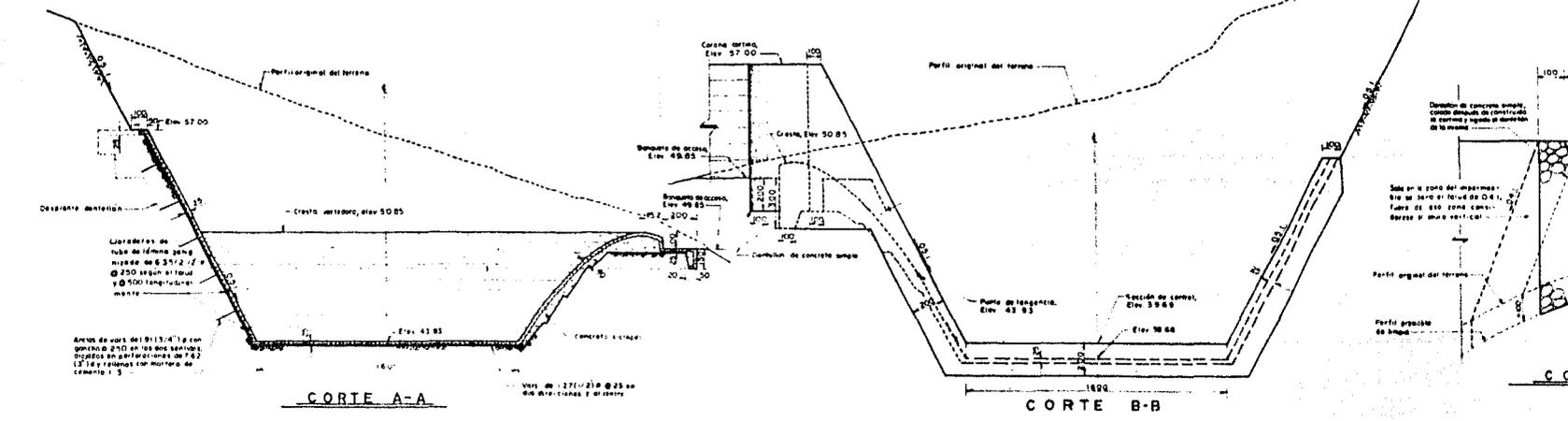
**DATOS DEL PROYECTO**

Cantidad total de construcción	15000.000 m <sup>3</sup>
Altimetría máxima permitida	2.800 m <sup>3</sup>
Altimetría mínima permitida	1.278 m <sup>3</sup>
Longitud de la cresta vertedor	80 m
Elevación de la cresta vertedor	50.85 m
Carga sobre la cresta	4.07 m
Elev. de la base de la cresta	46.78 m
Coefficiente de descarga	1.95 m

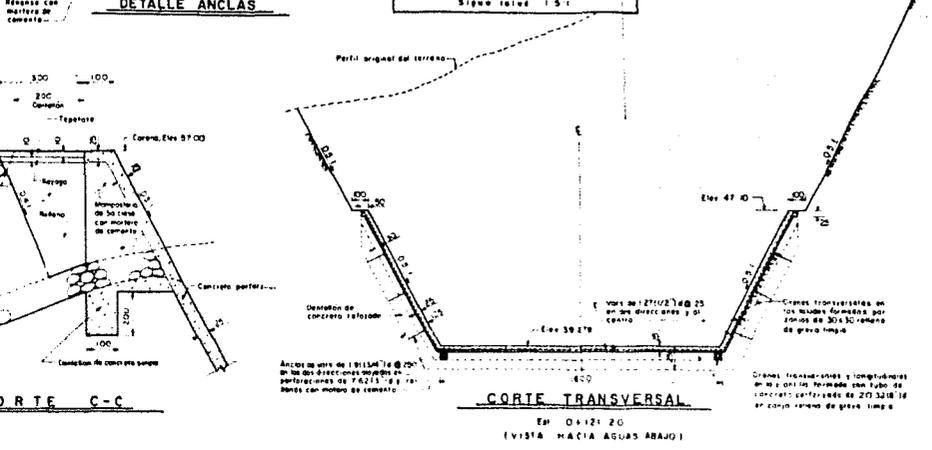


**COORDENADAS CURVA PARABOLICA**

X	ESTACION	Y	ELEVACION
0.00	0+193.00	0.000	36.840
1.00	0+198.00	0.041	36.899
2.00	0+197.00	0.223	36.715
3.00	0+198.00	0.411	36.329
4.00	0+198.00	0.601	35.079
5.00	0+180.00	1.832	37.608
6.00	0+181.00	1.906	37.034
6.40	0+181.40	2.165	36.775



CORTE A-A



CORTE B-B

**CANTIDADES ESTIMADAS**

Excavación	181800 m <sup>3</sup>
Mampostería de 30 cms	100 m <sup>3</sup>
Grava para drenes	100 m <sup>3</sup>
Concreto simple	30 m <sup>3</sup>
Concreto reforzado	5700 m <sup>3</sup>
Filtro sintético para construcción de 300 gr/m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>
Tubo perforado de concreto de 20.30 (8") ø	800 m
Tubo perforado de concreto de 15.24 (6") ø	140 m
Tubo de lámina galvanizada de 6.35 (1/2") ø	10 m
Varillas de 1.90 (3/8") ø	105000 kg
Varillas de 1.27 (1/2") ø	50100 kg
Varillas de 1.91 (3/4") ø	1050 kg

**NOTAS:**  
 1. Aclaraciones en cualquier momento las elevaciones en otro nivel.  
 2. Estaciones en kilómetros y elevaciones en metros.—La mampostería será de 30 cms con mortero de cemento que de una resistencia a la compresión de 400 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de fabricado.—La forma de los drenajes podrá modificarse a juicio del Ingeniero de Campo.

**TESIS PROFESIONAL**  
 Proyecto "Los Higueros" - Mar de Rosario, San  
**VERTEDOR**  
 PLANO GENERAL No. 1

## CAPITULO III

### SINTESIS DE LA TEORIA DE LOS MODELOS HIDRAULICOS

#### .- Introduccion

#### .- Modelos Hidráulicos

#### .- Teoría de la Similitud ó Semejanza

##### ..- Semejanza Geométrica

##### ..- Semejanza Cinemática

##### ..- Semejanza Dinámica

#### .- Leyes de Similitud

##### ..- Ley de similitud de Froude

##### ..- Ley de similitud de Reynolds

##### ..- Ley de similitud de Euler

##### ..- Ley de similitud de Cochy

##### ..- Ley de similitud de Weeber

#### .- Leyes más frecuentes en Ingeniería Civil

##### ..-Ley de similitud de Reynolds

##### ..- Ley de similitud de Froude

#### .- Modelos Distorsionados

##### ..- Ventajas

##### ..- Inconvenientes

## .- TEORIA DE LA SIMILITUD O SEMEJANZA.

Para que los resultados obtenidos con el Modelo Hidráulico sean confiables y por lo tanto aplicables al prototipo, es necesario que los dos sistemas de flujo, sean "hidráulicamente semejantes"; lo cual implica que entre modelo y prototipo, exista:

- ..- Semejanza Geométrica
- ..- Semejanza Cinemática
- ..- Semejanza Dinámica

## .-Similitud Geométrica

Es la semejanza geométrica en cuanto a la forma; es decir la relación de todas las longitudes homólogas en los dos sistemas es la misma. Esto es, si ciertas dimensiones lineales dentro de los flujos se seleccionan y se designan por los subíndices:

p = dimensiones lineales del prototipo

m = dimensiones lineales del modelo

La similitud geométrica significaría por ejemplo que:

$$E_L = \frac{H_p}{H_m} = \frac{B_p}{B_m} = \frac{S_p}{S_m} = \dots = cte$$

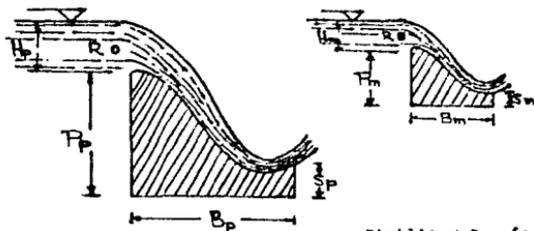
DONDE:

$E_L$  = A la escala de líneas, que cuantifica al tamaño relativo de los dos sistemas.

En general podremos decir que "ESCALA", es la relación constante entre una magnitud física cualquiera del prototipo, dividida entre la - -

correspondiente del modelo; es decir

$$\text{ESCALA} = \frac{\text{Magnitud física cualquiera del prototipo}}{\text{Magnitud física correspondiente en el modelo}} = \text{constante}$$



Similitud Geométrica entre dos flujos.

Una consecuencia de la similitud geométrica exacta, es que la relación de áreas y volúmenes en ambos sistemas, se puede expresar en términos del cuadrado y del cubo de " $E_L$ "; es decir:

$$E_a = \frac{A_p}{A_m} = E_L^2 = \text{cte.}$$

$$E_{\text{vol.}} = \frac{\text{Vol. } p}{\text{Vol. } m} = E_L^3 = \text{cte.}$$

Estrictamente, la similitud geométrica debería incluir a las rugosidades superficiales de las paredes que limitan al flujo, pero esto a veces resulta imposible, por ejemplo, cuando se construye el modelo hidráulico a pequeña escala y las superficies del prototipo son relativamente suaves no es posible obtener el grado de suavidad adicional necesario en el modelo.

Por lo anterior es fácil de comprender que a menudo existirán violaciones a la similitud geométrica, pero éstas son necesarias y tolerables, debido a que lo verdaderamente importante, es el comportamiento hidráulico originado por las condiciones de los límites.

## .- Similitud Cinemática

Se considera que entre modelo y prototipo, existe semejanza cinemática; cuando las trayectorias de las partículas móviles homólogas son geoméricamente semejantes y además, las relaciones entre las velocidades de las partículas homólogas son iguales.

A continuación se expresan las siguientes relaciones útiles

Velocidad:

$$E_v = \frac{V_p}{V_m} = \frac{L_p T_p^{-1}}{L_m T_m^{-1}} = \frac{L_p T_m}{L_m T_p} = E_L E_t^{-1} = \text{cte}$$

Aceleración:

$$E_a = \frac{A_p}{A_m} = \frac{L_p T_p^{-2}}{L_m T_m^{-2}} = \frac{L_p T_m^2}{L_m T_p^2} = E_L E_t^{-2} = \text{cte}$$

Gasto:

$$E_q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{L_p^3 T_p^{-1}}{L_m^3 T_m^{-1}} = \frac{L_p^3 T_m}{L_m^3 T_p} = E_L^3 E_t^{-1} = \text{cte}$$

## .- Similitud Dinámica

Entre dos sistemas semejantes geométrica y cinemáticamente, existe semejanza dinámica si las relaciones entre las fuerzas homólogas entre modelo y prototipo son las mismas.

Las condiciones requeridas, para la semejanza completa, se obtiene a partir de la segunda Ley de Newton.

$$\Sigma F_x = M a_x$$

Las fuerzas individuales que actúan sobre los elementos de masa de los correspondientes fluidos, pueden ser cualquiera de las siguientes, ó una combinación de las mismas.

- $F_v$  = Fuerzas Viscosas
- $F_p$  = Fuerzas debidas al gradiente de presiones
- $F_g$  = Fuerzas gravitatorias
- $F_s$  = Fuerzas debidas a la tensión superficial
- $F_e$  = Fuerzas Elásticas

Nota: En algunos casos es importante la fuerza de Coriolis.

La condición de similitud en general para modelo y prototipo es la siguiente: "La ecuación que rige el movimiento en el modelo pasa a regir el movimiento del prototipo, por medio de las escalas correspondientes, y que haya semejanza geométrica ó de forma".

Las Leyes mencionadas anteriormente, se obtienen a partir de las ecuaciones dinámicas de los líquidos, ó sean las "Ecuaciones de NAVIER-STOKES"; considerando que únicamente actúan las fuerzas de :

- a).- Fuerzas de Inercia
- b).- Fuerzas gravitatorias
- c).- Fuerzas debidas a las presiones normales
- d).- Fuerzas viscosas laminares

Las ecuaciones de NAVIER - STOKES, para el caso de líquidos - - incompresibles son:

$$a_x = -g_x \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]$$

$$a_y = -g_y \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]$$

$$a_z = -g_z \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$$

Se supondrá por facilidad únicamente, un escurrimiento en una sola dirección, la del eje "z" (que se encuentra localizado verticalmente hacia arriba) por lo que la componente de la ecuación de NAVIER-STOKES en ésta dirección es:

$$a_z = \underbrace{w \frac{dw}{dz}}_{\text{INERCIA}} - \underbrace{g_z \frac{\partial h}{\partial z}}_{\text{PESO}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}}_{\text{PRESIÓN}} + \underbrace{\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}}_{\text{VISCOSIDAD}}$$

donde:

$$a_z = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dz} \frac{dz}{dt} = w \frac{dw}{dz} = \text{Aceleración total resultante ó fuerza de inercia por unidad de masa}$$

$$-g_z \frac{\partial h}{\partial z} = \text{Fuerza exterior ó Fuerza másica}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \text{Fuerza debida a las presiones normales}$$

$$\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \text{Fuerza debida a las presiones tangenciales ó fuerza de fricción.}$$

Si se considera que la única fuerza exterior, es la debida a la acción de la gravedad; se obtiene que:

$$-g = -g_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

por lo que:

$$w \frac{dw}{dz} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}$$

Aplicando esta ecuación al modelo:

$$W_m \frac{dw_m}{dz_m} = -g_m - \frac{1}{\rho_m} \frac{dp_m}{dz_m} + V_m \left[ \frac{d}{dz_m} \left( \frac{dw_m}{dz_m} \right) \right]$$

Para poderse expresar, esta misma ecuación en el prototipo, de acuerdo con la definición de escala, deberá multiplicarse cada magnitud por la escala correspondiente.

$$\frac{E_G^2}{E_L} \left( W_m \frac{dw_m}{dz_m} \right) = E_G (-g_m) - \frac{1}{\rho_m} \frac{1}{E_P} \left( \frac{dp_m}{dz_m} \right) \frac{E_P}{E_L} + \\ + V_m \sqrt{\left[ \frac{d}{dz_m} \left( \frac{dw_m}{dz_m} \right) \right]} \frac{E_V}{E_L^2} \dots \dots \dots (A)$$

$$\frac{E_V^2}{E_L} \left( W_m \frac{dw_m}{dz_m} \right) = E_G (-g_m) - \frac{E_P}{\rho_m E_L} \left( \frac{1}{\rho_m} \frac{dp_m}{dz_m} \right) + \\ + \frac{E_V E_V}{E_L^2} \left[ V_m \frac{d^2 w_m}{dz_m^2} \right] \dots \dots \dots (B)$$

Esta expresión nos indica, que para obtener las ecuaciones de similitud, se iguala el primer miembro de la ecuación, con el término del segundo miembro que represente el efecto predominante en el fenómeno que se estudia. Pues es imposible cumplir, con toda la ecuación anterior; es decir; se guarda similitud en un sólo aspecto y se desprecian aquellos - que tengan menor influencia.

Por ejemplo, supongamos que nos interesa un cierto fenómeno, en donde la fuerza predominante es debida a la gravedad.

La ecuación (B), podemos expresarla de la siguiente manera:

$$\frac{E_V^2}{E_L} \left( W_m \frac{dw_m}{dz_m} \right) = E_G (-g_m)$$

Como se ha considerado, para el modelo que:

$$\frac{d\alpha}{dx} = -g_m$$

obteniendo:

$$\frac{Ev^2}{E_L Eg} = 1$$

Expresión que se conoce como ley de similitud de "FROUDE", acostumbrándose a expresarla de la siguiente manera:

Ley de similitud

$$\frac{\text{de}}{\text{Froude}} = \frac{Ev}{\sqrt{E_L Eg}} = 1$$

Aplicando el concepto de escala:

$$\frac{\frac{V_p}{V_m}}{\sqrt{\frac{g_p L_p}{g_m L_m}}} = 1$$

$$F_p = \frac{V_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m L_m}} = F_m$$

Es decir, cuando los efectos de la fuerza debida a la gravedad, -- predominan en un cierto fenómeno, existirá semejanza entre modelo y prototipo, si en ambos existe el mismo número de Froude.

Ahora, supongamos que son despreciables los efectos de las presiones normales y los de la gravedad; por lo que la ecuación (8) se nos reduce a:

$$\frac{E_v^2}{E_L} \left( \frac{b_m}{L_m} \frac{d^2 u_m}{dz_m^2} \right) = \frac{E_v E_v}{E_L^2} \left( \nu_m \frac{d^2 u_m}{dz_m^2} \right)$$

Procediendo análogamente al caso anterior, se obtiene:

$$\frac{E_v^2}{E_L} = \frac{E_v E_v}{E_L^2}$$

$$\frac{E_v E_L}{E_v} = 1 = \frac{\text{Ley de similitud}}{\text{de Reynolds}}$$

Expresión conocida como la Ley de Similitud de Reynolds.

Aplicando el concepto de escala:

$$\frac{V_p L_p}{V_m L_m} = 1$$

$$\frac{V_p}{V_m}$$

$$R_p = \frac{V_p L_p}{\nu_p} = \frac{V_m L_m}{\nu_m} = R_m$$

Entonces, para que modelo y prototipo sean dinámicamente semejantes, deberá existir en ambos el mismo "Número de Reynolds", cuando predominen los efectos de la fricción laminar.

Finalmente, si fueran despreciables los efectos de la gravedad, -

la ecuación (B) nos queda de la siguiente manera:

$$\frac{E_v^2}{E_L} \left( u_m \frac{du_m}{dz_m} \right) = \frac{E_p}{E_p E_L} \left( - \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial p_m}{\partial z_m} \right)$$

$$\frac{E_v^2}{E_L} = \frac{E_p}{E_p E_L}$$

$$\frac{E_v^2 E_p}{E_p} = 1$$

Expresión conocida, como la Ley de Similitud de "EULER", acostumbrándose a expresarla de la siguiente manera:

Ley de similitud

$$\frac{de}{EULER} = \sqrt{\frac{E_v}{E_p}} = 1$$

Nuevamente, aplicandola definición de escala:

$$\sqrt{\frac{V_p}{V_m} \frac{\rho_p}{\rho_m}} = 1$$

$$E_p = \sqrt{\frac{V_p \rho_p}{\rho_p}} = \sqrt{\frac{V_m \rho_m}{\rho_m}} = E_m$$

Lo que significa que para que sean semejantes los fenómenos devidos a las presiones normales, en modelo y prototipo, deberá existir en ambos el mismo número de Euler.

Existen otras leyes de similitud, relacionadas con acciones que no toma en cuenta la Ecuación de NAVIER - STOKES; para obtenerlas se hace necesario el uso del Análisis Dimensional.

Establezcamos la expresión del "Número de Cauchy", aplicando el Análisis Dimensional, sabiendo que es una función de la densidad, la velocidad del fluido y de su módulo de elasticidad volumétrico.

$$C = f(\rho, v, E)$$

$$C = k \rho^a v^b E^c$$

dimensionalmente:

$$M^0 L^0 T^0 = [M L^{-3} T^0]^a [M^0 L T^{-1}]^b [M L^{-1} T^{-2}]^c$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{a+c} L^{-3a+b-c} T^{-b-2c}$$

Igualando los exponentes de M, L y T, se obtiene:

$$0 = a+c$$

$$a = -c$$

$$0 = -3a+b-c$$

$$b = -2c$$

$$0 = -b-2c$$

Substituyendo:

$$C = k \rho^{-c} v^{-2c} E^c$$

$$C = k \left( \frac{\rho v^2}{E} \right)^{-c}$$

Los valores de "K" y "C", tienen que determinarse por análisis físico y/o por experimentación.

Si hacemos :  $K = +1$  y  $C = -1$

$$\text{Entonces: } C = \frac{\rho v^2}{E}$$

Si tomamos el número de Cauchy, igual en modelo y prototipo, estamos indicando que en el fenómeno en estudio, el factor preponderante es la acción de la elasticidad del medio.

Como:

$$C_p = C_m$$

$$\frac{\rho_p v_p^2}{E_p} = \frac{\rho_m v_m^2}{E_m}$$

Ley de similitud

de

Cauchy

$$\frac{E_p E^2 v}{E_m} = 1$$

Establezcamos ahora, la expresión del "Número de Weber", aplicando también el análisis dimensional. Como sabemos, está en función de la densidad, de la velocidad del fluido, de una longitud característica y de la tensión superficial.

$$W = f(\rho, v, l, \sigma)$$

$$W = K \rho^a v^b l^c \sigma^d$$

dimensionalmente:

$$M^0 L^0 T^0 = [ML^{-3}T^0]^a [M^0 L T^{-1}]^b [M^0 L T^d]^c [ML^0 T^{-2}]^d$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{a+d} L^{-3a+b+c} T^{-b-2d}$$

Iguando los exponentes de M, L y T, obtenemos:

$$0 = a+d$$

$$a = -d$$

$$0 = -3a+b+c$$

$$b = -2d$$

$$0 = -b-2d$$

$$c = -3d+2d = -d$$

Substituyendo:

$$w = K \rho^{-d} v^{-2d} L^{-d} \sigma^d = K \left( \frac{\rho v^2 L}{\sigma} \right)^{-d}$$

Los valores de "K" y "d", tienen también, que determinarse por análisis físico y/o por experimentación.

$$\text{Si hacemos: } K = 1 \text{ y } d = -\frac{1}{2}$$

Entonces:

$$w = \frac{v}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho L}}}$$

Tomando igual el número de Weber en modelo y prototipo, declaramos como predominante a la fuerza debida a la tensión superficial.

$$\sqrt{\frac{v_p}{\rho_p L_p}} = \sqrt{\frac{v_m}{\rho_m L_m}}$$

Ley de similitud

$$\frac{\text{de}}{\text{Weber}} = \frac{Ev}{\sqrt{\rho E l}} = 1$$

Nota: Cuando sea necesario, considerar en el fenómeno en estudio, algún factor especial no incluido en los parámetros adimensionales mencionados se puede obtener la ley de similitud correspondiente, estableciendo que la ecuación ó ley que liga a dicho factor con las demás características del movimiento, sea la misma en modelo y prototipo y que la relación entre ellos permanezca constante.

Las leyes mencionadas anteriormente, se resumen en la tabla de la siguiente hoja.

LA EXPRESION	ES LA LEY SIMILITUD DE	DONDE LA FUERZA PREDOMINANTE ES
$E_p = \frac{v_p}{\sqrt{\frac{\rho_p}{\rho}}} = \frac{v_m}{\sqrt{\frac{\rho_m}{\rho}}} = E_m$	EULER	LA PRESION NORMAL
$F_p = \frac{v_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m L_m}} = F_m$	FROUDE	LA GRAVEDAD
$R_p = \frac{v_p L_p}{\gamma_p} = \frac{v_m L_m}{\gamma_m} = R_m$	REYNOLDS	VISCOSIDAD & PRESIONES TANGENCIALES
$C_p = \frac{\rho_p v_p^2}{E_p} = \frac{\rho_m v_m^2}{E_m} = C_m$	CAUCHY	LA ELASTICIDAD
$\omega_p = \frac{v_p}{\sqrt{\frac{\sigma_p}{\rho_p L_p}}} = \frac{v_m}{\sqrt{\frac{\sigma_m}{\rho_m L_m}}} = \omega_m$	WEBER	LA TENSION SUPERFICIAL

Para una semejanza completa, es necesario que se cumplan simultáneamente, las cinco leyes de similitud expresadas anteriormente, además de las leyes de semejanza dadas por él ó los factores especiales no incluidos en las anteriores (similitud de coeficientes de rugosidad, etc.).

Lo anterior es sumamente difícil, en el ensayo con modelos hidráulicos reducidos. Pues simplemente la realización simultánea de las leyes de similitud de Reynolds y Froude nos conducen a la expresión:

$$E_V = E_L^{3/2}$$

y si se utiliza el mismo fluido en modelo y prototipo ( $\gamma_p = \gamma_m$ )

nos resulta que :

$$E_L = 1$$

Lo cuál nos significaría, hacer las pruebas a tamaño natural.

Si se elije :

$$E_L > 1 \quad (\text{para reducir el modelo})$$

$$V_p = V_m E_L^{3/2}$$

$$\therefore V_p > V_m$$

Condición casi siempre incosteable de lograr.

Es frecuente, que a medida que queremos cumplir simultáneamente, con todas las leyes de similitud se nos presentarán problemas, - que su solución nos conducirá, a una escala de líneas igual a la unidad ( $E_L \rightarrow 1$ ) y que por lo tanto el modelo, nos resulte de las mismas dimensiones que el prototipo, condición que es absurda.

Lo que sucede en la realidad, es que casi siempre se escoge, la ley de similitud, que tome en cuenta la magnitud física predominante en el fenómeno (de la cuál depende éste).

A continuación, se desarrollan las leyes de similitud, que con más frecuencia se presentan en Ingeniería Civil; como son la de Reynolds y la de Froude.

## .- LAS LEYES DE SIMILITUD DE REYNOLDS Y DE FROUDE

### 1.- Ley de similitud de Reynolds

La ley de similitud de Reynolds es:

$$R_p = R_m$$

Substituyendo a "R" por su valor:

$$\frac{V_p L_p}{\gamma_p} = \frac{V_m L_m}{\gamma_m} \quad \therefore \quad \frac{V_p}{V_m} = \frac{L_m}{L_p} \frac{\gamma_p}{\gamma_m}$$

Empleando el concepto de escala:

$$E_v = E_v E_l^{-1}$$

Qué es la Ecuación fundamental de la Ley de Similitud de Reynolds

A continuación se deducen otras escalas

Por definición:

$$.- \text{ Esc. de gastos: } E_Q = E_L^2 E_v = E_L^2 E_v E_L^{-1} = E_v E_L$$

$$.- \text{ Esc. de tiempos: } E_T = E_L E_v^{-1} = E_L E_v^{-1} E_L = E_L^2 E_v^{-1}$$

$$.- \text{ Esc. de aceleraciones: } E_a = E_L E_v^{-2} = E_L E_v^{-2} E_L^4 = E_L^2 E_v^{-3}$$

$$.- \text{ Esc. de fuerzas: } E_F = E_m E_a = E_p E_L^3 E_v^{-3} = E_p E_L^2$$

- .- Esc. de presiones:  $E_p = E_f E_L^{-2} = E_f \rho^2 E_L^{-2}$
- .- Esc. de energías:  $E_{\text{energ.}} = E_m E_L^2 = E_f E_L^3 E_f^{-2} E_L^{-2} = E_f E_f^{-2} E_L$
- .- Esc. de potencias:  $E_{\text{pot.}} = E_f E_L E_L^{-1} = E_f E_f^{-2} E_L E_f^{-1} E_L^{-2} = E_f E_f^{-3} E_L^{-1}$

.- Ley de Similitud. de Froude:

La Ley de Similitud de Froude es:

$$F_p = F_m$$

Substituyendo a "F" por su valor:

$$\frac{V_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m L_m}}$$

Expresión que podemos escribir como:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{g_p L_p}{g_m L_m}}$$

Empleando el concepto de escala

$$E_v = E_g^{1/2} E_L^{1/2}$$

Como generalmente:

$$g_p = g_m, E_g = 1$$

$$\therefore E_v = E_L^{1/2}$$

Qué es la ecuación fundamental de la Ley de Similitud de Froude.

A continuación se deducen otras escalas.

Por definición:

- .- Esc. de gastos:  $Eg = Ee Ev = EL^2 EL^{1/2} = EL^{5/2}$
  - .- Esc. de tiempos:  $Et = EL Ev^{-1} = EL EL^{-1/2} = EL^{1/2}$
  - .- Esc. de aceleraciones:  $Ea = EL Et^{-2} = EL EL^{-1} = 1$
  - .- Esc. de fuerzas:  $Ef = Em Eg = Ep EL^3$
  - .- Esc. de presiones:  $Ep = Ef Ea^{-1} = Ep EL^3 EL^{-2} = Ep EL$
  - .- Esc. de energías:  $Eenerg. = Em Ev^2 = Ep EL^3 EL = Ep EL^4$
  - .- Esc. de potencias:  $Epot. = Ew Et^{-1} = Ef EL Et^{-1} = Ep EL^3 EL EL^{-1/2} = Ep EL^{7/2}$
- .- MODELOS DISTORSIONADOS.

En todos los modelos que se construyan, teniendo una sola escala de líneas, tanto para las magnitudes verticales así como para las horizontales, reciben el nombre de "modelos no distorsionados".

Cuando esto no sucede, es decir, cuando se tiene una escala para las magnitudes lineales horizontales y otra diferente para las magnitudes lineales verticales, estamos en presencia de un "modelo distorsionado geométricamente". La relación entre ambas escalas se llama "distorsión"

$$A = \frac{El}{Eh} = \text{distorsión del modelo y es el índice de la mayor ó menor deformación geométrica.}$$

Generalmente se hace necesaria la distorsión en modelos de escu-- rrimientos a superficie libre, como ríos y canales muy anchos y pocos profundos, en modelos marítimos, etc.

Las causas más comunes que nos conducen a la distorsión son:

- a).- Por razones de espacio; cuando las áreas que se necesitan -

representar en modelo son muy grandes, comparadas con los tirantes de agua y por razones prácticas y económicas la escala horizontal debe ser pequeña. Una sola escala de líneas nos -- proporcionarían tirantes tan pequeños que se dificultarían las mediciones y se perdería precisión, además, aparecerían factores indeseables (tensión superficial, etc.). Si se quiere evitar lo anterior y tener una sola escala de líneas, se tendría que construir el modelo demasiado grande y probablemente inconstable.

- b).- Cuando no se puede conseguir el mismo tipo de escurrimiento en modelo y prototipo. Esta condición siempre deberá tomarse en cuenta: El escurrimiento en el modelo deberá ser el mismo tipo que en el prototipo, aunque no sea el mismo valor.
- c).- Cuando el gasto que se requiere en el modelo sea tal, que sólo distorsionado se logre.
- d).- Cuando la rugosidad en el modelo es tan pequeña que físicamente es imposible representarla. Al distorsionar el modelo, se tendrán pendientes mayores, que dejarán sentir su efecto en el escurrimiento y para compensar éste, se deberán tener rugosidades mayores en el modelo, las cuáles ya podrán proporcionarse prácticamente.
- e).- Cuando se trate de un modelo de fondo móvil, en el cuál el agua debe mover material de manera semejante a la del prototipo. Las pendientes y velocidades en un modelo no distorsionado,

son tan pequeñas, que no alcanza a mover el material que se ha seleccionado para el fondo.

- f).- Existen también distorsiones en otras magnitudes que intervienen en los fenómenos hidráulicos, por ejemplo, en las -- escalas de masas específicas, ya que puede existir una para líquidos y otra para determinados sólidos colocados dentro de la corriente; una para el diámetro del material sólido -- que acarrea una corriente y otra para las magnitudes lineales, etc.

En general, se puede decir que existe distorsión en un modelo -- hidráulico, cuando éste tiene más de una escala, para una misma magnitud -- dimensional.

Obviamente, la distorsión trae consigo algunas consecuencias favorables y otras inconvenientes.

Un modelo distorsionado pierde similitud con el prototipo, pero se obtiene mucho provecho de él en determinados aspectos.

.-Ventajas de los modelos distorsionados.

..- Se pueden realizar mediciones más precisas en comparación con el mismo modelo no distorsionado.

..- Al incrementar los tirantes y cargas de agua se tiene mayor -- fuerza de arrastre, para mover el material del fondo.

..- Se puede reproducir algún fenómeno deseado, cuando no sea posible en un modelo sin distorsión.

..- Se facilita la operación.

.- Inconvenientes de los modelos distorsionados.

..- La construcción pueda resultar difícil (modelado de taludes).

..- Se pueden distorsionar seriamente las presiones y las velocidades.

..- Se pueden tener erosiones ó depósitos del material de arrastre muy fuertes.

..- Su interpretación es más compleja.

..- En ocasiones presenta un efecto psicológico desfavorable al observador.

## CAPITULO IV

### ESTUDIO DEL MODELO HIDRAULICO.

.- MODELO HIDRAULICO

.- PRUEBAS EFECTUADAS

## .- MODELO HIDRAULICO.

En la construcción del modelo hidráulico de las "Higuera", además de las indicaciones del plano general del vertedor y el plano de topografía de la zona, se tomaron en cuenta los estudios de la Elección de las Escalas que son indispensables en la construcción de cualquier modelo hidráulico.

### .- Elección de las Escalas.

Por ser el fenómeno hidráulico un escurrimiento a superficie libre la fuerza predominante es la gravitatoria. Debido a las condiciones -- existentes en el problema, es necesario que el modelo sea similar geométrica. Entonces la Ley de Similitud a seguir es la de Froude para modelos no distorsionados.

Por otro lado, recordemos que en el capítulo anterior quedan todas las escalas en función de la escala de longitudes. Por ésta razón el primer paso al proyectar el modelo es determinar la escala.

Para elegir la escala de longitudes adecuada, hay que tener en consideración los siguientes factores:

- ..- Buen funcionamiento del modelo
- ..- Espacio y elementos disponibles
- ..- Economía en la construcción

.- Buen funcionamiento del modelo.

Para obtener un buen funcionamiento del modelo, éste debe construirse lo más grande posible; es decir la escala de longitudes, debe ser tal - que las fuerzas despreciables en el modelo, lo sean también en el prototipo. Si se construye el modelo demasiado pequeño, aparecería una fuerza que en el prototipo no tiene relevancia; la tensión superficial y por ello nos proporcionaría resultados erróneos.

.-Espacio y elementos disponibles.

En muchas ocasiones el espacio y los elementos disponibles en el Laboratorio, son los factores que determinan el valor de la escala de longitudes.

.- Economía en la Construcción.

Habría ocasiones en que se disponga del espacio que se desea y por tanto el modelo se puede hacer grande, para que funcione mejor, pero no hay que perder de vista el aspecto económico. El costo del modelo se incrementa grandemente con el tamaño.

El modelo se construyó en las instalaciones del Laboratorio Hidráulico de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, situado en Tecamachalco D.F.

En dicho laboratorio se asignó para la construcción del modelo un área de:

$$A = 12.00 \times 4.00 = 48.00 \text{ M}^2$$

Tomando en cuenta que el gasto máximo de diseño es de  $1,279 \text{ m}^3/\text{seg.}$  y el espacio disponible con que se cuenta, se decidió adoptar la siguiente escala de líneas

$$E_L = 100$$

La escala se eligió, teniendo en cuenta que así se lograría un modelo de tamaño suficiente para visualizar el fenómeno, representando parte de la cortina, el vertedor y aproximadamente  $3,750 \text{ M}^2$  de topografía, abarcando desde el final de revestimiento, hasta la margen del río, como puede observarse en las fotografías 1, 2 y 3.

Los valores del resto de las escalas para el modelo, siguiendo el Criterio de Froude, resultaron ser:

..- Escala de líneas :  $E_L = 100$

..- Escala de Superficies :  $E_s = E_L^2 = 100^2 = 10,000$

..- Escala de Volúmenes :  $E_v = E_L^3 = 100^3 = 1,000,000$

..- Escala de Tiempos :  $E_t = E_L^{1/2} = 100^{1/2} = 10$

..- Escala de Velocidades :  $E_v = E_L^{1/2} = 100^{1/2} = 10$

..- Escala de Aceleraciones :  $E_a = 1$

..- Escala de gastos :  $E_q = E_L^{5/2} = 100^{5/2} = 100,000$

..- Escala de presiones :  $E_p = E_p E_L = 1 \times 100 = 100$

..- Escala de fuerzas :  $E_f = E_p E_L^3 = 1 \times 100^3 = 1,000,000$

..- Escala de energías :  $E_n = E_p E_L^4 = 1 \times 100^4 = 100,000,000$

..- Escala de potencia :  $E_{pot} = E_p E_L^{7/2} = 1 \times 100^{7/2} = 9,999,999$

..- Escala de rugosidades :  $E_n = E_L^{1/6} = 100^{1/6} = 2.1544$

Con las escalas elegidas el gasto máximo que se tiene que proporcionar al modelo es:

$$Q_m = \frac{Q_p}{E_q} = \frac{Q_p}{E_L^{5/2}} = \frac{1279}{100^{5/2}} = 0.01279 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Con las instalaciones hidráulicas del Laboratorio se puede proporcionar éste gasto en el modelo.

Por otra parte las rugosidades que se deberán dar al modelo son:

$$n = \frac{n_P}{E_n} = \frac{n_P}{E_L^{1/6}} = \frac{0.015}{2.1544} = 0.0070$$

De acuerdo con la anterior, las escalas que se han escogido, cumplen con los tres requisitos antes mencionados; buen funcionamiento del modelo, espacio y economía.

Además el laboratorio hidráulico, dispone de las Estructuras Auxiliares capaces de proporcionar de manera aceptable, todos los elementos con que contará el modelo; éstas estructuras son las siguientes:

- ..- Cárcame
- ..- Bomba
- ..- Tanque de carga constante
- ..- Tubería de distribución
- ..- Válvulas
- ..- Vertederos
- ..- Limnímetros
- ..- Canales de retorno

..- Cárcame: Es un depósito de agua, que sirve para alimentar los modelos.

- ..- Bomba : Se utiliza, para elevar el agua del cárcamo, hasta el tanque de carga constante.
  
- ..- Tanque de Carga Constante: Es un depósito de agua elevado, acondicionado con una serie de vertedores, que hacen -- que el depósito tenga siempre una carga constante que proporcione la alimentación de -- agua, a los diferentes modelos que se encuentran a prueba en el Laboratorio.
  
- ..- Tuberías de distribución: Se emplean para conducir el agua del tanque de carga constante al modelo.
  
- ..- Válvula : Es el dispositivo encargado de controlar el agua que circula a través de las tuberías de distribución para proporcionar el gasto requerido.
  
- ..- Vertedor : Es la estructura que nos permite conocer los diferentes gastos; que para (Q) pequeños se emplean vertedores triangulares y para (Q) grandes son del tipo rectangulares.
  
- ..- Limnímetros : Son instrumentos que sirven para medir los tirantes que -- pasan sobre los vertedores.

## .- PRUEBAS EFECTUADAS.

A continuación se resumirán las pruebas que fueron ensayadas en el modelo hidráulico, en todas ellas se trató primordialmente de obtener un - - buen funcionamiento de todo el conjunto, lo cuál se logró haciendo ensayos - y modificaciones al modelo que las denominaremos pruebas.

## .- Prueba No. 1

Consistió en construir el modelo hidráulico y ensayar el proyecto original.

Se observó que el funcionamiento general era bueno, tanto del vertedor, canal, colector y caída, para gastos de  $Q=300 \text{ m}^3/\text{seg}$  y de  $Q=600 \text{ m}^3/\text{seg}$ , como puede observarse en las fotografías 4 y 5; además se notó que trabajando el modelo hidráulico con  $Q=1279 \text{ m}^3/\text{seg}$  (gasto máximo), los niveles alcanzados por la corriente, a lo largo del canal eran en algunas partes superiores al nivel de revestimiento, como puede apreciarse en la fotografía No. 6, por lo que se amplió la zona de revestimiento a lo largo del modelo, en ambas márgenes, para poder determinar con toda exactitud, los -- niveles máximos de la corriente.

También se pudo apreciar que el canal de salida tenía un buen funcionamiento, para todos los gastos ya que no tenía velocidades altas. In -- cambio se observó que al final del salto de esquí se presentaba un golpeteo de la corriente en forma intermitente que se consideró, podría ser peligroso para la zona de descarga, por lo cuál se procedió a tratar de eliminarlo por lo que se hicieron varios ensayos, denominándolos prueba No. 2.





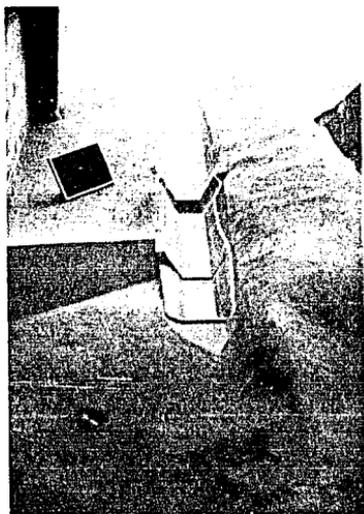
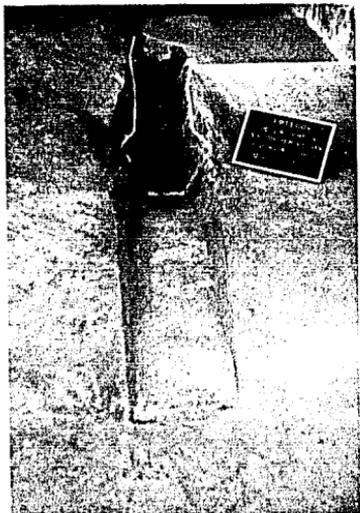


FOTO No. 3

FOTO No. 2

PRUEBA No. 1



FOTO No. 5



FOTO No. 6

PRUEBA No. 1

FUNCIONANDO CON VARIOS GASTOS

## .- Prueba No. 2

Para ésta prueba, se efectuaron una serie de ensayos que consistieron, en ir colocando obstáculos (dientes) en el fondo del canal en diferentes estaciones y diferentes separaciones, en la zona del salto de esquí, para tratar de eliminar el golpeteo de la corriente que en forma intermitente se formaba a la salida, después de varios ensayos, se encontró una solución posible, como se muestra en el anexo 7 que consiste en dos series de dientes colocados en la curva del salto de esquí. Esta modificación se construyó en el modelo, apeándose totalmente a lo indicado en el anexo 7 como se puede observar en las fotografías 7 y 8.

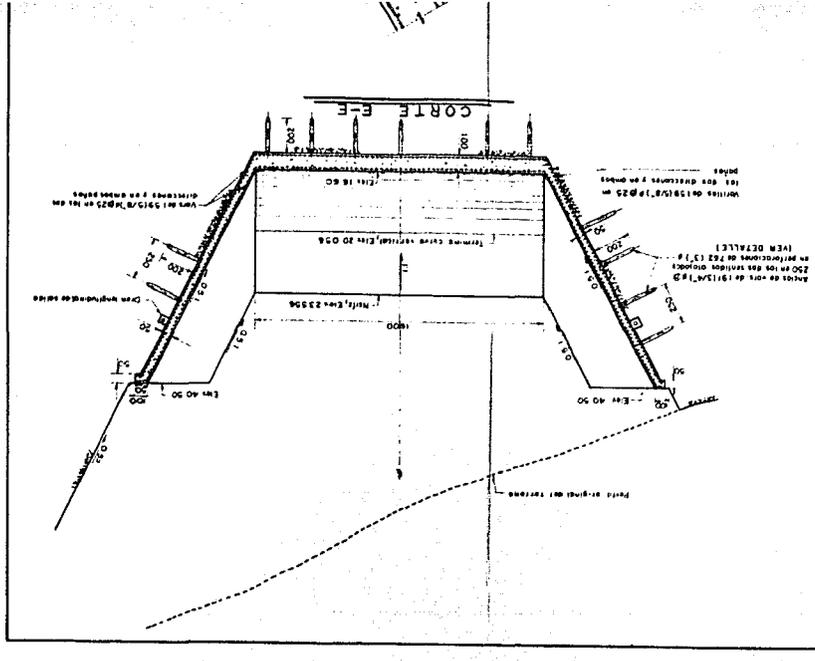
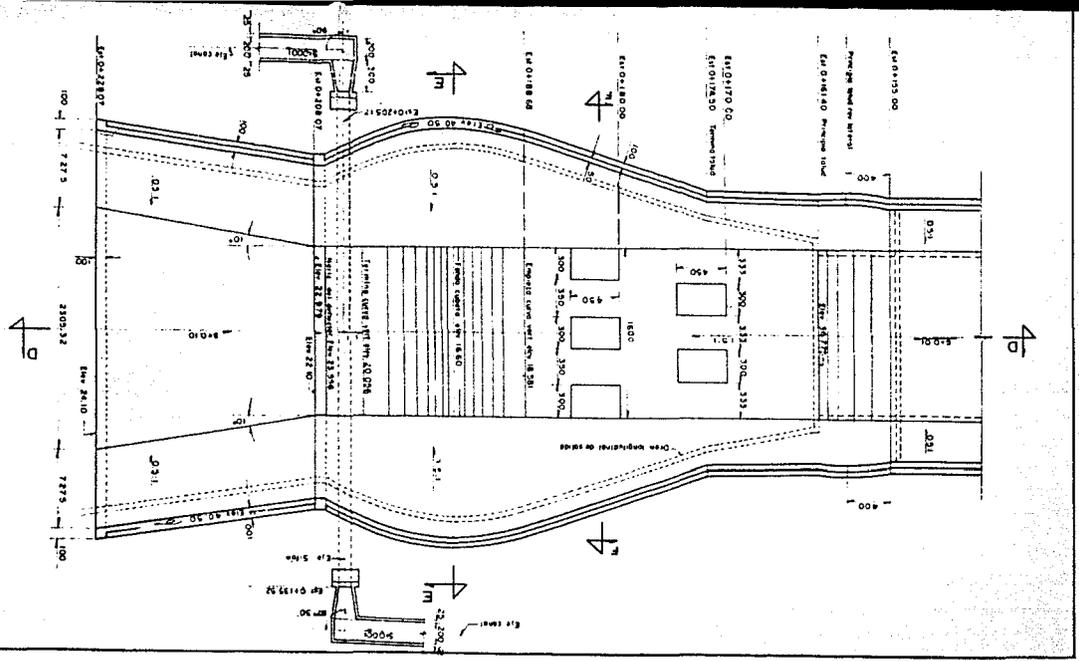
Terminada la modificación en el modelo se procedió a ensayarlo, pudiéndose observar lo siguiente.

El funcionamiento general era bueno como el de la prueba No. 1 para diferentes gastos en el modelo hidráulico como  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{seg}$ ,  $Q = 600 \text{ m}^3/\text{seg}$ , esto se puede observar en las fotografías 9 y 10.

Al ensayar  $Q = 1279 \text{ m}^3/\text{seg}$  (gasto máximo), en el modelo con dientes, colocados en serie en la curva del salto de esquí, se pudo observar que disminuía en forma considerable el golpeteo de la corriente que en forma intermitente se formaba a la salida, como se observa en la fotografía 11; por lo cual se consideró que estaba fuera de riesgo la zona de descarga y en consecuencia sería la solución favorable para el buen funcionamiento del conjunto.

Sin embargo, todavía se analizó el comportamiento de un tanque amortiguador, en busca de una mayor economía en el costo del prototipo -





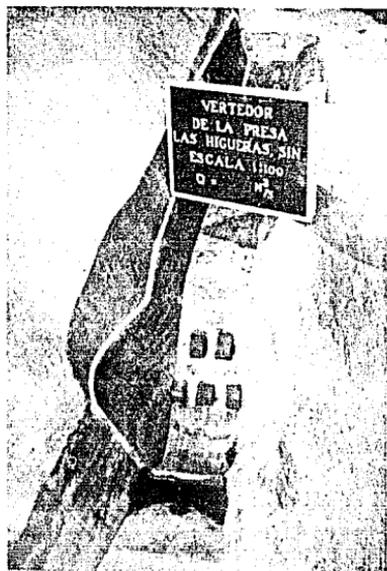


FOTO No. 7

DOS VISTAS DEL  
MODELO PARA LA  
PRUEBA No. 2



FOTO No. 8



FOTO No. 9

FOTO No. 10



TRES VISTAS  
DEL MODELO  
FUNCIONANDO  
CON DIFEREN  
TES GASTOS.

(un ahorro considerable en las excavaciones); por lo que se procedió a ensayar diferentes elevaciones y longitudes del tanque amortiguador, llamándose a éstos ensayos, prueba No. 3 .

.- Prueba No. 3

En ésta prueba se efectuaron una serie de ensayos, que consistieron en ir tomando diferentes elevaciones de la plantilla con determinadas longitudes de canal del tanque amortiguador, que contribuyeron a proporcionarnos diferentes geometrías para el tanque amortiguador, como lo muestran los siguientes ensayos.

Ensayos	Nivel de plantilla del canal del T. A. (elevaciones)	Longitud del canal del Tanque Amortiguador.	Variaciones de salida del T. A.
1	30	29.00 mts.	elevación 34
2	26	45.00 mts.	elevación 34
3	25	50.00 mts.	elevación 31

Los ensayos anteriores nos determinaron que la forma más adecuada del tanque amortiguador, era la correspondiente al último ensayo, pues se observó que las variaciones de las elevaciones de la corriente a la salida del tanque amortiguador, fueron más uniformes.

También se colocó una contra-pendiente de 1 % de la elevación 31 a la elevación 34, para disminuir las velocidades de la corriente a la salida del tanque amortiguador y modificándose, además la geometría con una ligera abocinación para hacerlo más efectivo.

Una vez terminadas las modificaciones en el modelo, se procedió a ensayarlo, pudiéndose observar lo siguiente:

Se ensayaron los diferentes gastos, hasta llegar al  $Q = 1,279 \text{ m}^3/\text{seg}$  (gasto máximo), observando que el funcionamiento no era muy adecuado, ya que se presentaban turbulencias fuertes de la corriente en el tanque amortiguador, las cuáles, se trataron de reducir colocando dientes en la caída y piso del tanque en diferentes estaciones y separamientos para tratar de disminuir este tipo de turbulencia, como lo muestran las fotografías No. 12 y 13 .

Una vez concluida la modificación en el modelo, se procedió a ensayarlo nuevamente, con los diferentes gastos hasta llegar al máximo, pudiéndose observar que las variaciones de las elevaciones de la corriente a la salida del tanque amortiguador, fueran más uniformes y que las velocidades en el canal de salida, funcionando para todos los gastos, fuera de aproximadamente  $V = 4 \text{ m/seg}$ , como lo muestran las fotografías 14, 15 y 16 .

Las modificaciones anteriores mejoraban notablemente el funcionamiento del conjunto, considerándose que el proyecto, podía quedar así en forma definitiva, anexando únicamente algunos datos extras como, velocidades, tirantes, etc. que se obtendrán del modelo con todo cuidado y recomendando lo siguiente:

**.- Recomendación.**

Tomar ésta última prueba como definitiva para la construcción del prototipo; además se deberá proporcionar ventilación a los dientes del tanque smortiguador, con el fin de evitar que sean deteriorados por el fenómeno de la cavitación

Para completar el estudio sobre el modelo hidráulico, se tomaron los siguientes registros.

- 1.- Curva de Gastos-Elevaciones en el vertedor (Anexo 1)
- 2.- Registro de Tirantes a lo largo del modelo (Anexo 2)
- 3.- Se registró la velocidad máxima a la salida del tanque smortiguador, en el fondo del canal y en el canal de salida, obteniendose para todos los gastos una velocidad  $v = 4$  m/seg.





FOTO No. 12

FOTO No. 13



FOTO No. 14

FUNCIONANDO CON UN GASTO  
DE 600 m<sup>3</sup>/seg. PARA LA --  
PRUEBA No. 3  
(DEFINITIVA)

.- NIVELES MAXIMOS DE LA CORRIENTE EN EL MODELO DE "LAS HIGUERAS", SIN.  
 FUNCIONANDO CON EL GASTO MAXIMO DE 1279 m<sup>3</sup>/seg. PARA LA PRUEBA No. 3

ESTACION	C O T A S   M A R G E N	
	DERECHA	IZQUIERDA
De la estación 0+020		
a la 0+130 los Nive-		
les son iguales a la		
Prueba No. 1		
0 + 140	48.20	48.15
0 + 150	47.08	48.17
0 + 160	45.50	46.42
0 + 170	41.27	41.52
0 + 180	40.44	40.81
0 + 190	40.45	40.58
0 + 200	41.30	41.28
0 + 210	41.34	42.12
0 + 220	41.34	41.80
0 + 230	41.50	41.97
0 + 240	40.85	41.15
0 + 249.05	41.15	41.05

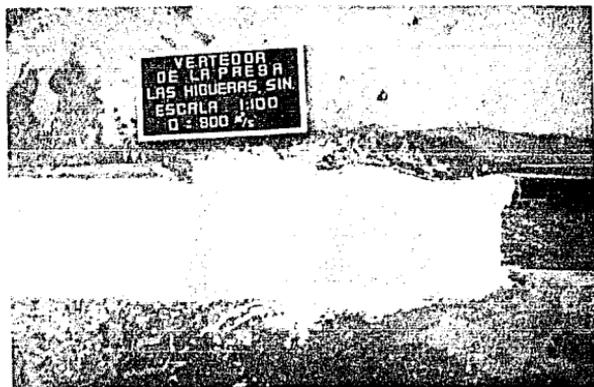
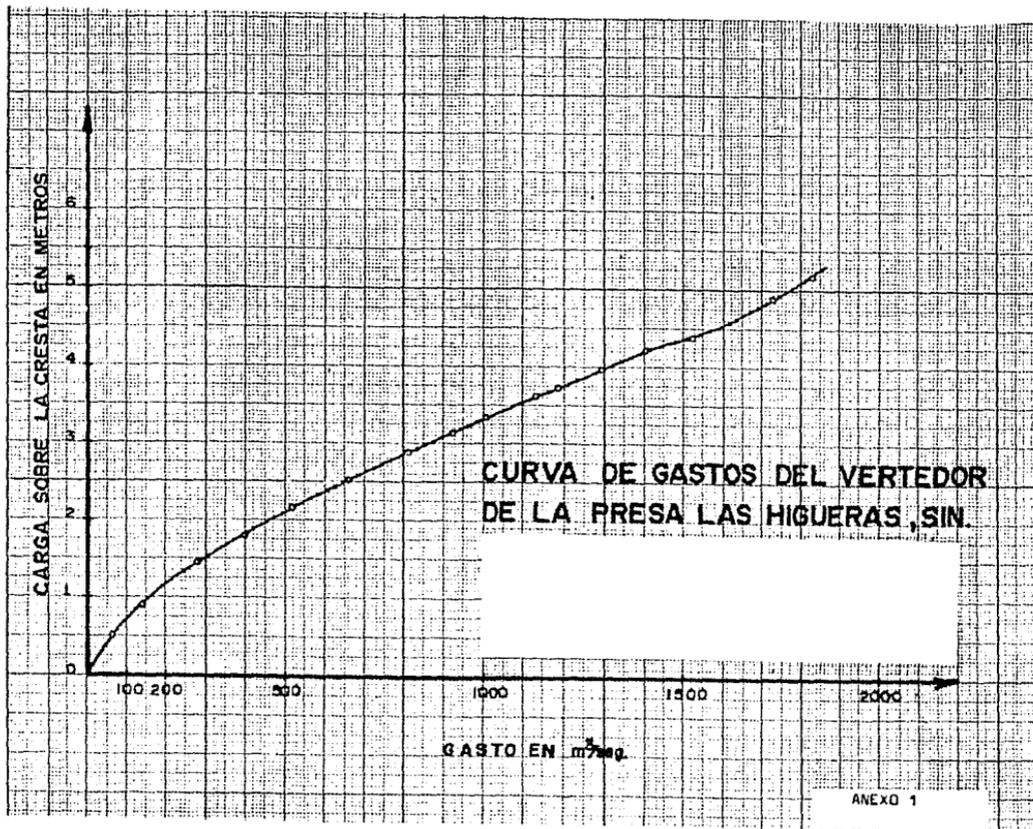


FOTO No. 15

DOS VISTAS DEL MODELO FUNCIONANDO  
CON 900 Y 1279 m/s. PARA LA PRUEBA No. 3  
(DEFINITIVA)



FOTO No. 16



**CAPITULO V****CONCLUSIONES Y****RECOMENDACIONES.**

**.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

De los ensayos que se han realizado sobre modelos hidráulicos de diversas estructuras hidráulicas, se ha comprobado la importancia que tiene la experimentación en la hidráulica, ya que una estructura aunque teóricamente esté bien diseñada, al funcionar prácticamente se vera que su funcionamiento puede no ser el óptimo; por medio de la observación en modelo hidráulico, se podrán proponer soluciones aceptables, tanto del punto de vista estructural así como económico, logrando con esto, que al funcionar la estructura, si el estudio se realizó meticulosamente, no se presentarán irregularidades que puedan dañar la obra.

Por lo anterior es recomendable, para poder hacer un buen estudio del modelo, seguir los siguientes lineamientos:

- 1.- Que el modelo se construya lo más exacto posible al prototipo, de acuerdo a la escala seleccionada previamente, al espacio disponible y al tipo de modelo a experimentarse, de acuerdo al rango de escalas dadas anteriormente.
- 2.- Se deberá tener cuidado de que el modelo presente una superficie rugosa igual ó casi igual a la del prototipo, teniendo en cuenta que el coeficiente de rugosidad que se puede dar terminado el modelo es, en el caso de utilizar cemento perfectamente pulido, de  $n = 0.010$  a  $n = 0.013$ ; si en la construcción del modelo se utiliza madera pulida se obtendrá un coeficiente de rugosidad de  $n = 0.009$  a  $n = 0.011$  y si se utiliza plástico acrílico se obtendrá un valor de  $n = 0.009$  a  $n = 0.010$ .

30.- Para obtener más altas rugosidades se podrá distorsionar el modelo ó se utilizará un canal auxiliar en donde se hará el estudio de la rugosidad distribuyendo simétricamente en el canal, ya sean, clavos, grava, alambón, mallas de alambre ó una combinación de éstos ó cualquier otro elemento con -- que se pueda obtener la rugosidad deseada y una vez lograda se pasará al modelo con una distribución proporcional a la obtenida en el canal. Este tipo de modelos es usual en ríos calculándose la rugosidad con la fórmula de Manning, que -- dice:

$$v = \frac{1}{n} r^{2/3} s^{1/2}$$

40.- Deberá tenerse cuidado de que el gasto que entre al modelo no sufra pérdidas por filtraciones ó fugas aguas arriba del modelo, que pueden evitarse según las recomendaciones estipuladas en la construcción de modelos.

50.- Se cuidará de que el agua que entre al modelo sea con una velocidad baja, si se puede con una velocidad nula. Esto se logra haciendo un depósito lo más grande que se pueda, para que las perturbaciones engendradas en la salida del agua de los conductos que alimentarán al modelo se amortiguen, colocando muros tranquilizadores ó filtros.

60.- El limímetro que se coloque, para medir la carga sobre la -- sección de control debe estar a una distancia aguas arriba de 4 veces la carga que se tenga sobre la sección, esto es con el objeto de evitar la influencia libre de agua, debido

a la aceleración de la corriente, al pasar por la cresta vertedora.

- 7a.- Cuando se estudie el funcionamiento del tanque amortiguador, se debe cuidar que en él se disipe gran parte de la energía cinética; para lograr esto la experiencia ha demostrado que las paredes del tanque, deben ser lo más -- verticales que se puedan.
- 8a.- Se debe evitar hasta donde sea posible el uso de dientes en los tanques amortiguadores, sobre todo si el vertedor va a funcionar continuamente, ya que el fenómeno de la -- cavitación los puede destruir. Siempre que sea posible, se debe destruir la energía cinética de la corriente, -- esto se puede lograr haciendo chocar entre sí las masas de agua.
- 9a.- El estudio del funcionamiento hidráulico de un modelo de -- be hacerse con bastante cuidado y con el tiempo necesario para hacer las observaciones, mediciones y modificaciones pertinentes. Nunca es recomendable ensayarse un modelo con tiempo limitado, pues debido a las prisas, -- pueden pasar inadvertidos ciertos fenómenos que pueden -- resultar altamente peligrosos al no ensayarse todas las posibles condiciones de funcionamiento del prototipo.

## Bibliografía.

- .- Hidráulica  
Primera Parte  
Gilberto Sotelo Avila,  
Instituto de Ingeniería. UNAM, 1973.
  
- .- Hidráulica  
Albert Schlag,  
Ed. Limusa-Wiley, S.A.  
México, 1966.
  
- .- Apuntes de Modelos Hidráulicos.  
Curso de Maestría en Hidráulica en la Sección  
de graduados de la ESIA., IPN.  
Ing. Octavio Trejo Pérez. 1972.
  
- .- Dinámica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería.  
J.W. Daily y D.R.F. Harleman,  
Ed. Trillas, S.A., México, 1969.
  
- .- Mecánica de los Fluidos e Hidráulica.  
R. Y. GILER, Schaum (Libros Mc Graw Hill),  
México, 1969.
  
- .- Diseño de Presas Pequeñas.  
U.S. Department of the Interior Bureau of  
Reclamation,  
3a. Imp. Esp. por Cía. Ed. Continental. S.A.  
México, 1972.
  
- .- Apuntes de Modelos  
L. E. Salinas y R. Bonilla G.,  
1970, ESIA., IPN.
  
- .- Irrigation Practice and Engineering, 1916,  
Etcheverry, Mc Graw-Hill  
Book Company
  
- .- Instructivo para la localización y diseño de canales  
y sus estructuras menores.  
Secretaría de Recursos Hidráulicos.