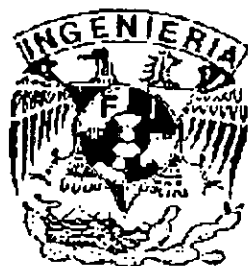


01162 10  
2cy



---

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS

FLUJO ASIMÉTRICO EN TANQUES AMORTIGUADORES DE SECCIÓN  
TRAPEZIAL

PRESENTADA POR:

Juan José Muciño Porras

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA  
(HIDRÁULICA)

267697

DIRIGIDA POR:

Dr. Jesús Gracia Sánchez

Ciudad Universitaria, OCTUBRE DE 1998

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis 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.

## DEDICATORIAS:

*A mi esposa Consuelo (Chelito), a mis hijos Marcela y Juan José, por el significativo apoyo que siempre manifestaron para concluir esta importante etapa académica de mi vida.*

*A mi mamá María Teresa; a mi papá Odilón (q.e.p.d.); a mis hermanos María de Lourdes, María Teresa y Felipe de Jesús, y a mi sobrino Bernardo, por brindarme la guía y el sustento anímico requerido que me permitieron lograr la culminación de este trabajo.*

*A mis suegros Don Néstor y Doña Matilde; y a mi cuñada Susana, por su apoyo y confianza que siempre me han manifestado.*

## *AGRADECIMIENTOS:*

*Al H. Consejo Técnico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme regresar a concluir estos estudios después de una larga ausencia.*

*Al personal del Instituto de Ingeniería por darme el apoyo necesario para llevar a cabo los experimentos requeridos para este trabajo, tener las facilidades de estancia y sobretodo por hacerme sentir como en casa.*

*Al Rector y a las autoridades de la Universidad Autónoma de Chiapas por autorizarme el permiso para separarme de mis labores docentes y poder concluir la maestría.*

*Al Director de tesis y a los sinodales de este trabajo, por su paciencia y manifiesto deseo de que este esfuerzo fuera provechoso.*

*Al Director, personal docente y administrativo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas por brindarme las facilidades y apoyar incondicionalmente la decisión de concluir con mis estudios de posgrado.*

# ÍNDICE

	Página
Resumen	i
1. Introducción	1
2. Aportes teóricos al salto hidráulico en secciones trapeciales	5
3. Proposición de un criterio de cálculo	14
3.1 Criterio de diseño tradicional para el tirante conjugado mayor	14
3.2 Propuesta teórica para encontrar el tirante máximo dentro del canal trapecial a partir de la relación $M_2 / M_1$	16
3.3 Proceso de cálculo para el criterio de análisis propuesto con datos de un ensayo en el modelo	21
3.4 Comparación del criterio propuesto, datos de ensayos y el criterio de Sánchez - Gracia	24
4. Pruebas en el modelo	28
4.1 Plan de ensayos	30
4.1.1 Variables a medir en pruebas por realizar	31
4.1.2 Instalaciones	31
4.1.3 Equipo de medición	32
4.2 Condiciones de pruebas realizadas en el dispositivo hidráulico	33
4.2.1 Condiciones de pruebas de la primera etapa	33
4.2.2 Condiciones de pruebas de la segunda etapa	33
4.2.3 Objetivos de los ensayos de la primera etapa	33

4.2.4	Objetivos de los ensayos de la segunda etapa	36
4.3	Síntesis de aspectos sobresalientes de las pruebas	38
5.	Revisión de dos casos reales	42
5.1	Primer caso, tanque amortiguador de la Presa Josefa Ortiz de Domínguez (El Sabino), Sinaloa	42
5.1.1	Cálculo del tirante $Y_{MM}$ en el tanque amortiguador	43
5.1.2	Longitud total del salto	45
5.2	Segundo caso, tanque amortiguador de la Presa Marte R. Gómez (El Azúcar), Tamaulipas	46
5.2.1	Cálculo del tirante $Y_{MM}$ en el tanque amortiguador	47
5.2.2	Longitud total del salto	49
6.	Conclusiones y recomendaciones	50
	<i>Bibliografía</i>	53

## APÉNDICES

- A. Secuela de cálculo para obtener el valor del coeficiente R
- B. Esquema de instalación del modelo hidráulico y fotografías de ensayos.
- C. Detalles de las presas: Josefa Ortiz de Domínguez y Marte R. Gómez

## RESUMEN

El presente trabajo está relacionado con una faceta del salto hidráulico en tanques amortiguadores de sección trapecial, y que consiste en tomar en cuenta el flujo asimétrico.

De la literatura encontrada sobre el tema, se consideró adecuado el criterio establecido por Sánchez y Gracia (1995a), debido a su adaptabilidad a prácticamente cualquier geometría trapecial de tanque amortiguador y aprovechando esa idea, se buscó completar el método mencionado a partir de la ecuación de *la cantidad de movimiento*.

Posteriormente, para obtener datos y comprobarlos con la teoría propuesta, se realizaron diversas pruebas en un dispositivo físico del laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Además, se adicionó en las pruebas un control de tipo escalón ascendente, para ver sus efectos en el salto hidráulico.

Se comparó el enfoque propuesto con el existente y se ajustó, aplicándolo a dos casos reales de tanques amortiguadores en operación.

Finalmente, el objetivo de este trabajo consiste:

- a) Proponer al diseñador un criterio de análisis para que se considere como una opción real de solución, al tanque amortiguador.
- b) Alentar y motivar a que se siga estudiando el salto hidráulico en tanques amortiguadores de sección trapecial.

## CAPÍTULO UNO

### INTRODUCCIÓN

Las obras de aprovechamiento hidráulico, construidas para regular los gastos que transportan los ríos, requieren fundamentalmente de una cortina, una obra de toma y una de excedencias; la selección del tipo de obra es definida por las condiciones geológicas, topográficas e hidrológicas del sitio en estudio.

En general, esas obras tienen como finalidad en su conjunto, almacenar agua; lo que incrementa su energía potencial, misma que se aprovecha de acuerdo al diseño y al objetivo que persigue. En condiciones de operación normal se emplea la obra de toma, pero cuando tiene niveles de agua altos y se presenta una avenida, la de excedencias se debe operar. Para este último caso, la energía potencial acumulada en el embalse se convierte en cinética, adquirida por el agua en el transcurso de su caída a través de la descarga (rápida), esta debe ser disipada adecuadamente antes de llegar al cauce del río o al terreno natural, por medio de una estructura terminal en la obra vertedora, de la que es parte integral; si la descarga es controlada por compuertas, la estructura terminal puede ser un tanque amortiguador o una cubeta deflectora.

Conviene recordar que la operación de cualquier disipador de energía depende fundamentalmente de eliminar parte de la energía por medio de un flujo de alta velocidad, usando para ello alguna combinación de:

- fricción externa entre el agua y el canal,
- entre agua y aire o
- por fricción interna y turbulencia.

La disipación de energía dentro de las estructuras es responsabilidad del ingeniero hidráulico. Cada obra hidráulica es única, diferente, a pesar de ser del mismo tipo; pero las limitaciones técnicas, económicas y de planeación, conducen reiteradamente al uso de recomendaciones de diseño de obras "tipo", que en muchas ocasiones corresponden a otra situación que por tener su desarrollo teórico más simple y conocido, se acepta como "adecuada", pero no responde en la fase operativa a las necesidades de seguridad y servicio con que debió diseñarse; este es el caso del tanque amortiguador de sección trapezoidal, en el cual deben diseñarse y asegurarse las condiciones necesarias para que se produzca el salto hidráulico dentro de él.



Los diseños de tanques amortiguadores trapeciales se han apoyado, principalmente, en las experiencias del canal de sección rectangular, debido a simplificaciones teóricas que permiten tratar al fenómeno en dos dimensiones; el salto hidráulico en sección trapecial es tridimensional.

Existen evidentemente razones que hacen atractivo escoger la solución trapecial, ya que por ser una sección de área hidráulica mayor, requiere de profundidades de excavación menores y muros laterales menos robustos, que repercuten en el costo de la obra; además, dicha geometría se adapta a cualquier condición y tipo de terreno natural.

Así, desde el punto de vista tanto geotécnico como hidráulico, el canal de sección trapecial que tenga el mismo ancho de plantilla "B" comparado con el de sección rectangular, es superior tanto en términos de la estabilidad natural de los taludes como en eficiencia del salto.

Al respecto el parámetro  $H_2 / H_1$  se conocía hasta hace poco como eficiencia del salto, es decir, una medida de su eficacia como disipador de energía. Actualmente, se acepta identificar este concepto como  $\eta = h_s / H_1 = 1 - H_2 / H_1$ . En lo anterior  $H_1$  y  $H_2$  son las energías totales antes y después del salto respectivamente, por tanto  $h_s$  es la pérdida de energía en el fenómeno y obviamente se define como  $h_s = H_1 - H_2$ , ver figura 1.1

De esta manera la presentación de saltos en canales de sección trapecial es de considerable interés para su uso en aplicaciones de tipo práctico, aunque las corrientes laterales de retorno que se producen en ellos hacen poco estable el resultado, por este motivo en muchas ocasiones se prefiere regresar al diseño y uso del rectangular.

Los anteriores argumentos han contribuido a que en el país se hayan construido tanques amortiguadores trapeciales en diversas presas, dentro de los que se pueden destacar los siguientes:

- Presa Miguel Hidalgo (El Mahone), en el distrito de riego 075, río Fuerte, Sinaloa.
- Presa Falcón, localizada en el sistema de presas internacionales sobre el río Bravo, Tamaulipas.
- Presa Marte R. Gómez (El Azúcar), en el distrito de riego 026, bajo río San Juan, Tamaulipas.
- Presa Requena, en el distrito de riego 101, río Tula, Hidalgo.
- Presa Josefa Ortiz de Domínguez (El Sabino), río Fuerte, Sinaloa.
- Presa Netzahualcóyotl (Malpaso), en el río Grijalva, Chiapas.

Estas obras disipadoras de energía, han tenido diversos problemas en su operación; en la presa Netzahualcóyotl (Malpaso), por ejemplo, se levantaron las losas del tanque amortiguador, lo que propició un estudio especial de esta obra

que fue reparada en 1973 y a partir de ese año no se ha operado; en el caso de la presa Miguel Hidalgo (El Mahone), también hubo problemas con el levantamiento de losas que se debieron a las fluctuaciones de la presión dentro del tanque amortiguador que tiene una longitud muy corta.

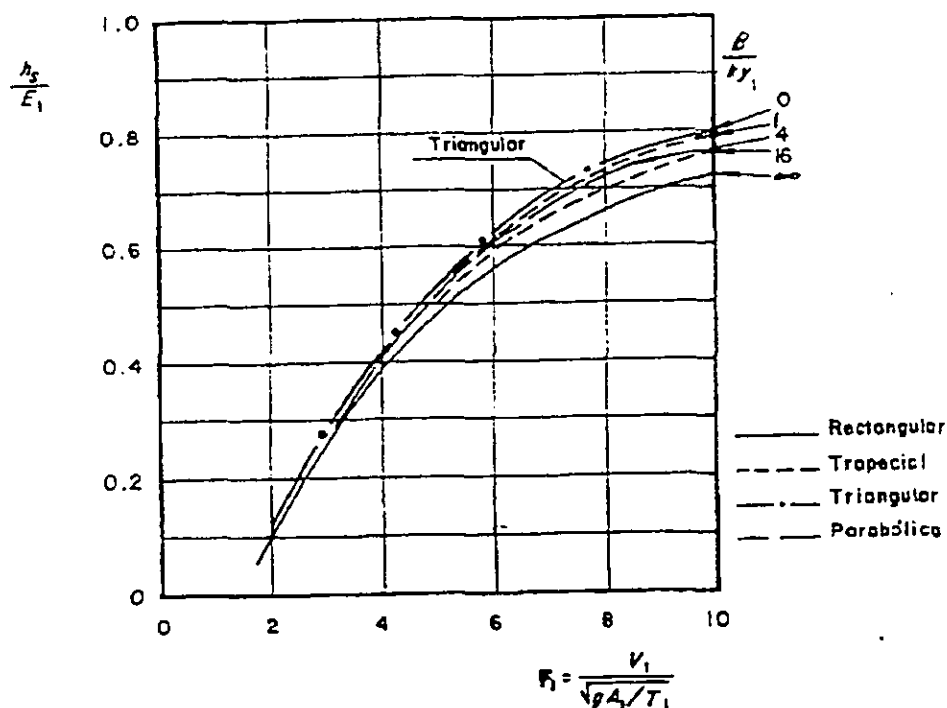


Figura 1.1 Eficiencia del salto hidráulico en canales horizontales abiertos de distintas formas de sección French (1985)

En otros casos, el tipo de problema operativo que se ha presentado en tanques amortiguadores trapeciales, es un flujo asimétrico<sup>1</sup> al inicio del salto hidráulico, que ocasiona una sobreelevación del agua con el desbordamiento sobre el muro confinante del lado que recibe dicho flujo, adicionando un empuje dinámico sobre él, sin aparentes problemas de destrozos como en los casos antes señalados. De la lista anterior el tanque de la Presa Josefa Ortiz de Domínguez (El Sabino) presenta en su operación este flujo asimétrico.

Así, debido a la amplitud del tema "salto hidráulico", del que se han presentado sólo algunas facetas, conviene aclarar que este trabajo queda circunscrito sólo al flujo asimétrico en la operación de tanques amortiguadores de *sección trapecial*, problema que como se verá adelante, tiene al menos 60 años de haberse evidenciado el esfuerzo para entender el fenómeno, pero hasta ahora los enfoques bajo los que se ha estudiado, han sido parciales debido a la enorme

<sup>1</sup> Flujo asimétrico, se define como aquel que se presenta en un salto hidráulico en sección trapecial cuando la traza del inicio del fenómeno no es perpendicular al eje del canal, y se tiene un ángulo de asimetría.

complicación del problema, por lo que aún se sigue en la incertidumbre.

En resumen, el objetivo que se persigue en este trabajo se limita sólo a proporcionar elementos teóricos que permitan al diseñador, de una manera sencilla, analizar el diseño de un tanque amortiguador de sección trapecial para cualquier talud; esto es, presentar recomendaciones adecuadas basadas en los principios de la Hidráulica, y viendo al fenómeno desde "afuera", permitan anticipar el tirante máximo que se presenta dentro del tanque amortiguador y compararlo con el libre bordo propuesto para que el flujo no rebase ese límite.

Para lograr lo anterior, se hizo una revisión bibliográfica (capítulo 2) del tema, posteriormente (capítulo 3) se propone un criterio de análisis basado en el principio de la *cantidad de movimiento* aprovechando las últimas referencias encontradas, enseguida (capítulo 4) se realizan una serie de ensayos en un dispositivo físico del laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con objeto de comparar los valores experimentales con la teoría encontrada en el apartado anterior para aplicar el resultado de este criterio a dos casos reales de tanques amortiguadores de sección trapecial en las presas Josefa Ortiz de Domínguez y Marte R. Gómez (capítulo 5). Al final (capítulo 6) se apuntan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

## CAPÍTULO DOS

### APORTES TEÓRICOS AL SALTO HIDRÁULICO EN SECCIONES TRAPECIALES

Cuando el flujo en un canal pasa de un régimen rápido a otro tranquilo, el cambio es brusco y se presenta por medio del fenómeno conocido como salto hidráulico, que es totalmente natural. La evidencia experimental confirma con claridad que esta transferencia de régimen es brusca, acompañada de mucha turbulencia y gran pérdida de energía.

De las investigaciones que se han hecho del salto hidráulico en secciones rectangulares, se han observado las características siguientes: al entrar el agua a la zona del salto, se reduce rápidamente la velocidad del flujo, manifestándose en un incremento brusco del tirante que virtualmente rompe el perfil del flujo y se produce propiamente el fenómeno del salto hidráulico; además, se pueden observar fuertes pulsaciones, como si el agua entrara en ebullición, indicación visible de la inclusión de aire. Después de este incremento irregular y brusco de la superficie del agua, la energía específica final es con frecuencia la apropiada para establecer un tirante casi igual al normal en un tramo relativamente corto del canal aguas abajo, el frente turbulento se estabiliza de manera inmediata y se continúa libremente en régimen subcrítico.

Este cambio de régimen supercrítico a subcrítico es de uso frecuente en obras hidráulicas, debido a los accidentes topográficos como, por ejemplo, cuando un canal de gran inclinación descarga en otro de pendiente nula o muy baja, es decir obedece a la necesidad de disipar energía para que la estructura hidráulica trabaje bajo las condiciones de diseño establecidas y el fenómeno se ubique en una zona de confinación a partir de la cual no se produzcan velocidades erosivas.

Se emplea para ello la estructura denominada *tanque amortiguador* en la cual la disipación se hace forzando la formación de un salto hidráulico dentro de su longitud, que teóricamente puede lograrse en forma natural mediante la presencia del conjugado mayor en el río o bien por medios artificiales como es: un umbral de cresta delgada, uno de cresta ancha, o un escalón brusco ascendente.

Definir la longitud del salto es necesario para determinar la protección del piso de la estructura en la cual no se pueden dejar que las grandes velocidades del régimen supercrítico entren en contacto con el terreno natural, ya que sufriría erosión; O'Brien y Hickox (1934) indican que lo realmente importante es la

longitud en que la velocidad de fondo disminuye, y no se hace peligrosa para conservar su estabilidad.

Actualmente, los estudios experimentales han demostrado que dentro del fenómeno existe la longitud  $L_r$  del vórtice turbulento característico del salto, que se define como la distancia entre la sección donde inicia su cara frontal y otra que corresponde a la superficie de estancamiento, es decir, la de separación del flujo en las direcciones de avance y retroceso. En contraste la longitud  $L_j$  del salto definida desde tiempo atrás como la distancia desde la misma sección inicial, hasta aquella en que se alcanza la máxima altura de la superficie del agua y donde se estabiliza la distribución de la velocidad.

El salto hidráulico es un fenómeno natural, cuya comprensión y estudio ha presentado innumerables complicaciones asociadas a las siguientes características, Hager (1992):

- Alta turbulencia del flujo con significativos incrementos de velocidad y presión.
- Pulsaciones tanto en la velocidad como en la presión y desarrollo de ondas aguas abajo del salto.
- Flujo de dos fases debido a la inclusión de aire.
- Generación de sonidos y disipación de energía como resultado de la turbulencia.
- Patrón erosivo debido al desarrollo de vórtices a escala macro.

En los diseños de tanques amortiguadores de sección trapezoidal, donde se induce el salto hidráulico, se parte de la hipótesis de que se presenta un flujo simétrico después de él, esta hipótesis puede no ser cierta, como es el caso de la presa Josefa Ortiz de Domínguez.

Es importante señalar que los esfuerzos que se han hecho en el tema del salto hidráulico en canales trapezoidales, se han realizado en varias etapas: aplicación de las ecuaciones fundamentales de la Hidráulica para encontrar los tirantes conjugados a través de tablas y ábacos que facilitan su cálculo, la experimentación para calcular la longitud del salto; posteriormente se incorporan parámetros que influyen en el fenómeno y recientemente a entender el comportamiento interno del flujo; éste último representa un avance significativo dada la complicación del problema que se está tratando, lo cual se verá posteriormente.

Dada la importancia de este fenómeno se relata a continuación las investigaciones más relevantes para comprender el salto hidráulico en secciones trapezoidales y encontrar en algunos de estos estudios las razones de su asimetría.

Posey y Hasting (1930), son los pioneros en este esfuerzo, describieron el flujo en secciones de geometría tanto trapezoidal como espacial (el grado de espacialidad del flujo se incrementa a medida que exista mayor diferencia

geométrica respecto a la sección rectangular); indicaron que la relación de tirantes conjugados se basa en la ecuación de la *cantidad de movimiento* misma que fue verificada. Las mediciones de la longitud del salto hidráulico (que incluyen las cuñas al pie del fenómeno), indican que éstos son mucho más largos que los que se presentan en canales rectangulares, razón por la cual hacen hincapié en la dificultad de definir la terminación del salto, aún para secciones rectangulares. Finalmente, remarcan la presencia de vórtices y aireación aún en saltos hidráulicos estables, Posey (1963).

Más tarde, Hsing (1937) mediante 200 pruebas de salto hidráulico en canales trapeciales, con intervalo del número de Froude de 1.77 a 3.48, llegó a las conclusiones siguientes:

- La relación salto – tirante observada, se comporta de acuerdo a la calculada por la fórmula de la *cantidad de movimiento*.
- El carácter distintivo más sorprendente fue la formación de dos frentes, uno en cada lado del salto a lo largo de la traza. Esta situación fue evidente en algunas de las pruebas realizadas. Este tipo de salto se puede considerar simétrico.
- La superficie libre del agua después del salto no se mantiene en un nivel, ya que las sobreelevaciones en los lados son mayores que en la parte central.
- El flujo fue no simétrico y éste frecuentemente puede ubicarse en uno u otro lado. *No se encontró ninguna explicación lógica para que se presentara esta asimetría*. Seguramente, debido a alguna modificación del fenómeno, ya que es notorio su carácter pulsante.

Respecto a la tercera conclusión, una explicación de las sobreelevaciones en los costados del salto puede ser interpretada de la manera siguiente:

En un canal trapecial, la *cantidad de movimiento* por unidad de longitud es menor en los lados dado que fluye menos agua por allí. La figura 2.1 muestra la distribución de velocidades en una sección trapecial, así, el flujo hacia aguas arriba será mayor en los lados que en el centro. Con taludes más tendidos, se concentrará más agua en los lados, donde la *cantidad de movimiento* por unidad de ancho es menor. Consecuentemente, el flujo irá a mayor distancia aguas arriba y el ángulo entre el borde interior del costado será convergente y el eje del canal será menor, lo anterior se encuentra consignado por Elevatorski (1954).

Justamente el cuarto punto manifestado por Hsing, donde no se tuvo una explicación lógica del problema, es el motivo del presente trabajo. En la búsqueda bibliográfica desarrollada hasta el momento, se han encontrado soluciones parciales mismas que se indican en forma cronológica líneas abajo.

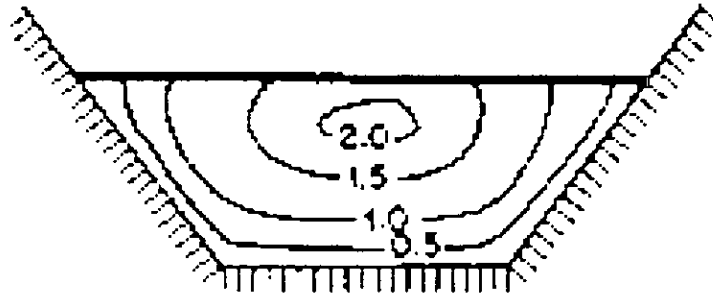


Figura 2.1 Distribución de velocidades en una sección transversal de un canal trapecial

En años posteriores a las primeras referencias antes presentadas (Posey y Hasting 1930), el estudio se encaminó a mejorar el entendimiento analítico del salto hidráulico en secciones de diversa geometría, que desde luego incluyó a la trapecial, produciendo para cada caso soluciones exactas; empleando diferentes aproximaciones matemáticas y elaborando ábacos, para el cálculo de los tirantes conjugados. No abordaron la asimetría del flujo, limitándose al salto claro. Se deben mencionar los ábacos de Diskin (1961) y Massey (1961), sobretodo el último que se usa en el medio nacional, aunque con las calculadoras de bolsillo y computadoras personales, la tendencia es a abandonarlo. Diskin propuso definir al número de Froude como:

$$F_r = \left[ \frac{Q^2 T_1}{g A_1^3} \right]^{1/2} = \frac{V_1}{(g \bar{h}_1)^{1/2}} \quad (2.1)$$

donde

$Q$  , gasto ( $m^3/s$ )

$T_1$  , ancho de la superficie del agua en la sección 1 (m)

$g$  , aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$A_1$  , área hidráulica en la sección 1 ( $m^2$ )

$V_1$  , velocidad media del agua en la sección 1 (m/s)

$\bar{h}_1$  ,  $A_1 / T_1$  , tirante hidráulico medio en la sección 1 (m)

La presentación del número de Froude anterior en la ec. 2.1, previene a la idea de utilizar  $F_r=1$ , (válida para sección rectangular) como parámetro para definir la condición crítica,  $F_r < 1$  la subcrítica y  $F_r > 1$  la supercrítica lo cual no es cierta para la sección trapecial. Esta condición no se cumple en la sección

trapezoidal, donde el número de Froude ya no será 1 para la condición crítica, variará en torno a este valor para cada situación específica, no obstante el concepto de comparación con respecto al valor que tome para la condición crítica sigue siendo válido; esto es, pueden presentarse los dos tipos de régimen antes indicados.

Diskin (1961) indica que existe concordancia entre los tirantes conjugados medidos con los valores teóricos derivados de la *cantidad de movimiento* de salto hidráulico en canales de sección no rectangular, pero el cálculo de los tirantes conjugados era un proceso tedioso que involucra una solución gráfica o por aproximaciones sucesivas. Diskin presenta un procedimiento basado en una ecuación similar a la de Elevatorski, pero derivada de manera diferente. Él obtiene una solución exacta para canales que tienen una relación exponencial entre el área y el tirante (triangular, rectangular, parabólica) y aproximada para la trapezoidal.

Massey (1961) refiere que la literatura del salto hidráulico en secciones no rectangulares es marcadamente escasa y hace referencia al método de Diskin (1961), indicando que no es preciso pues subestima la relación de los conjugados. Así, él presenta una solución de las ecuaciones considerada exacta, para ser usada en lugar de los métodos aproximados existentes en ese entonces para sección trapezoidal. Manifiesta que al presentar su estudio, encontró un trabajo realizado por Stevens (1933) quien obtuvo un método similar al suyo aunque un poco más complicado.

Al año siguiente, Sandover y Holmes (1962), realizaron sus investigaciones enfocados principalmente a medir la longitud del salto, sin embargo sus pruebas fueron abundantes. Mantuvieron el ancho de la base del canal y modificaron el talud para ángulos de  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ , reportando dificultades para correlacionar los tirantes calculados por la *cantidad de movimiento* respecto a los encontrados experimentalmente; al buscar las características de la longitud del salto que fue la razón fundamental, éstas fueron imposibles de establecer. Hager (1987) sostiene que estas conclusiones obedecen a tener pocas herramientas para hacer sus mediciones y a los bajos números de Froude empleados. Hacen referencia estos autores a un estudio realizado por Flores (1954), quien indica la evidencia de que la distribución de velocidades varía con la profundidad y establece para ello un factor  $\alpha$ ; Sandover y Holmes (1962) afirman que un estudio detallado sobre este factor dará realmente un entendimiento adecuado al problema.

C. Andreani y M. Iglesias en Chile, 1964, realizaron en forma sistemática y muy detallada, experimentos en saltos hidráulicos en secciones trapezoidales cuyos resultados se presentan en tablas y figuras que se consignan en el trabajo escrito por Domínguez (1974), con taludes  $\frac{1}{2}$  y  $1/1$  midiendo, principalmente, la longitud de salto en cada caso (que es mayor que la consignada en canales de sección rectangular). Comprobaron además la validez de la ecuación general de la igualdad de la cantidad de movimiento en el cálculo de los tirantes conjugados. La referencia citada no toca el punto de la asimetría en el flujo, debido a que implícitamente su interés obedecía al salto claro.



Silvester (1964) basándose en las experiencias de Hsing, para números de Froude menores a 4, amplió su experimentación al rango de aplicaciones de  $4 < F_{r1} < 8$ , teniendo dificultad para comprobar el principio del *cantidad de movimiento* y la definición de la longitud del salto.

Mohed y Sharp (1971) al reanudar la fase experimental del salto hidráulico en canales trapeciales abordaron de nuevo la asimetría del flujo, manifiestan haber tenido dificultades en la medición de los tirantes, por la presencia del flujo asimétrico que mostraba una diferencia significativa en los niveles de agua dentro de la sección transversal del canal. Este fenómeno, no obstante que era establecido, resultaba ser bastante inestable; además, era sólo suficiente insertar un obstáculo a la corriente al inicio de la rápida para modificar el patrón del flujo en el lado contrario, sin modificar prácticamente tirantes ni gastos, pero no dieron una explicación ni ideas para resolverlo.

Ohtsu (1977) logró un avance significativo en el salto hidráulico para canales trapeciales al haberlo clasificado en cuatro tipos, utilizando un criterio que toma en cuenta la simetría de la corriente principal y la permanencia de la misma. Cada tipo de salto quedó dentro de distintos dominios del talud  $k$  y de  $F_{r1}$  variando desde el tipo 1 equivalente al rectangular, donde el flujo avanza de modo simétrico respecto al eje del canal sin deflectar hacia los taludes, hasta el tipo 4 para  $k=1$  y  $F_{r1}$  un poco menor de 6.0; para éste, el flujo en su avance deflecta hacia los taludes y el salto es asimétrico. Ver tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1 Tipos de salto hidráulico en canales de sección trapecial, según Ohtsu 1977.

Tipo 1	El flujo avanza sin deflectar a los lados. El salto es simétrico
Tipo 2	Aunque la turbulencia es un poco diferente de un lado a otro el salto es casi simétrico
Tipo 3	La turbulencia de un lado es inestable y el flujo frecuentemente cambia de un lado al otro.
Tipo 4	El flujo que avanza deflecta y el flujo es asimétrico

Hager y Wanoschek (1989), publican un estudio para entender el fenómeno del salto hidráulico en secciones trapeciales, apoyándose en prácticamente todas las referencias antes indicadas. Experimentaron en un canal trapecial de talud  $k=1$  y ancho de plantilla  $B = 0.20$  m, variando el número de Froude entre 3 y 13 y los gastos desde 7.5 a 98 l/s. Observaron que el comportamiento del flujo en el salto dentro de un canal trapecial es bastante diferente del formado en un rectangular. Presentan un esquema del flujo, explicando detalladamente la manera en que se ve éste en un canal de esa sección.

Estos investigadores, con base en observaciones detalladas en tres dimensiones, concluyen que el salto hidráulico en la sección trapecial es un fenómeno netamente tridimensional. Mencionan que existe la presencia de un vórtice en el fondo que tiene gran extensión y que sorprende no hubiera sido detectado anteriormente, lo que produce diferencias importantes respecto al salto

en sección rectangular, como son:

- la velocidad en el fondo se reduce en forma importante
- la corriente principal se levanta hacia la superficie pero diverge a ambos lados del canal
- por tanto, la velocidad máxima ocurre a lo largo de los taludes, cerca de la superficie

Tabla 2.2. Clasificación de tipos de salto. Ohtsu 1977

K	$F_{r1}$	Forma del Salto
0	$N/r$	Tipo 1
1/4	$N/r$	Tipo 1
1/2	$F_{r1} < 4.7 - 5.3$	Tipo 2
	$F_{r1} > 4.7 - 5.3$	Tipo 1
2/3	$F_{r1} < 4.4 - 4.8$	Tipo 3
	$F_{r1} > 4.4 - 4.8$	Tipo 2
1	$F_{r1} < 5.6 - 6.0$	Tipo 4
	$F_{r1} > 5.6 - 6.0$	Tipo 3
4/3	$F_{r1} < 5.8 - 6.2$	Tipo 4
	$F_{r1} > 5.8 - 6.2$	Tipo 3
2	$N/r$	Tipo 4

( $N/r$ ) No registrado

Hager y Wanoschek (1989), manifiestan que no obstante la longitud de un salto en un canal trapecial es mayor que en uno rectangular, como lo mencionan los chilenos Andreani e Iglesias en Domínguez (1974), su uso puede ser ventajoso en tanques amortiguadores por requerir tirantes de salida menores y costos de excavación inferiores, esta condición dependerá esencialmente de las características de la curva elevaciones - gastos del río.

Una observación muy importante, que limita hasta el momento sus conclusiones es haber probado sólo con un talud ( $k=1$ ), y hace recordar las dificultades obtenidas por Sandover y Holmes y posteriormente por Ohtsu, en la realización de pruebas para diferentes taludes debido a las pocas herramientas para hacer sus mediciones y a los bajos números de Froude empleados.

Del trabajo de Hager y Wanoschek, se puede, además, obtener la longitud superficial del salto, la longitud del vórtice de fondo, la distancia del frente asimétrico y la longitud del flujo lateral de retorno, que vienen a aportar información al diseñador con datos experimentales en la determinación de la longitud del salto hidráulico, pues aunque sigue siendo experimental su determinación se basa en observaciones más detalladas.

Finalmente Hager y Wanoschek señalan que el objetivo fundamental de su trabajo es el de investigar el comportamiento del flujo, situación que han podido lograr gracias al equipamiento con que cuenta el laboratorio donde han realizado sus investigaciones, estos trabajos han permitido conocer nuevas características internas del salto hidráulico de sección trapezoidal.

Sánchez y Gracia (1995) posteriormente, realizaron una investigación sobre el comportamiento de tanques amortiguadores en secciones trapezoidales, que difiere de lo hecho anteriormente; así elaboraron un planteamiento teórico que reflejase el comportamiento del fenómeno que se presentaba en un prototipo con flujo asimétrico. En un segundo trabajo (1995a) presentaron un criterio de cálculo apoyado en una serie de pruebas en un dispositivo experimental que no era estrictamente el modelo a escala de prototipo alguno; para establecerlo, se utilizó la técnica de los números adimensionales y de esta manera permitir que sus resultados fueran lo más generales posible.

Es de destacarse que este esfuerzo involucra varios aspectos presentados en estudios anteriores citados que de alguna manera no fueron concluyentes, salvo en el caso de Sandover y Holmes. Al presentar esta herramienta que permite diseñar estas estructuras atendiendo tanto al número de Froude como a las dimensiones y taludes del tanque amortiguador, pues toma en cuenta como variables al ancho "B" de la plantilla con dos valores (0.67 y 0.335m), al talud "k" con dos valores (1:1 y 0.5:1), y el gasto "Q" también con dos valores (0.01 y 0.004 l/s).

Sánchez y Gracia (1995a) obtuvieron después de 16 pruebas realizadas, modificando las variables antes mencionadas y realizando una regresión logarítmica con un 80% de intervalo de confianza, la expresión siguiente:

$$Y_M = Y_2 * 2.85 \left[ \frac{Y_2}{B} (1 + k^2)^{0.5} \right]^{-0.11} * F_{rc}^{0.397} \quad (2.2)$$

el número de Froude se calcula como:

$$F_{rc} = \frac{Q}{(B + k * Y_2) * Y_2 \sqrt{g * Y_2}} \quad (2.3)$$

la cual tiene validez si:

$$\left[ 2.85 \left[ \frac{Y_2}{B} (1 + k^2)^{0.5} \right]^{-0.11} F_{rc}^{0.397} \right] \geq 1 \quad (2.4)$$

donde

- $Y_1$  , tirante máximo en el tanque amortiguador (m)
- $Y_2$  , tirante en el río (m)
- $B$  , ancho de la plantilla del tanque amortiguador (m)
- $Q$  , gasto ( $m^3 / s$ )
- $k$  , talud del canal (adimensional)
- $F_r$  , número de Froude (adimensional)

En este último estudio se presentan algunas conclusiones que se sintetizan a continuación:

1. Establecen una interpretación teórica de la formación del flujo asimétrico en los tanques de sección trapezoidal
2. El nivel de salida del tanque condiciona las características del flujo asimétrico, a tal grado que se atenúa en la medida en que el salto se ahoga
3. Es cuestionable el preferir los tanques de sección trapezoidal sólo por razones económicas

Finalmente, es destacable que en esta última referencia, los autores indican que la asimetría del salto hidráulico depende fundamentalmente del nivel a la salida del tanque amortiguador de sección trapezoidal, mientras que en todas las demás referencias, lo importante es la variación del número de Froude. Esta afirmación será importante, además de que se comprobará, en el desarrollo del presente trabajo.

## CAPÍTULO TRES

### PROPOSICIÓN DE UN CRITERIO DE CÁLCULO

¶

#### 3.1 Criterio de diseño tradicional para el tirante conjugado mayor

La discusión primaria del salto en sección rectangular, que lleva al entendimiento del problema, involucra la idea de un canal que debe ser:

- a) prismático, esto es de sección constante
- b) de superficie relativamente lisa
- c) la pendiente es pequeña
- d) el eje del canal es recto

Los estudios más completos hasta ahora se refieren al llamado *salto clásico*, en un canal rectangular, liso, prismático y horizontal. El patrón de flujo en este tipo de salto es casi bidimensional, característica que simplifica el análisis, y es el tipo de salto hidráulico al que se ha hecho referencia en el capítulo anterior.

Debido al carácter tridimensional del flujo, que en un tanque amortiguador de sección trapezoidal las dimensiones de estas estructuras han sido estimadas de experiencias en modelos a escala y con una fundamentación teórica que parte básicamente de una sección rectangular.

En el capítulo dos, se considera que en los trabajos iniciales se daba por hecho que el salto hidráulico en canales de sección trapezoidal era simétrico; esta situación es cierta siempre y cuando el tirante en el río sea igual o mayor que el conjugado mayor, formándose de esta manera el salto claro o el ahogado. Si por alguna circunstancia esta condición no se cumple, entonces el salto es barrido (ondulado) y existe asimetría en el salto, tanto mayor cuanto más grande sea la diferencia entre el tirante conjugado mayor teórico y el que se tiene en la sección del río.

Así desde tiempo atrás se han propuesto procedimientos de cálculo para encontrar el conjugado mayor en función del menor o viceversa. Sotelo (1961) presenta una secuela de cálculo para el análisis del tanque amortiguador que limite al salto hidráulico en secciones trapezoidales. El cálculo puede hacerse a través de la solución simultánea de las ecuaciones del impulso y continuidad.

La ecuación de continuidad establece:

$$V_2 = \frac{Q}{BY_2 + kY_2^2} \quad (3.1)$$

y la de impulso:

$$\frac{Q}{g}(V_1 - V_2) = \frac{BY_2^2}{2} + \frac{1}{3}kY_2^3 - \frac{1}{3}kY_1^3 \quad (3.2)$$

donde

$Q$  , gasto ( $m^3/s$ )

$B$  , ancho de la plantilla (m)

$k$  , designación de taludes (adimensional)

$V_1$  , velocidad a régimen rápido (supercrítico) (m/s)

$V_2$  , velocidad a régimen tranquilo (subcrítico) (m/s)

$Y_1$  , tirante a régimen rápido (m)

$Y_2$  , tirante a régimen lento (m)

Sustituyendo la ec. 3.1 en la 3.2, desarrollando y ordenando en potencias decrecientes de  $Y_2$ , se obtiene al igualar a cero:

$$F(Y_2) = Y_2^5 - 2.5\left(\frac{B}{k}\right)Y_2^4 + 1.5\left(\frac{B}{k}\right)Y_2^3 - \left[1.5\left(\frac{B}{k}\right)Y_1^2 + Y_1^3 + 3\frac{QV_1}{gk}\right]Y_2^2 - \dots$$

$$\dots - \left(1.5\left[\frac{B}{k}\right]^2 Y_1^2 + \frac{B}{k} Y_1^3 + 3\frac{QV_1}{gk}\left[\frac{B}{k}\right]\right)Y_2 + 3\frac{QV_1}{gk}\left(\frac{B}{k}Y_1 + Y_1^2\right) = 0 \quad (3.3)$$

Una raíz de la ecuación anterior es  $Y_2 = Y_1$ , que es la solución en régimen crítico. Dividiendo  $F(Y_2)$  entre  $Y_2 - Y_1$  se obtiene:

$$F(Y_2) = \frac{F(Y_2)}{Y_2 - Y_1} = Y_2^4 + \left(2.5\left[\frac{B}{k}\right] + Y_1\right)Y_2^3 + \left[1.5\left[\frac{B}{k}\right]^2 + 2.5\left[\frac{B}{k}\right]Y_1 + Y_1^2\right]Y_2^2 + \dots$$

$$\dots + \left(-3\frac{QV_1}{gk} + 1.5\left[\frac{B}{k}\right]^2 Y_1 + \left[\frac{B}{k}\right]Y_1^2\right)Y_2 - 3\frac{QV_1}{gk}\left(\frac{B}{k} + Y_1\right) \quad (3.4)$$

La ecuación anterior es de cuarto grado con una sola raíz positiva real que es la solución buscada.

El cálculo de esta raíz puede hacerse en forma directa, utilizando por ejemplo los métodos de división sintética y de Newton o bien empleando las figuras de Domínguez (1974). Actualmente ambos métodos han sido superados por la utilización de calculadoras de bolsillo que sin dificultad pueden resolver ecuaciones de este tipo, incluso a partir de la expresión general de la función *cantidad de movimiento* o bien en computadoras de escritorio mediante el empleo de la hoja de cálculo, con programas en lenguaje BASIC o Fortran o por paquetes como el Mathcad que siguiendo la secuela usada en ingeniería permiten mejorar el enfoque del diseño dejando a la computadora el aspecto de precisión en el resultado.

### 3.2. Propuesta teórica para encontrar el tirante máximo dentro del canal trapecial a partir de la relación de $M_2 / M_1$ .

Cuando se presenta el salto hidráulico se cumple la *cantidad de movimiento*, expresión válida para cualquier sección geométrica del canal. En el salto hidráulico claro, para la sección trapecial, la *cantidad de movimiento* desarrollado en la sección del conjugado menor (régimen supercrítico) que se denominará  $M_1$ , debe ser igual a la *cantidad de movimiento* desarrollado en la sección del conjugado mayor (régimen subcrítico) que se denominará  $M_2$ . En estas condiciones el flujo es simétrico porque las secciones al inicio y terminación del fenómeno llenan la sección transversal. El flujo va en el sentido de la corriente al inicio y al final del fenómeno.

Cuando el tirante a la salida del tanque es menor que el conjugado mayor entonces se presenta el flujo asimétrico y puede decirse que su *cantidad de movimiento*  $M_2$ , es menor que  $M_1$ , por lo cual existe un flujo en retroceso que induce a que haya una asimetría. Se demostrará posteriormente (ver explicación de las tablas 3.1 y 3.2, pág. 25) que este proceso se hace más evidente a medida que exista mayor diferencia en las funciones de cantidad de movimiento antes y después del salto. Lo cual fue observado en los diferentes ensayos que se hicieron dentro del programa de pruebas en el dispositivo del Laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM y se detallará en el capítulo siguiente.

En las experiencias realizadas por Hager y Wanoschek (1989) y mencionadas someramente en el segundo capítulo, se considera ahora pertinente la explicación del esquema de los aspectos fundamentales del salto hidráulico claro en canales de sección trapecial, es decir simétrico, misma que comenta acertadamente Sotelo (1998).

En la figura 3.1 se observa que el flujo entrante (1) de alta velocidad se eleva y forma una zona (2) de salpicadura debido a una zona (3) de separación

del fondo, la que designaron como vórtice de fondo. De este modo, la corriente principal se mueve cerca de la superficie y diverge hacia los taludes. Una primera parte del flujo lateral se regresa y forma zonas (4) del flujo de retroceso sobre ambos taludes, que incluyen las alas de la cuña formada al frente del salto, mientras que una segunda parte (5) se mantiene sobre la superficie y continúa hacia aguas abajo, la tercera parte (6) se introduce en el cuerpo líquido a lo largo de los taludes y alimenta al vórtice de fondo. Más adelante, esta corriente (7) ya no es arrastrada por el vórtice de fondo sino continúa directamente hacia el flujo de salida después del salto.

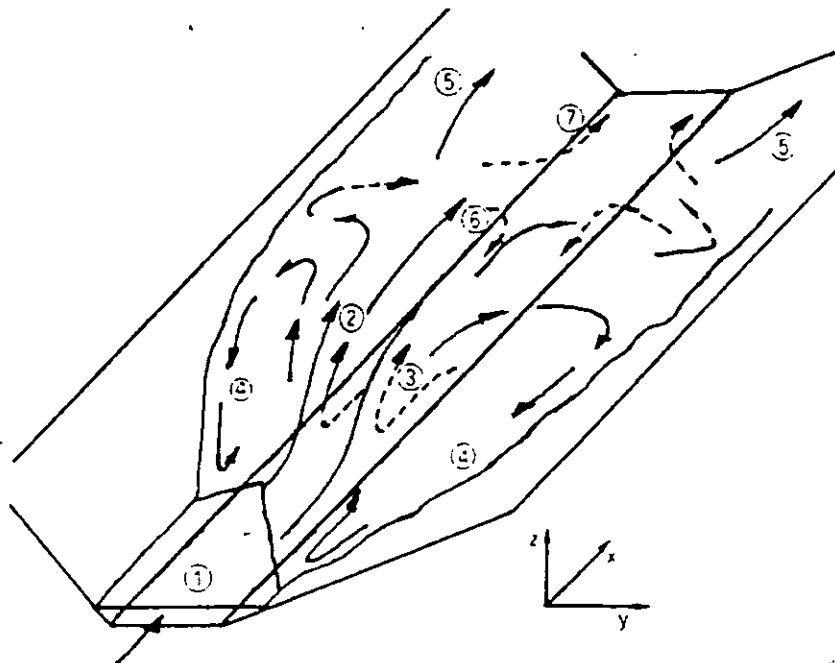


Figura 3.1. Vista esquemática de los patrones de flujo principal del salto hidráulico en una sección trapecial, según Hager (1989).

Cuando el flujo se hace asimétrico, las condiciones descritas se hacen más complejas, pues el flujo procura sesgarse de un lado provocando con esto que tienda a salirse del muro confinante; además, de lo mencionado, es conveniente acotar que aunque las condiciones tanto del gasto como de la posición del nivel aguas abajo permanezcan estables, en los ensayos realizados en el modelo hidráulico, ya sea que el flujo sea simétrico o asimétrico, se tienen desplazamientos significativos de corrimiento sobre el eje del canal en ambas direcciones del flujo lo que induce que se haga necesario un control que confine la posición del fenómeno.

Con observaciones y mediciones detalladas en tres dimensiones, la referencia citada, Hager y Wanoschek (1989), también indica mediante diversos



cortes a diferentes tirantes que el campo de velocidades difiere en cada nivel, no obstante que las condiciones impuestas al ensayo hayan quedado fijas. Estos hechos se habían detectado en estudios previos como el de Flores (1954) y Sandover y Holmes (1962), pero en ambos casos la falta de equipamiento para observar y medir esta variable fue motivo para que pasaran varios años antes de que se pudiesen tener evidencias de su existencia.

Los anteriores estudios se han presentado como antecedente a la propuesta de encontrar el valor del ancho "b" promedio ocupado por el flujo en la dirección del salto hidráulico en una sección intermedia (denominada 2) del salto cuando el flujo es asimétrico, donde el observador estudia desde "fuera" del fenómeno, dadas las limitaciones de equipo instrumental, ver la figura 3.2.

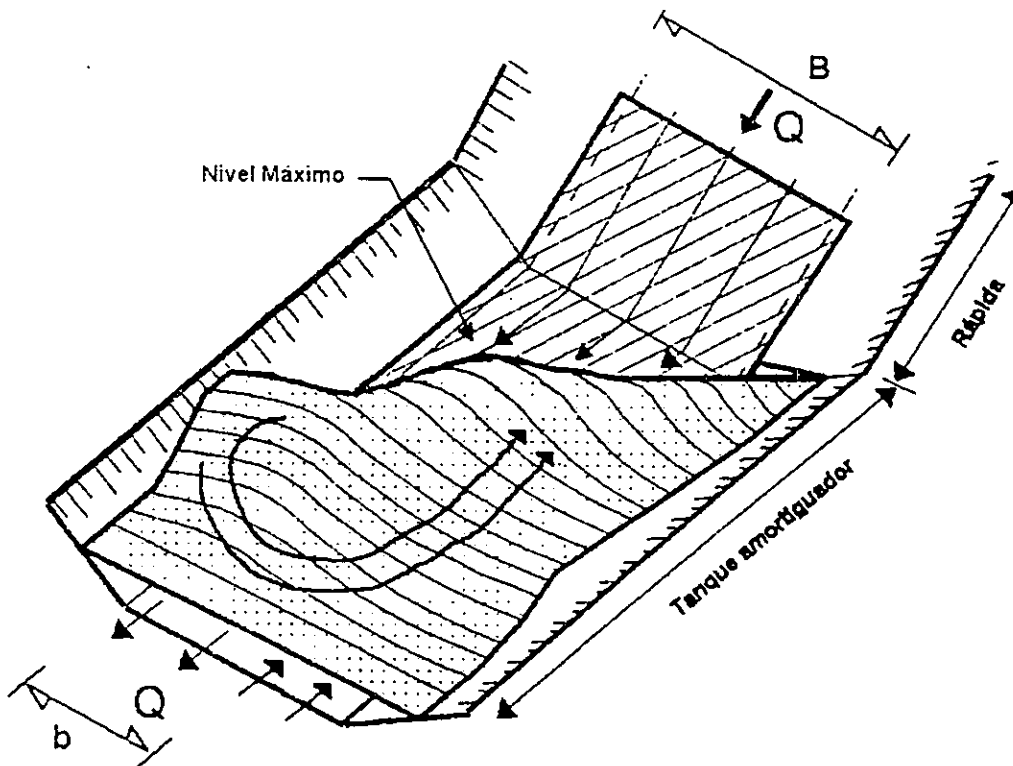


Figura 3.2. Esquema del flujo asimétrico del salto hidráulico en un tanque amortiguador de sección trapecial

Conviene recordar, que la "cantidad de movimiento" está definida por dos términos: el primero es el empuje debido a la presión sobre el área de la sección y el segundo es la cantidad de movimiento del flujo a través de una sección del canal. Debido a que ambos tienen las dimensiones de una fuerza por peso de la unidad de volumen, es decir  $[L^3]$ , a esta función se le conoce también como *cantidad de movimiento específico* o *fuerza específica* y realmente es una

cantidad vectorial asociada con una sección de flujo. Al desarrollar la expresión general de la función *cantidad de movimiento* para la sección trapezoidal ver ec. 3.5, ésta consta de tres sumandos donde los dos primeros corresponden al término del empuje debido a la presión sobre el área de la sección.

La expresión que corresponde a la sección trapezoidal, Henderson (1966), es:

$$M_1 = \frac{B*Y_1^2}{2} + \frac{k*Y_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(B*Y_1 + k*Y_1^2)} \quad (3.5)$$

Si se propone un valor del tirante por ejemplo  $Y_1=0.145$  m, y se sustituyen los valores de las otras variables según el subcapítulo 3.3 (pág. 21), la cantidad de movimiento es  $M_1 = 0.005067$  m<sup>3</sup> por lo que al calcular cada término, de la función referida, se tiene lo siguiente:

$$\frac{B*Y_1^2}{2} = 0.003522 \text{ m}^3 \quad \frac{k*Y_1^3}{3} = 0.001016 \text{ m}^3 \quad \frac{Q^2}{g(B*Y_1 + k*Y_1^2)} = 0.000529 \text{ m}^3$$

que representan el 69.5%, el 20.0% y el 10.5% de "peso", respectivamente para cada uno de los términos que componen la función *cantidad de movimiento*. Esto es, los primeros dos, son los que tienen realmente el mayor peso al constituir entre los dos prácticamente el 90 %.

El cálculo anterior permite proponer para el procedimiento la aproximación siguiente:

$$M = \frac{b*Y^2}{2} + \frac{k*Y^3}{3} \quad (3.6)$$

Suponiendo que  $k*Y$  pueda expresarse como una parte de "b" puede establecerse que  $k*Y = f*b$ , donde f es un factor a determinar, entonces la ecuación 3.6 puede escribirse como:

$$M = \frac{b*Y^2}{2} + \frac{f*b*Y^3}{3} \quad (3.7)$$

Derivando la ecuación anterior respecto a  $b$  se obtiene:

$$\frac{dM}{db} = \frac{Y^2}{2} + \frac{f*Y^3}{3} = \frac{M}{b} \quad (3.8)$$

En la ecuación anterior si se considera que la proporción entre  $\frac{dM}{db}$  y  $\frac{M}{b}$  esta dada por el talud expresado como  $\frac{1}{k}$ , se puede establecer que

$$\frac{dM}{db} = \frac{1}{k} \left( \frac{M}{b} \right) \quad (3.9)$$

Integrando la ecuación anterior y considerando a  $M_1$  y  $B$  como valores de referencia se obtiene:

$$\ln \left( \frac{M}{M_1} \right) = \frac{1}{k} * \ln \left( \frac{b}{B} \right) \quad (3.10)$$

Despejando el valor de  $b$  cuando  $M = M_2$  se obtiene

$$b = B \left( \frac{M_2}{M_1} \right)^k \quad (3.11)$$

Se propone entonces la expresión anterior 3.11 como la relación fundamental que hay entre la *cantidad de movimiento* para el tirante propuesto (menor al conjugado mayor) y el correspondiente al conjugado menor, que normalmente sirve de parámetro en las experiencias de prácticamente todos los investigadores que han estudiado sobre el tema de salto hidráulico.

Es de destacarse de la expresión 3.11, que si la *cantidad de movimiento* 2 y la 1 son iguales; esto es  $M_1 = M_2 = M_3$  se tiene la condición del salto claro y simétrico, entonces el valor de  $M_2 / M_1$  es la unidad, independientemente del valor del talud, por lo que se tiene que  $B = b$ . Es decir el flujo ocupa todo el ancho del canal y es la condición ideal. Los últimos renglones de las tablas 3.1 y 3.2 reflejan este comentario.

El planteamiento de la última ecuación tiene como finalidad el conservar lo práctico y atractivo de una propuesta para revisión o diseño, al hacerla general para cualquier talud.

Así, de la expresión general de dicha función, se propone sustituir el valor de " $B$ " por " $b$ ", en la ecuación 3.5. Dada la complejidad del comportamiento del flujo, incrementada por la asimetría donde ya no todo el caudal se mueve en la dirección de original sino que existe un refluo, en tales condiciones el tirante máximo puede calcularse con la expresión siguiente:

$$M_1 = \frac{b*Y_{MM}^2}{2} + \frac{k*Y_{MM}^3}{3} + \frac{Q^2}{g(b*Y_{MM} + k*Y_{MM}^2)} \quad (3.12)$$

Obsérvese que se ha sustituido este nuevo ancho en los términos que componen el primer y tercer elemento de la función *cantidad de movimiento* para sección trapezoidal, sin embargo al proponer valores de  $Y_{MM}$ , que es el tirante máximo para la condición de flujo asimétrico; esta sola sustitución no ha sido capaz de lograr la igualdad necesaria del *cantidad de movimiento*  $M_1$ ; por lo es necesario incorporar un nuevo factor al que se denomina "F", que afectará sólo a los sumandos que corresponden al empuje debido a la presión sobre el área de la sección ec. 3.12, es decir se toma en cuenta sólo a los dos primeros.

Al tener en cuenta que se deberá igualar la nueva función *cantidad de movimiento* a la original  $M_1$ , la ecuación 3.12 queda de la manera siguiente,

$$M_1 = \left( \frac{b*Y_{MM}^2}{2} + \frac{k*Y_{MM}^3}{3} \right) F + \frac{Q^2}{g(b*Y_{MM} + k*Y_{MM}^2)} \quad (3.13)$$

donde

$$F = \left( \frac{M_2}{M_1} \right) R \quad (3.14)$$

Obsérvese que se mantiene la razón  $M_2 / M_1$ , pues se considera que es el factor más importante, de modo que proponiendo valores a  $R$ , se pueda obtener el correspondiente factor "F" y la ecuación quede satisfecha cuando el valor de  $Y_{MM}$  de por resultado que la relación  $Y_2$  (obtenido de la ec. 3.19) /  $Y_{MM}$  (obtenido de la ec. 3.13) sea igual a la unidad, esto implica que se cumple la igualdad para la *cantidad de movimiento* 1.

De esta manera, es posible aceptar la idea de que la ecuación 3.13 responde a las condiciones de flujo obtenidas por la experimentación. Por tal razón, a partir de ella, en lo sucesivo se podrá considerar la posibilidad de calcular la magnitud del tirante máximo que se espera en el tanque amortiguador teniendo como base la relación del *cantidad de movimiento* al inicio del salto denominado  $M_1$  y cualesquiera otro valor propuesto  $Y_2$  que tendrá por *cantidad de movimiento* a  $M_2$ .

### 3.3. Proceso de cálculo para el criterio de análisis propuesto con datos de un ensayo en el modelo.

De la geometría del modelo hidráulico, ver figura B.1 del apéndice B, que

se detallará en el siguiente capítulo, se asignan valores a las variables:

- $Q$  , gasto en el modelo = 0.019 m<sup>3</sup>/s,
- $B$  , ancho del canal = 0.335 m
- $z$  , desnivel entre el canal de llegada y el tanque amortiguador = 0.66 m
- $L$  , longitud de la rápida desde la sección crítica hasta el inicio del tanque amortiguador = 1.50 m
- $k$  , talud del canal = 1: 1
- $g$  , aceleración de la gravedad = 9.81 m/s<sup>2</sup>
- $n$  , coeficiente de rugosidad de Manning = 0.011

Considerando que al final del tramo horizontal del modelo se presenta el tirante crítico, se utiliza la ecuación general del régimen crítico que presentada para la sección trapezoidal se escribe como:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{(Y_c * B + k * Y_c^2)^3}{B + k * Y_c^2} \quad (3.15)$$

al resolver para los datos mencionados, se tiene que  $Y_c = 0.0588$  m

Ahora se aplica la ecuación de la energía, entre la sección crítica (inicio de la rápida) y el inicio del tanque amortiguador que se denominará (1), con objeto de obtener el tirante conjugado menor, se tiene que:

$$E_c + z = \frac{Q^2}{2 * g (B * Y_1 + k * Y_1^2)^2} + Y_1 + L \left( \frac{n \left( v_c + \frac{Q}{B * Y_1 + k * Y_1^2} \right)}{\left( \frac{A_c}{P_c} + \frac{B * Y_1 + k * Y_1^2}{B + 2\sqrt{1 + k^2 * Y_1^2}} \right)^2} \right)^2 \quad (3.16)$$

donde

- $E_c$  , energía específica crítica (m)
- $v_c$  , velocidad crítica (m/s)
- $A_c$  , área hidráulica crítica (m<sup>2</sup>)
- $P_c$  , perímetro mojado crítico (m)

cuya solución es  $Y_1 = 0.0152$  m (tirante conjugado menor).

Con este valor, se puede obtener fácilmente la función *cantidad de movimiento* en 1, aplicando la ec. 3.5, se tiene  $M_1 = 0.006932$  m<sup>3</sup>.

Para que se presente el salto hidráulico claro, la *cantidad de movimiento* en la sección del régimen subcrítico debe ser igual a  $M_1$ , de tal manera que resolviendo para la misma expresión 3.5 se tiene que el valor de  $Y_1 = 0.171$  m la satisface, por lo que es el tirante conjugado mayor.

La condición anterior garantiza el salto hidráulico claro y que este sea simétrico. Sin embargo, la presencia del flujo asimétrico se da cuando el tirante que se presenta en el tanque es menor que el tirante conjugado mayor y ocurre una sobre elevación.

Para la sección donde ocurre la máxima sobre elevación puede establecerse que (conservando la nomenclatura):

$$M_2 = \frac{B*Y_2^2}{2} + \frac{k*Y_2^3}{3} + \frac{Q^2}{g(B*Y_2 + k*Y_2^2)} \quad (3.17)$$

De esta manera, se propone otro tirante, que se denominará  $Y_2$  con un valor de 0.145 m; es decir 15 % menor al conjugado mayor, con lo que  $M_2 = 0.00507$  m<sup>3</sup>, que es menor que el valor de  $M_1$  (0.006932 m<sup>3</sup>) cuando el salto es claro. Siendo la relación de  $M_2 / M_1 = 0.7309$ .

Ahora, para determinar las condiciones de un flujo asimétrico, se sigue la secuela de cálculo propuesta por Sánchez y Gracia (1995a), esto es, se calcula el tirante máximo  $Y_M$ , siendo necesario obtener el número de Froude  $F_{rc}$  con la expresión siguiente:

$$F_{rc} = \frac{Q}{(B + k*Y_2)*Y_2*\sqrt{g*Y_2}} \quad (3.18)$$

cuyo valor es  $F_{rc} = 0.2288$ , con lo cual al sustituirlo en la expresión 3.5 se encuentra  $Y_M$ , que tiene un valor de 0.2125 m.

Del trabajo original de Sánchez y Gracia (1995a), que concluye como se anotó con la ecuación 2.2, conviene aclarar que en este trabajo se modificó la citada ecuación por la 3.19, afectada ésta por un coeficiente 0.875, para tomar en cuenta las fluctuaciones medias del salto hidráulico.

$$Y_M = Y_2*2.85*0.875 \left[ \frac{Y_2}{B} (1 + k^2)^{0.5} \right]^{-0.11} * F_{rc}^{0.397} \quad (3.19)$$

Recordar que  $Y_M$  permite obtener la sobre elevación máxima dentro del tanque amortiguador y sirve de parámetro de diseño de la altura que deben tener los bordos de los taludes.

La relación  $Y_M/Y_2$  es del 46.57 %. Además, de acuerdo a la teoría empleada, se debe cumplir que la ecuación 3.18 debe tener un valor  $> 1$ .

$$2.85 * 0.875 \left[ \frac{Y_2}{B} (1 + k^2)^{0.5} \right]^{-0.11} * F_{rc}^{0.397} = 1.423912 > 1$$

De los cálculos realizados hasta el momento, se considera que el flujo al cambiar el tipo de salto de claro a barrido (ondulado) y producir una asimetría, ya no ocupa todo el ancho del canal como ocurría cuando  $M_1 = M_2$ , y existe un reflujo (se mueve en sentido contrario al flujo principal). El flujo principal ocupa una parte del ancho total del canal ( $B$ ) al que se denominará ( $h$ ).

Así, al utilizar la ec. 3.11, que es la propuesta para relacionar los "anchos" de la plantilla ocupados por el flujo principal, se obtiene que  $h = 0.245$  m, es decir que es el ancho ocupado por el flujo principal cuando existe el salto hidráulico asimétrico. La relación de  $h/B = 0.7309$ , que en este caso es igual a la relación de momentos ya que el talud es 1.

Ahora al proponer un valor de " $R$ " para calcular el correspondiente de " $F$ ", con base en la ec. 3.14, para lograr que la relación  $Y_M$  (ec. 3.19) /  $Y_{M,M}$  (ec. 3.13) sea la unidad, ésta se logra (1.001) para  $R = 1.03$ , donde  $F = 0.7529$ . La secuela del cálculo completa se hizo con apoyo del programa MathCad, mismo que se presenta para este ejemplo en el apéndice A de este trabajo.

#### 3.4. Comparación del criterio propuesto, datos de ensayos y el criterio de Sánchez - Gracia

Al comparar el valor del tirante máximo  $Y_M$ , medido en el ensayo (1), de 0.2248 m, tabla 3.1, que tiene las mismas condiciones impuestas a este cálculo, con el obtenido en el inciso anterior de 0.2125 m, se obtiene una diferencia de 5.79 % entre ambos valores. Es de observarse que en los valores consignados en la referida tabla 3.1, la máxima diferencia se obtiene para estos valores de  $Y_M$  medido experimentalmente y  $Y_M$  calculado.

Una situación semejante ha ocurrido en los valores que se consignan en la tabla 3.2, con la diferencia que corresponde al segundo gasto experimentado y que fue de 0.012 m<sup>3</sup>/s, donde la diferencia máxima encontrada fue de 8.74 %.

**Tabla 3.1. Comparación de valores  $Y_M$  calculado y medido en las pruebas realizadas con  $Q = 0.019 \text{ m}^3 / \text{s}$**

$Y_2$ (m)	$Y_M$ calculado (m)	$Y_M$ medido (m)	% variación	$M_2 / M_1$	b (m)	R
0.130	0.2084	0.2064 (2)	- 0.96	0.6018	0.2016	1.47
0.145	0.2125	0.2248 (1)	+ 5.79	0.7309	0.2448	1.03
0.171	0.2183	0.2090 (17)	- 4.45	1	0.3350	0.58

( ) Corresponde al número de prueba

**Tabla 3.2. Comparación de valores  $Y_M$  calculado y medido en las pruebas realizadas con  $Q = 0.012 \text{ m}^3 / \text{s}$**

$Y_2$ (m)	$Y_M$ calculado (m)	$Y_M$ medido (m)	% variación	$M_2 / M_1$	b (m)	R
0.099	0.1647	0.1590 (10)	- 3.58	0.5461	0.1829	1.83
0.110	0.1682	0.1738 (09)	+ 3.33	0.6559	0.2197	1.30
0.117	0.1703	0.1566 (26)	- 8.74	0.7349	0.2462	1.05
0.137	0.1753	0.1656 (25)	- 5.85	1	0.3350	0.58

( ) Corresponde al número de prueba

Lo anterior es trascendente pues los valores de los tirantes máximos medidos experimentalmente y los propuestos por el criterio de Sánchez - Gracia no son marcadamente diferentes, lo que permitirá ampliar los resultados y la secuencia de cálculo siguiente:

A partir de los datos consignados en la tabla 3.1, y aceptando la idea de que la ec. 3.13 responde a las condiciones de flujo obtenidas por la experimentación, el siguiente paso es obtener con más detalle el valor de "F", para lo cual se empleará la ec. 3.19 y el procedimiento de cálculo del inciso anterior, para encontrar los valores consignados en la tabla 3.3, obsérvese el empeño por conservar un criterio más amplio para proponer anchos y taludes, de acuerdo a cada caso específico que se presente al diseñador; por lo que se pasa de uno a tres gastos (dos de ellos no experimentados), de uno a dos anchos (uno no experimentado), de uno a dos taludes (uno no experimentado), haciendo que el método sea factible para cualquier condición geométrica e hidráulica.

La razón fundamental del presente trabajo es lograr una herramienta sencilla que confirme la propuesta de análisis llevada a cabo en el inciso anterior, partiendo de todo el estado del arte hasta ahora mencionado. Por lo anterior, se aprovecha la serie de ensayos en el dispositivo hidráulico (que se consignan en el



siguiente capítulo), para obtener el tirante máximo en diferentes condiciones de gasto y geometría, a las probadas, que permitan valorar el factor “ $F$ ” antes propuesto.

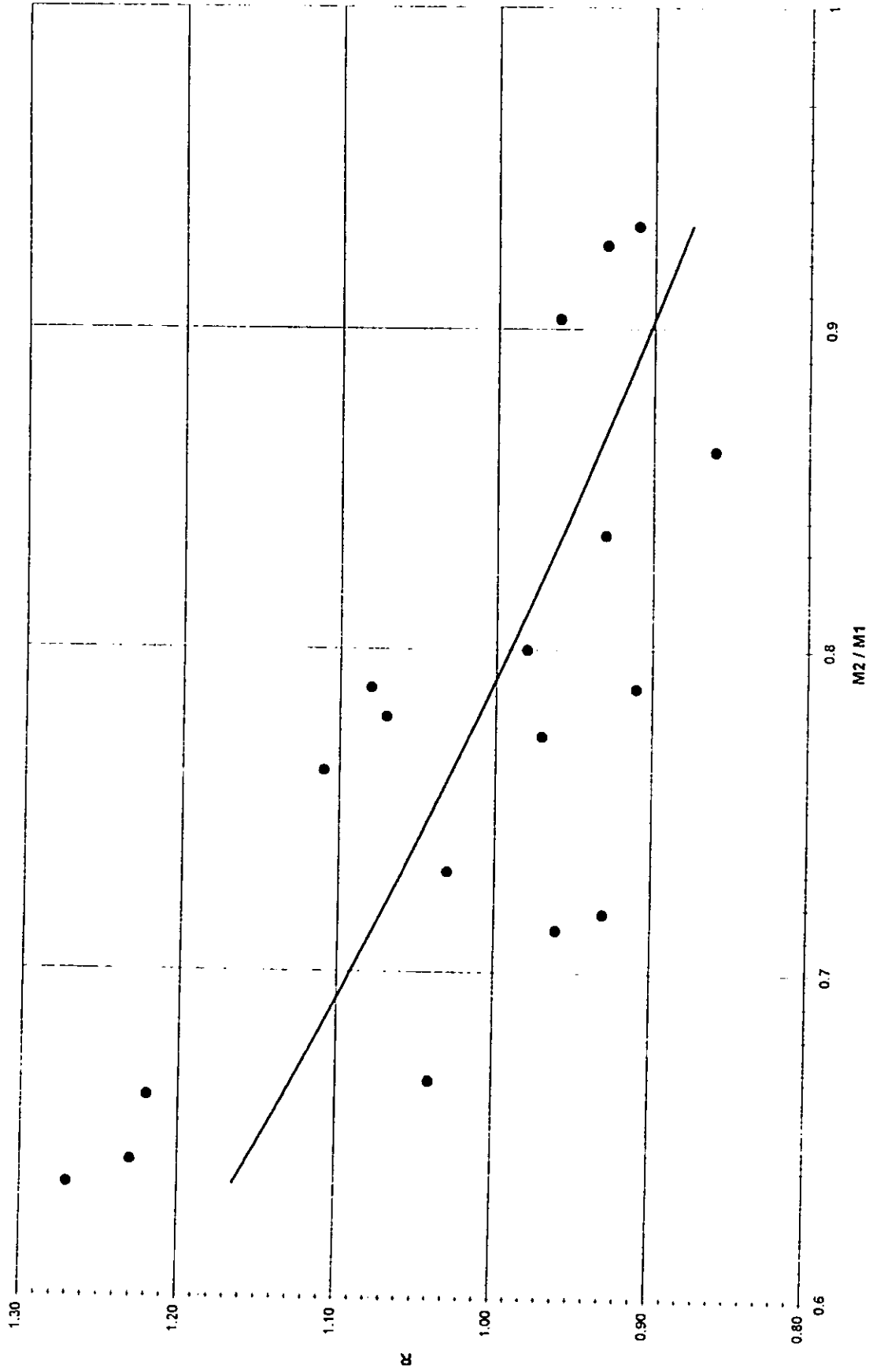
La figura 3.3 permite observar la manera en que se comportan los valores calculados en la tabla 3.3, la variación observada en los cálculos, obliga a que esté presente el factor “ $F$ ”, porque la ec. 3.11 es sólo una aproximación, pero deberá mejorar cuando se pueda medir con la precisión requerida a las variables que se considera interviene en el salto hidráulico.

Vale la pena decir, que la ecuación propuesta para valorar “ $F$ ” tiene buena respuesta, pues en promedio  $R \approx 1$ , ya que su rango de variación va de 0.86 a 1.27. Sin embargo, esto significa que aún la expresión 3.11 no es suficiente para explicar por sí sola la variación de “ $h$ ”, ya que de acuerdo con el equipamiento y metodología propuestos, sin embargo no es posible por ahora, hacer una proposición diferente.

Tabla 3.3. Cálculos para encontrar el ajuste en el valor de “ $F$ ” de la ec. 3.13.

Q (m <sup>3</sup> /s)	B (m)	k	R	M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub> (m)
0.019	0.335	0.5	1.04	0.667	0.145
0.019	0.335	1.0	1.03	0.731	0.145
0.019	0.335	1.5	0.98	0.800	0.145
0.010	0.335	0.5	0.96	0.713	0.110
0.010	0.335	1.0	0.97	0.773	0.110
0.010	0.335	1.5	0.93	0.836	0.110
0.010	0.150	0.5	1.22	0.662	0.175
0.010	0.150	1.0	1.08	0.788	0.175
0.010	0.150	1.5	0.93	0.926	0.175
0.019	0.150	0.5	1.23	0.642	0.190
0.019	0.150	1.0	1.07	0.779	0.190
0.019	0.150	1.5	0.91	0.932	0.190
0.015	0.335	0.5	0.93	0.718	0.135
0.015	0.335	1.0	0.91	0.788	0.135
0.015	0.335	1.5	0.86	0.862	0.135
0.015	0.150	0.5	1.27	0.635	0.170
0.015	0.150	1.0	1.11	0.762	0.170
0.015	0.150	1.5	0.96	0.903	0.170

Figura 3.3 Relación de R con M2 / M1



## CAPÍTULO CUATRO

### PRUEBAS EN EL MODELO

El diseño de tanques amortiguadores, parten de que el flujo en el tanque de sección trapecial preserva la simetría al inicio del salto hidráulico. El Manual de Obras Civiles de C.F.E. (1980), recomienda para hacer el diseño del tanque de sección trapecial; esto es: longitud, profundidad, geometría de los dientes, etc. que éste debe basarse en las normas que se siguen para un tanque de sección rectangular y adaptar esos valores a la geometría trapecial, con la salvedad de que en todos los casos deberá hacerse un estudio en modelo hidráulico del proyecto.

También se indica que la utilización de tanques amortiguadores de sección trapecial se propone a menudo cuando la economía favorece inclinar los recubrimientos laterales; señalan sin embargo que el funcionamiento hidráulico del salto en estas condiciones es poco eficiente y se requieren a menudo longitudes de tanque superiores a los rectangulares, y sugiere limitar la inclinación de los taludes a un máximo de 0.5:1.

Según Sánchez y Gracia (1995), la hipótesis de que el flujo es simétrico al inicio del tanque amortiguador de sección trapecial, no se cumple si el tirante en el tanque, resulta ser un poco menor que el calculado para el salto claro. Esta situación puede presentarse, si en la elaboración de la curva elevaciones - gastos del tramo del río aguas abajo de la descarga hay fallas. Y se agudiza el problema cuando se tienen secciones transversales con anchos de plantillas muy grandes y taludes muy inclinados.

Lo expresado respecto a la asimetría es relevante, pues depende del tipo de salto que se presenta, (a medida que éste es más ahogado la asimetría del flujo se atenúa). Esta es una razón por la que se diseñan controles con base en escalones, dientes o canales a contrapendiente o con su combinación para evitar que el salto se barra; es decir, se trata de incrementar la pérdida de energía para confinar el salto, aunque disminuya su eficiencia como disipador de energía, además de encarecer el proyecto original. En los diseños de los tanques de las presas Josefa Ortiz de Domínguez y Marte R. Gómez se han desarrollado estas soluciones.

En adición, es necesario recordar que la cota de la superficie del agua después del salto, que es un nivel fijo en la descarga determinado de la curva

elevaciones - gastos de esa zona, para el gasto de diseño, por lo que casi siempre se necesita que el fondo del tanque esté a una profundidad  $\Delta z$  debajo de ese nivel y garantizar de esta manera que el salto se confine a la longitud del tanque amortiguador. Con el fin de que tal profundidad no sea muy grande (porque perdería parte de la razón que justifica al tanque amortiguador de esta sección transversal y es reducir las excavaciones), se coloca un escalón sobre la cota fija de salida.

Ante cualquiera de estas situaciones, es necesario comprobar siempre en el laboratorio el funcionamiento hidráulico de los tanques amortiguadores de sección trapecial.

Conviene, por otra parte citar el trabajo de Berryhill (1957) que presentó, basado en el diseño, operación y mantenimiento de tanques amortiguadores en 150 proyectos realizados durante 25 años por el Cuerpo de Ingenieros, resumiendo las experiencias con disipadores de energía en prototipo, donde sugiere que todas las operaciones de los tanques fuesen reportadas; para que sirvieran en nuevos diseños de este tipo de obras.

Dentro de las recomendaciones que propone Berryhill (1957) para una adecuada operación de un tanque, se encuentra el hecho de evitar los trazos curvos en los canales de llamada y de descarga de dichas obras de excedencias.

Otro elemento muy importante, que no se ha incorporado al análisis anterior y que se encuentra presente en este problema de tanques amortiguadores es justamente el de la turbulencia, Hager (1992) lo presenta como uno de los puntos significativos del problema. El movimiento turbulento en un fluido es complejo y común en la naturaleza y en muchos de los problemas que enfrenta cotidianamente la ingeniería hidráulica.

El flujo turbulento obedece por una parte a las leyes fundamentales de conservación de masa y energía y por otra a las del movimiento de Newton. El método del volumen de control y las ecuaciones de continuidad y las de Navier Stokes son aplicables a flujo turbulento, pero son muy complejas de usar en problemas prácticos. En la actualidad, la mayoría de los cálculos ingenieriles del flujo turbulento se realizan con el método del volumen de control con correlaciones de datos experimentales para el esfuerzo cortante y la pérdida de energía, Gerhart (1995).

Se requiere de mucho trabajo experimental y analítico para desarrollar un modelo de ecuación diferencial soluble del flujo turbulento. Modelar la turbulencia es un tema dinámico para la investigación, más próxima a lo experimental y hasta el momento no abordado de forma analítica. Esta es una de las razones por las cuales a últimas fechas se ha rescatado la parte experimental en los laboratorios de Hidráulica en el mundo.

Los experimentos que hasta ahora se han llevado a cabo en un dispositivo de fondo fijo del Laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por Sánchez y Gracia (1995a), tienen el mérito de intentar explicar el flujo asimétrico a partir de un prototipo, a diferencia de las demás referencias consultadas en donde el objetivo es la generalización del fenómeno pero perdiendo la objetividad del resultado en el diseño.

Es conveniente aclarar que este dispositivo hidráulico no sigue la idea de generar tirantes conjugados menores a través de una compuerta deslizante con objeto de obtener diversos números de Froude como lo hacen la mayor parte de los estudios revisados; por el contrario responde al tipo de estructuras que se construyen en el país, por eso se trata de un dispositivo y no de un modelo a escala de una estructura en particular, con la idea de que los resultados sean de utilidad para el común denominador de estas obras llamadas tanques amortiguadores. En otras palabras, se sacrifica la posibilidad de ensayar un rango amplio de números de Froude por la idea de tener un dispositivo que involucre una obra realizada que tiene problemas de operación y que debe ser analizada para encontrar alguna justificación que trate de ayudar a explicar su comportamiento en la fase operativa. De esta forma se cambia el rango de tirantes conjugados mayores mediante la modificación de la posición de una compuerta abatible, instalada a la salida del tanque, lo que permite dar diversos valores a la *cantidad de movimiento aguas abajo*.

#### 4.1. Plan de ensayos

Los datos del modelo son los siguientes, el croquis de este dispositivo se muestra en la figura B.1 del apéndice B.:

- a) Canal de llegada:  
 $k = 1$  (talud)     $B = 0.335$  m (ancho)     $L = 1.09$  m (longitud)
- b) Rápida  
 $k = 1$  (talud)     $B = 0.335$  m (ancho)     $L = 1.50$  m (longitud)  
 $\Theta = 20^\circ$
- c) Tanque Amortiguador:  
 $k = 1$  (talud)     $B = 0.335$  m (ancho)     $L = 2.57$  m (longitud)  
 $h_{\text{talud}} = 0.25$  m

Es de interés recalcar el hecho de que las pruebas realizadas en las referencias señaladas en capítulos anteriores, no contemplaban la presencia de un escalón, que como se ha mencionado es una de las formas que se tienen para controlar el salto, situación que se ha intentado representar en las mediciones realizadas para este trabajo.

Es evidente que el fenómeno del salto hidráulico presenta infinidad de problemas difíciles de solucionar debido a las variables que intervienen. La comprensión del fenómeno, comportamiento, medición y la formulación de teorías requieren de un equipo de medición muy sofisticado, oneroso y difícil de adquirir. Aún en el caso de tenerlo, requiere de personal capacitado para su operación. Obviamente el tener equipos de precisión para medir las complejidades del problema descrito en varios artículos técnicos, ha permitido empezar a entender qué sucede en el fenómeno.

En este aspecto es relevante aclarar que el objetivo que se persigue en este trabajo se limita en proporcionar elementos teóricos que permitan de una manera sencilla al diseñador analizar su diseño; esto es, presentar recomendaciones adecuadas que basadas en los principios de la teoría de la Hidráulica, y viendo al fenómeno desde "afuera", logren anticipar el tirante máximo que se presenta dentro del tanque amortiguador y compararlo con el libre bordo propuesto para que el flujo no rebase ese límite.

#### 4.1.1. Variables a medir en pruebas por realizar

- a) El tirante conjugado menor  $Y_1$  y su posición (x) con el origen en la traza del cambio de pendientes y por convención positiva en el sentido del flujo,
- b) El ángulo de asimetría  $\alpha$ , esto es la traza de asimetría del flujo respecto a la perpendicular al eje del canal para esa condición; será por convención positivo, si se mide en el sentido de las manecillas del reloj y negativo en caso contrario.
- c) El tirante máximo que se forma dentro del tanque, denominado  $Y_M$ , y su posición en la sección transversal (x, y); la posición de "x" es igual a la señalada en el inciso a), mientras que "y" se tomará a partir del eje del canal, positivo hacia la derecha y negativo a la izquierda en el sentido del flujo.

#### 4.1.2. Instalaciones

El experimento para estudiar el salto hidráulico se llevó a cabo en el laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuenta con un sistema de bombeo que recicla el agua dentro del mismo y garantiza la dotación de un gasto constante al modelo mediante un tanque de carga constante. Toda vez que el agua bombeada

requerida por el modelo, se suministra a éste y el remanente regresa al cárcamo de bombeo.

Se tuvo especial cuidado en supervisar la geometría tanto de entrada como de salida, para que fuera lo más simétrica posible y se redujera así la presencia de efectos residuales al salto hidráulico.

#### 4.1.3. Equipo de medición

Respecto al equipamiento del modelo, aguas arriba a la zona de pruebas, se instaló un vertedor triangular de pared delgada, que para los propósitos de esta fase experimental y por la magnitud de los gastos que se manejan es de sección triangular con ángulo central de  $90^\circ$ , por lo que es aplicable la expresión de la Universidad Católica de Chile, Dominguez (1974) para encontrar el valor del coeficiente del gasto.

Al final del canal trapecial donde se hicieron las pruebas, se dispuso de un canal de sección rectangular de retorno al cárcamo de bombeo, y se colocó en su parte final una compuerta abatible que hace las veces del tirante en el río y permite reproducir la curva tirantes - gastos, que es un factor de importancia en el fenómeno.

Se instaló una estructura metálica para montar un limnómetro de punta que pudiese moverse tanto transversal como longitudinalmente en la zona de pruebas aprovechando las bermas del canal. Este dispositivo permitió medir el tirante máximo en el salto hidráulico  $Y_{A'}$  para cada ensayo.

Se construyeron 4 losas de 0.04 m de peralte removibles para adecuarlas a cada posición que se requiriera. Teniendo el cuidado de esperar el tiempo suficiente para garantizar la estabilidad del fenómeno antes de hacer las mediciones.

Finalmente, el ángulo de asimetría del flujo  $\alpha$  se midió por medio de un transportador, aprovechando la estructura construida para el limnómetro.

Las pruebas se comprobaban a intervalos de 5 a 10 minutos, el gasto de alimentación al modelo y el tirante que producía el abatimiento de la compuerta, y para la medición del tirante máximo en el salto se esperaron (una vez localizado el punto de incidencia) alrededor de 10 minutos para tomar en cuenta las fluctuaciones del tirante y tener hasta donde fuese posible la certeza de que efectivamente era el máximo.

## 4.2. Condiciones de pruebas realizadas en el dispositivo hidráulico

### 4.2.1. Condiciones de pruebas de la primera etapa

- 1) Se emplearon 2 gastos, uno de  $0.019 \text{ m}^3/\text{s}$  y otro de  $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$
- 2) Se controló el nivel de aguas abajo del tanque amortiguador con 2 posiciones de la compuerta, cuya diferencia entre ambas fue del orden de 10 a 15%.
- 3) Se probó sin control de salto y con escalón dentro del tanque amortiguador.
- 4) Finalmente, se propusieron tres posiciones de ubicación del escalón, a partir del término de la rápida, sin obedecer a una recomendación en particular de diseño

### 4.2.2. Condiciones de pruebas de la segunda etapa

- 1) Se emplearon 2 gastos, que son los mismos de la etapa anterior, es decir de  $0.019 \text{ m}^3/\text{s}$  y otro de  $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$
- 2) Se controló igualmente el nivel de aguas abajo del tanque amortiguador con 2 posiciones de compuerta, cuya diferencia de que entre ambas fue del orden de 10 a 15%.
- 3) Se probó sin control de salto y con escalón dentro del tanque amortiguador.
- 4) Finalmente se propusieron tres posiciones de ubicación del escalón, obedeciendo a la recomendación de diseño a partir del término de la rápida, que es de 4 a 5 veces el tirante conjugado mayor.

### 4.2.3. Objetivos de los ensayos de la primera etapa

Los objetivos de la primera etapa eran:

1. Comprobar la existencia del flujo asimétrico y la medición del ángulo correspondiente.
2. Identificar el efecto que el control (escalón ascendente) tiene sobre el fenómeno, reduciendo la asimetría, modificando el tirante máximo  $Y_M$ .
3. Medir el tirante máximo  $Y_M$  para ambos casos (sin y con control).



*En la Tabla 4.1 se muestran los datos y los resultados de las pruebas realizadas en la primera etapa.*

*A continuación se presenta una descripción de las pruebas de esta primera etapa, de acuerdo a sus objetivos.*

#### **Flujo asimétrico, medición del ángulo y efecto del escalón ascendente para $Q = 0.019 \text{ m}^3/\text{s}$ .**

Se logró verificar en el ensayo 1 para este gasto, la presencia de un flujo asimétrico de  $30^\circ$ . Esta asimetría se considera positiva de acuerdo con el sistema convenido anteriormente.

Se observó también que al comparar los ensayos 1 y 2, diferentes sólo en la reducción del tirante aguas abajo  $Y_3$ , de 0.145 m a 0.130 m, el salto se corrió +0.80 m (hacia aguas abajo).

Este corrimiento anterior detectado al disminuir el valor del tirante conjugado mayor, implica la necesidad de confinar el salto aumentando la pérdida de energía mediante un control.

En los ensayos 3 y 4, se colocó un control tipo escalón ascendente en la primera distancia propuesta (0.428 m), éste confina el problema para los dos tirantes propuestos y además hace que el salto se haga simétrico. Es de notarse que aunque ninguna de las tres distancias propuestas de ubicación del escalón está dentro de las recomendaciones de diseño para este tipo de obras civiles ( $L = 4 \text{ a } 5 Y_3$ ), interesaba en esta etapa determinar la influencia del escalón.

Para los otros ensayos 5 a 8 de este gasto, el flujo es asimétrico en todas las pruebas y tiende a aumentar a medida que se coloca el escalón a mayor distancia (0.928 m y 1.428 m), lo que implica que el escalón ya no tiene efecto.

Es de destacarse que en el ensayo 6, el flujo presenta una asimetría con ángulos iguales por ambos lados de tal forma que la sobreelevación se ubica al centro del canal. Obsérvese en la tabla 4.1 que no hay desplazamiento del tirante máximo  $Y_M$  del eje del canal, éste se presenta al centro. Se deduce que este era el tipo de salto hidráulico que relata Hsing (1937) en su segunda conclusión (pág. 7).

#### **Flujo asimétrico, medición del ángulo y efecto del escalón ascendente para $Q = 0.012 \text{ m}^3/\text{s}$ .**

En los ensayos 9 y 10 que corresponden a la condición sin escalón, el patrón de respuesta del salto fue el siguiente: se incrementó la asimetría al variar

de 30° a 52°, comparar ensayos 1 y 9 y de 55° a 60°, comparar ensayos 2 y 10; además de cambiar el sentido del ángulo de asimetría. Es decir el fenómeno que se estudia responde con rapidez a modificaciones, el gasto en este caso, que pareciera no fueran tan diferentes.

En los siguientes ensayos para este gasto 11 a 16, es preciso asentar que existe simetría del flujo para las pruebas 11 y 12 ante la presencia del escalón en su posición más cercana al origen establecido, y al disminuir el gasto, su efecto se ve reflejado en el corrimiento del tirante conjugado menor, que también se reduce (+0.065 m), respecto de (+0.265m).

Para la segunda posición del escalón (0.928 m), conservando el gasto y modificando sólo las condiciones de la posición de la compuerta abatible previamente establecidas para reducir  $Y_3$  de 0.145 m a 0.130 m, la tendencia de asimetría del flujo en términos generales es de incrementarse, pues pasa de 31° a 56° y de 30°, -30° a 58°, -57° comparando los ensayos 5 con el 13 y 6 con el 14, lo que mueve a considerar que no hay efecto del escalón dada la lejanía de este control.

Se destaca la prueba 14 que junto con la 6 dieron como resultado una asimetría en ambas márgenes del canal, cuyas trazas se alcanzaban prácticamente al centro del canal, aunque en esta última prueba el hecho de tener un grado de diferencia en el ángulo de asimetría hizo que el tirante máximo  $Y_M$  se sesgara a la derecha.

Respecto a las últimas pruebas 15 y 16, donde el control está en la tercera posición (1.428 m), los patrones de flujo son parecidos, el escalón no tiene influencia.

#### Tirante máximo $Y_M$ para $Q = 0.019 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$

Los ensayos comparables de esta primera etapa con relación a los trabajos desarrollados por Sánchez y Gracia (1995a), corresponden a las pruebas: 1, 2, 9 y 10 dado en que los 12 ensayos restantes se colocó un control tipo escalón que no fue probado en el mencionado trabajo.

Se puede concluir que no existe una discrepancia significativa de los valores medidos experimentalmente con los obtenidos con ese criterio, las Tablas 3.1 y 3.2, consignan ese hecho.

La presencia del escalón, reduce levemente el valor de  $Y_M$ , pero si influye decisivamente en confinar y estabilizar el fenómeno. El carácter pulsante del mismo, como se mencionó anteriormente sigue estando presente pero con menor intensidad.

#### 4.2.4. Objetivos de los ensayos de la segunda etapa

Para esta segunda etapa, los objetivos fundamentales eran:

1. Comprobar que de acuerdo a la teoría, si hay simetría en el flujo cuando el salto es claro.
2. Observar y medir el comportamiento del flujo al ubicar el escalón dentro de las recomendaciones de diseño: 4, 4.5 y 5 veces el tirante conjugado mayor para los gastos de 0.019 y 0.012 m<sup>3</sup>/s.
3. Medir el tirante máximo  $Y_{1c}$  para ambos casos (sin y con control).

*En la Tabla 4.2 se muestran los datos y los resultados de las pruebas realizadas en la segunda etapa.*

*A continuación se presenta una descripción de las pruebas de esta segunda etapa, de acuerdo a sus objetivos.*

#### **Flujo asimétrico, medición del ángulo y efecto del escalón ascendente para $Q = 0.019 \text{ m}^3/\text{s}$ .**

Se partió de la función "*cantidad de movimiento*" para sección trapezoidal con ayuda del paquete Mathcad (ver apéndice A), para obtener los conjugados mayor y menor, con base en esos valores se hicieron los ensayos correspondientes.

La prueba 17 de esta segunda etapa sin escalón, confirmó que efectivamente al imponer los valores obtenidos teóricamente se lograba la simetría del flujo.

Al modificar el conjugado mayor  $Y_3$  a la posición de 0.145 m, ensayo 18 coincidentemente correspondía al ensayo 1, se repitió el patrón registrado para ese ensayo. Esto implica que mientras el conjugado menor se corrió sólo 0.11 m en el sentido contrario a la corriente, la asimetría pasó de 0° a 30°.

Es decir, que conservar el fenómeno sin control en un tanque amortiguador expuesto sólo a que se cumplan las condiciones teóricas para su adecuado funcionamiento, es un alto riesgo que debe evitarse.

Ampliando el comentario anterior, al presentar el escalón a 4, 4.5 y 5 veces el tirante conjugado mayor teórico, se tiene que efectivamente para los ensayos 19, 21 y 23 existe simetría en el frente del salto hidráulico, presentándose un pequeño porcentaje de ahogamiento en el tirante conjugado menor.

Al disminuir  $Y_3$ , el flujo se vuelve asimétrico, confirmando con ello una de las conclusiones de Sánchez y Gracia (1995a), con ángulos de  $53^\circ$ ,  $62^\circ$  y  $61^\circ$  para los ensayos 20, 22 y 24. Obsérvese que no hay aumento apreciable de la asimetría entre la segunda y tercera posición del escalón.

En resumen, de las pruebas correspondientes a los ensayos 17 a 24, con el gasto de  $0.019 \text{ m}^3/\text{s}$  con las condiciones de tirantes obtenidas del desarrollo teórico, el salto hidráulico es simétrico para las cuatro pruebas 17, 19, 21 y 23 en las cuales se mantuvo el tirante  $Y_3$  de aguas abajo en  $0.171 \text{ m}$  que correspondía a la condición de salto claro y se trabajó sin y con control ascendente en las tres posiciones señaladas en la tabla 4.2.

Sin embargo para el mismo gasto y variando sólo el tirante conjugado mayor  $Y_3$ , haciéndolo menor al anterior (de  $0.171 \text{ m}$  a  $0.145 \text{ m}$ ), para las pruebas 18, 20, 22 y 24, se presentó la asimetría que va incrementándose a medida que el escalón se encuentra más alejado de la traza del cambio de pendientes, desde  $30^\circ$  hasta  $62^\circ$ .

#### **Flujo asimétrico, medición del ángulo y efecto del escalón ascendente para $Q = 0.012 \text{ m}^3/\text{s}$ .**

Al modificar el gasto a  $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$ , se confirmó la presencia del flujo simétrico al fijar la posición de la compuerta abatible de aguas abajo con el tirante conjugado mayor ( $Y_3 = 0.138 \text{ m}$ ), resultante del cálculo teórico para la condición sin control, ensayo 25; este patrón de simetría se conservó sólo para la primera posición de la losa de control, a  $0.70 \text{ m}$  de la terminación de la rápida, ensayo 27.

Para los ensayos 26 y 28 sólo diferente a los anteriores al modificar el tirante conjugado mayor a un valor menor al teórico ( $0.138 \text{ m}$  a  $0.117 \text{ m}$ ), existe para ambas pruebas una asimetría importante de  $61^\circ$  y  $56^\circ$ , respectivamente, aún cuando para el ensayo 28 se conserva el escalón en la primera posición ( $0.70 \text{ m}$ ).

Para las restantes pruebas 29 a 32, independientemente del tirante aguas abajo ( $Y_3 = 0.138 \text{ m}$  ó  $0.117 \text{ m}$ ) y de la posición del escalón ascendente ( $0.80 \text{ m}$  ó  $0.90 \text{ m}$ ), siempre existió asimetría. Es conveniente aclarar que en realidad puede resultar engañosa esta información pues sólo la primera posición del escalón corresponde a la recomendada para diseño, ya que las otras dos que corresponden a los ensayos 29, 30, 31 y 32 se ubican más lejos de ella, teniendo como resultado que el flujo se haga asimétrico con ángulos mayores de  $53^\circ$ .

Lo anterior es importante para fines operativos pues una modificación del nivel del agua en el río para una posición fija de escalón con un gasto menor hace que el flujo sea asimétrico. La justificación de dejar la misma posición de los controles para dos gastos diferentes obedece de hecho a que en una obra hidráulica el diseño se hace para un gasto y se observa cómo funciona para un rango de gastos menores que el de diseño.

#### **Tirante máximo $Y_M$ para $Q = 0.019 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$**

Se destaca que el valor del tirante máximo  $Y'_{uv}$  (0.209 m) es mayor que el conjugado mayor teórico  $Y_3$  (0.171 m), como se observa en el ensayo 17; al disminuir el tirante  $Y_3$  en la prueba 18, el valor del tirante en estudio  $Y'_{uv}$  se incrementa de 0.209 m a 0.2248 m lo cual es importante dada la posibilidad de algún cambio en la curva elevaciones – gastos aguas abajo.

Por otra parte el tirante  $Y'_{uv}$  se mantiene muy parecido para las pruebas 19, 21 y 23 cuyos valores son (0.1965 m, 0.1913 m y 0.196 m) respectivamente; además para las primeras dos posiciones de la losa del control, la ubicación del tirante máximo en los ensayos 19 y 21 está más cerca del origen que en el ensayo 17 con valores de 0.25 m y 0.285 m con respecto a 0.335 m; sin embargo para el ensayo 23 ya hay un desplazamiento importante del tirante máximo  $Y'_{uv}$  (0.395 m).

También para esta segunda etapa, los valores teóricos de los tirantes máximos consignados en la tabla 3.2, difieren en menos del 10% respecto a los medidos en las pruebas para estas nuevas condiciones, ensayos 17, 25 y 26.

#### **4.3 Síntesis de aspectos sobresalientes de las pruebas**

Pretender conservar confinado el salto hidráulico en un tanque amortiguador trapecial sin control alguno, expuesto sólo a que se cumplan las condiciones teóricas para su adecuado funcionamiento, es un alto riesgo que debe evitarse. El corrimiento observado en diversos ensayos lo confirma.

Al disminuir  $Y_3$ , el flujo se vuelve asimétrico, confirmando con ello una de las conclusiones de Sánchez y Gracia (1995a), (pág. 13).

Conviene destacar que existe mayor discrepancia en los valores medidos del ángulo de asimetría cuando la variación de gastos se reduce para la misma posición del tirante conjugado mayor  $Y_3$ .

Al presentar el escalón a 4, 4.5 y 5 veces el tirante conjugado mayor teórico  $Y_3$ , (segunda etapa), de acuerdo con las recomendaciones de diseño, existe

simetría en el frente del salto hidráulico, incluso al reducir el gasto y sólo para la primera posición de la segunda etapa, presentándose un pequeño porcentaje de ahogamiento en el tirante conjugado menor  $Y_1$ . De ahí la importancia de la posición del escalón y de mantenerlo lo más cerca posible de la traza del inicio del tanque amortiguador.

Al referirse a las pruebas de la segunda etapa cuando se redujo el gasto de  $0.019 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$ , independientemente del tirante aguas abajo ( $Y_2 = 0.138 \text{ m}$  ó  $0.117 \text{ m}$ ) y de la posición del escalón ascendente segunda o tercera ( $0.80 \text{ m}$  ó  $0.90 \text{ m}$ ), siempre existió asimetría.

Ante la dificultad en el dispositivo de pruebas de modificar el diseño para cada gasto, es conveniente aclarar la aseveración del párrafo anterior que puede resultar engañosa pues sólo la primera posición del escalón corresponde a la recomendada para diseño al reducir el gasto.

La justificación de dejar la misma posición de los controles para dos gastos diferentes obedece de hecho a que en una obra hidráulica se hace para un gasto de diseño y se observa cómo funciona para un intervalo de gastos menores y más frecuentes que el de diseño.

Finalmente, se consignan en el apéndice B, diversas fotografías del salto hidráulico antes de las mediciones realizadas, de algunos de los ensayos llevados a cabo en este trabajo que se considera ilustran la problemática del fenómeno.

Tabla 4.1. Resultados de los ensayos realizados en el modelo hidráulico del tanque amortiguador de sección trapecial ( Primera Etapa )

E	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	B (m)	k	$Y_3$ (m)	Escalón	$\alpha$	$Y_M$ (m)	x de $Y_M$ (m)	y de $Y_M$ (m)	$Y_1$ (m)	x de $Y_1$ (m)
1	0.019	0.33	1:1	0.145	s/e	+30	0.2248	+0.565	+0.095	0.0187	0.000
2	0.019	0.33	1:1	0.130	s/e	+55	0.2064	+1.542	+0.075	0.0228	0.800
3	0.019	0.33	1:1	0.145	90° c/e a 0.428 m	0	0.2249	+0.504	0	0.0186	0.000
4	0.019	0.33	1:1	0.130	90° c/e a 0.428 m	0	0.2138	+0.482	0	0.0196	+0.040
5	0.019	0.33	1:1	0.145	90° c/e a 0.928 m	-31	0.1996	+0.629	-0.087	0.0181	0.000
6	0.019	0.33	1:1	0.130	90° c/e a 0.928 m	+50, -50	0.2020	+0.986	0	0.0211	+0.603
7	0.019	0.33	1:1	0.145	90° c/e a 1.428 m	-38	0.1996	+0.629	-0.087	0.0188	+0.100
8	0.019	0.33	1:1	0.130	90° c/e a 1.428 m	-57	0.1979	+1.200	-0.087	0.0194	+0.725
9	0.012	0.33	1:1	0.110	s/e	-52	0.1738	+0.428	-0.079	0.0124	0.000
10	0.012	0.33	1:1	0.099	s/e	-60	0.1590	+0.661	-0.069	0.0132	+0.265
11	0.012	0.33	1:1	0.110	90° c/e a 0.428 m	0	0.1618	+0.454	0	0.0128	0.000
12	0.012	0.33	1:1	0.099	90° c/e a 0.428 m	0	0.1588	+0.497	0	0.0131	+0.065
13	0.012	0.33	1:1	0.110	90° c/e a 0.928 m	+56	0.1594	+0.590	+0.022	0.0124	+0.330
14	0.012	0.33	1:1	0.099	90° c/e a 0.928 m	+58, -57	0.1675	+0.901	+0.031	0.0138	+0.595
15	0.012	0.33	1:1	0.110	90° c/e a 1.428 m	+54	0.1735	+0.836	+0.079	0.0127	+0.193
16	0.012	0.33	1:1	0.099	90° c/e a 1.428 m	+56	0.1720	+1.125	+0.030	0.0137	+0.729

E = Número del ensayo

k = talud del canal

$Y_M$  = tirante máximo

$Q$  = gasto en el dispositivo

$Y_3$  = tirante conjugado mayor

$Y_1$  = tirante conjugado menor

B = ancho del canal

$\alpha$  = ángulo de asimetría

Tabla 4.2. Resultados de los ensayos realizados en el modelo hidráulico del tanque amortiguador de sección trapecial (segunda etapa)

E	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$B$ (m)	$k$	$Y_3$ (m)	Escalón	$\alpha$	$Y_M$ (m)	$x$ de $Y_M$ (m)	$y$ de $Y_M$ (m)	$Y_1$ (m)	$x$ de $Y_1$ (m)
17	0.019	0.33	1:1	0.171	s/e	0	0.2090	+0.335	+0.016	0.0202	-0.11 (*)
18	0.019	0.33	1:1	0.145	s/e	+30	0.2248	+0.565	+0.095	0.0187	0
19	0.019	0.33	1:1	0.171	90° c/e a 0.70 m	0	0.1965	+0.250	+0.005	0.0212	-0.115 (*)
20	0.019	0.33	1:1	0.145	90° c/e a 0.70 m	-53	0.1767	+0.505	+0.035	0.0173	+0.155
21	0.019	0.33	1:1	0.171	90° c/e a 0.80 m	0	0.1913	+0.285	+0.003	0.0214	-0.115 (*)
22	0.019	0.33	1:1	0.145	90° c/e a 0.80 m	+62	0.1875	+0.491	+0.025	0.0187	+0.190
23	0.019	0.33	1:1	0.171	90° c/e a 0.90 m	0	0.1960	+0.395	+0.025	0.0216	-0.115 (*)
24	0.019	0.33	1:1	0.145	90° c/e a 0.90 m	-61	0.1872	+0.495	+0.025	0.0187	+0.130
25	0.012	0.33	1:1	0.138	s/e	0	0.1656	+0.250	0	0.0149	-0.065 (*)
26	0.012	0.33	1:1	0.117	s/e	+61	0.1566	+0.410	+0.077	0.0151	+0.055
27	0.012	0.33	1:1	0.138	90° c/e a 0.70 m	0	0.1573	+0.165	+0.055	0.0140	-0.115 (*)
28	0.012	0.33	1:1	0.117	90° c/e a 0.70 m	+56	0.1422	+0.395	+0.032	0.0152	+0.085
29	0.012	0.33	1:1	0.138	90° c/e a 0.80 m	+53	0.1568	+0.245	+0.075	0.0142	-0.080 (*)
30	0.012	0.33	1:1	0.117	90° c/e a 0.80 m	-56	0.1537	+0.405	+0.074	0.0153	+0.085
31	0.012	0.33	1:1	0.138	90° c/e a 0.90 m	+61	0.1571	+0.340	+0.097	0.0155	-0.070 (*)
32	0.012	0.33	1:1	0.117	90° c/e a 0.90 m	+60	0.1506	+0.425	-0.072	0.0153	+0.095

(\*) Ahogado

$E$  = Número del ensayo

$k$  = talud del canal

$Y_M$  = tirante máximo

$Q$  = gasto en el dispositivo

$Y_3$  = tirante conjugado mayor

$Y_1$  = tirante conjugado menor

$B$  = ancho del canal

$\alpha$  = ángulo de asimetría



## CAPÍTULO CINCO

### REVISIÓN DE DOS CASOS REALES

De acuerdo con la investigación teórica y la experimental se hizo un análisis del alcance de los resultados, aplicado a dos presas que han sido construidas en México, y tienen tanques amortiguadores de sección trapezoidal, uno de ellos corresponde a la presa Josefa Ortiz de Domínguez en el Estado de Sinaloa y otro a la Marte R. Gómez en el Estado de Tamaulipas; en el primer caso existe flujo asimétrico, el tanque tiene un talud 1:1 y en el segundo no existe este problema no obstante tener un talud más tendido 1.5:1.

#### **5.1 Primer caso, tanque amortiguador de la presa Josefa Ortiz de Domínguez (El Sabino), Sinaloa.**

##### **Breve Descripción**

##### Obra de control y excedencias de la Presa Josefa Ortiz de Domínguez

Se encuentra alojada en la margen derecha, en el extremo de la cortina. Es una estructura de concreto, formada por un cimacio vertedor con 3 compuertas radiales que se apoyan en el perfil del cimacio y quedan alojadas entre las pilas y los muros extremos desplantados sobre el cimacio. El vertedor descarga a una rápida que termina en un tanque amortiguador. Ver apéndice C, planos C.1, C.2 y C.3.

Avenida de diseño: 5,000 m<sup>3</sup>/s

Longitud de cresta: 27 m

Capacidad máxima de descarga: 1,870 m<sup>3</sup>/s para una carga de 12.15 m

##### ***Características generales de las diferentes partes que componen la obra de control y excedencias:***

Estructura de compuertas. Está constituida por 2 pilas de concreto reforzado de 1.80m de espesor, 27.80 m de longitud y 11 m de altura y 2 muros extremos de la misma altura, con 1.80 m de espesor, alojándose 3 compuertas

radiales de operación automática, con las cuales se efectúa el control de las descargas.

Compuertas. Se tienen 3 compuertas radiales de 9.00 m de ancho por 11.00 m de alto, operadas desde un puente de maniobras por medio de mecanismos eléctricos.

Cimacio. Es de concreto simple con perfil Creager. Su cresta se encuentra a la elevación 99.00 m y la liga con la rápida a la elevación 93.872 m

Canal de descarga. Es una rápida de 30.60 m de ancho de plantilla, taludes 1:1 y pendiente  $s = 0.05$ , continuando con una caída de perfil parabólico, con longitud de 107.00 m provisto de un amplio sistema de drenaje.

Tanque amortiguador. Está localizado al pie de la caída, tiene 30.60 m de ancho de plantilla, 4.00 m de profundidad y 50.00 m de longitud en el fondo con taludes 1:1, revestidos de concreto. Existen dos líneas de deflectores dentados de concreto reforzado la primera al pie de la caída y la segunda a 15.00 m aguas abajo de éstos.

### 5.1.1. Cálculo del tirante $Y_{MM}$ en el tanque amortiguador.

De los datos recabados para esta estructura, para el gasto de diseño, se tiene una velocidad de 23 m/s al inicio del tanque amortiguador. De esta manera el área hidráulica para esta condición es:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{1870}{23} = 81.304 \text{ m}^2$$

El tanque tiene una geometría trapecial, en la que el área se expresa de la siguiente manera:  $A = B*Y + k*Y^2$  ; al sustituir valores se tiene:

$$81.304 \text{ m}^2 = 30.6 \text{ m} * Y + 1 * Y^2, \text{ resolviendo para } Y \text{ se obtiene:}$$

$$Y = 2.459 \text{ m que es el conjugado menor} = Y_1$$

Ahora, al aplicar la función cantidad de movimiento para la sección al inicio del tanque amortiguador para la sección trapecial,

$$M_1 = \frac{B*Y_1^2}{2} + \frac{k*Y_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(B*Y_1 + k*Y_1^2)}$$

se obtiene como respuesta

$$M_1 = 4,482.385 \text{ m}^3$$

al asignar el parámetro  $Y_3$  al conjugado mayor, se deberá cumplir la función *cantidad de movimiento* al inicio y al final del fenómeno ( $M_1 = M_3$ ) para que haya salto hidráulico claro, de tal manera se podrá plantear así :

$$M_1 = \frac{B \cdot Y_3^2}{2} + \frac{k \cdot Y_3^3}{3} + \frac{Q^2}{g(B \cdot Y_3 + k \cdot Y_3^2)}$$

el valor del conjugado mayor es  $Y_3 = 14.00$  m

Es decir que este tirante conjugado mayor  $Y_3$  referido al nivel de la plantilla del tanque amortiguador (71.00 m) tiene la elevación de 85.00 m (apéndice C). Si por alguna circunstancia el nivel es menor a éste, entonces se producirá un salto barrido y consecuentemente habrá asimetría en el fenómeno.

Se propone de acuerdo a la metodología encontrada un valor de  $Y_2$  que sea menor al tirante conjugado mayor  $Y_3$  en 15 %, y resulta ser de 11.9 m, lo que permite calcular la *cantidad de movimiento* para este nuevo valor,  $M_2 = 3.433.173$  m<sup>3</sup> que obviamente es menor que  $M_1$ .

Lo anterior permite obtener la relación que hay entre ambos valores de la manera siguiente:

$$\frac{M_2}{M_1} = 0.7659$$

Con este valor se recurre a la figura 3.3, pág. 27 y se obtiene el valor de  $R$ , que es de 1.02, por lo que al emplear la ec. 3.13, da por conclusión el valor de  $Y_{MM} = 17.078$  m, que representa el valor máximo del tirante al producirse el flujo asimétrico, esto es 88.078 m, referido a la cota de la plantilla. El plano consultado no muestra la cota de las bermas ni la precisión en las curvas de nivel para poder decir que el valor de  $Y_{MM}$  se sale del tanque amortiguador.

Es de observarse en el plano C.3, que existe un control tipo escalón ascendente localizado a 50 m (menor a la recomendación de diseño que es de 4 a 5 veces  $Y_3$ ) con una altura de 4 m mismo que termina hasta la conexión al río Álamos; es decir a la elevación 75.00 m. Además de que existe una hilera de dentellones al término de la rápida y de blocks dentro del tanque amortiguador.

Por lo que se podría concluir que el problema en el tanque amortiguador de esta presa obedece a alguna diferencia significativa en la curva elevaciones - gastos del río, lo que origina un tirante conjugado mayor que sea menor al teórico (salto claro), promoviendo de esta manera la asimetría.

### 5.1.2. Longitud total del salto

Si se quisiera saber según el criterio de Hager y Wanoschek (1989) la longitud total del salto hidráulico, se utilizan los parámetros siguientes como criterio de diseño:

$$\text{Se define un parámetro } M = \frac{B}{(k * Y_1)}$$

donde

$k$  , talud (adimensional )

$Y_1$  , tirante conjugado menor (m)

$B$  , ancho de la base (m)

sustituyendo valores,

$$\text{si } k = 1, \quad Y_1 = 2.459 \text{ m} \quad B = 30.6 \text{ m}$$

$$\text{entonces } M = \frac{30.6}{(1 * 2.459)} = 12.45$$

el número de Froude para el régimen supercrítico es  $F_1 = 4.35$

De la Figura 5.1.(a) y (b), Wanoschek y Hager (1989), se extrapolan los valores dado que el valor máximo que aparece en la figura es para  $M = 10$ , para obtener longitudes superficiales se tiene:

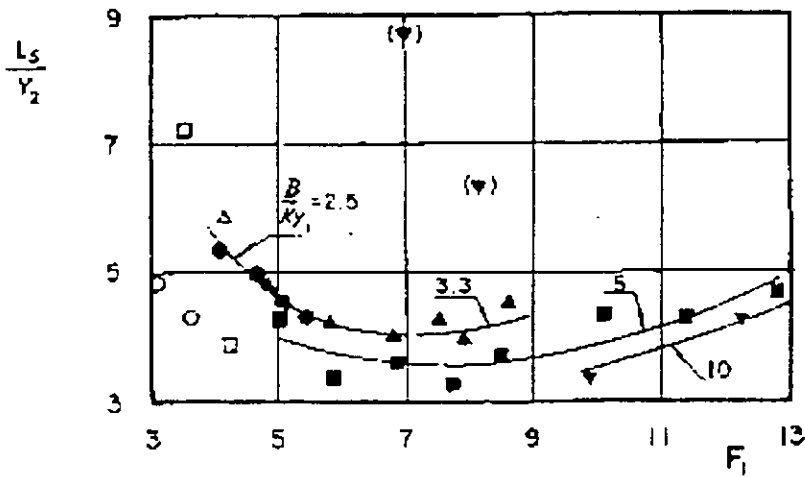
a)  $\frac{L_r}{Y_2} = 2$ , así  $L_s = 2 * 14.00 \text{ m} = 28.00 \text{ m}$ , donde  $L_s$  es la longitud de la corriente lateral de retorno.

b)  $\frac{L_r}{Y_2} = 4.3$ , así  $L_J = 4.3 * 14.00 \text{ m} = 60.20 \text{ m}$ , donde  $L_J$  es la longitud relativa del salto.

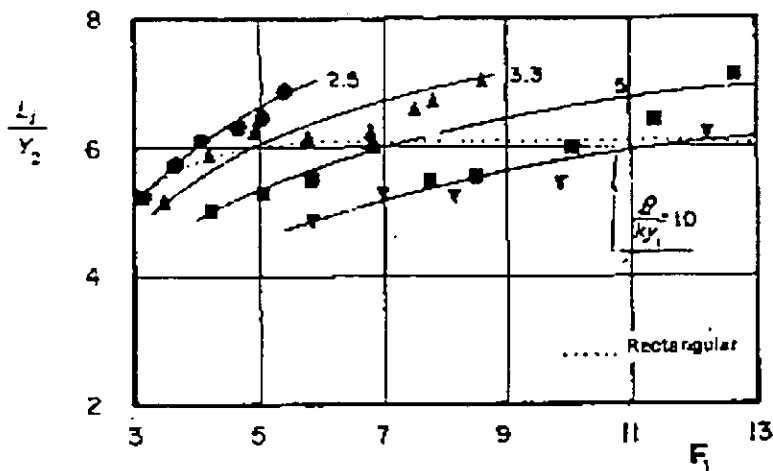
donde  $Y_2$  es en este caso el tirante conjugado mayor.

Así, la longitud total del salto en el canal trapecial es de 88.20 m según esta teoría, al consultar los planos el tanque inicia en el cadenamiento 0+480.44 y termina el revestimiento en 0+590.44, es decir 110.00 m, que de acuerdo a este criterio resulta sobrado, pero se debe apuntar que para este caso hay una hilera

de dientes y una hilera de blocks dentro del tanque y un escalón ascendente al final, que inducen mayores pérdidas de energía y permitieron reducir la longitud.



a) Longitud de la corriente lateral de retorno



b) Longitud relativa del salto

Figura 5.1 (a) y (b). Longitudes relativas de un salto en canal trapecial según Wanoschek y Hager (1989)

## 5.2. Segundo caso, tanque amortiguador de la presa Marte R. Gómez (El Azúcar), Tamaulipas

### Breve Descripción

#### Obra excedencias de la Presa Marte R. Gómez

Se encuentra situada en la margen izquierda, en el extremo de la cortina. Es del tipo de vertedor de abanico de cresta libre con cimacio perfil de arcos

similares con planta en curva, constituida por un arco de 3 centros y con descarga por una rápida a un tanque amortiguador de energía y a un canal de desagüe.

El diseño original de la obra de excedencias incluía las instalaciones de 9 grandes compuertas Stoney deslizantes de 15.24 m por 15.24 m c/u, que fueron adquiridas en Alemania, pero el estallamiento de la 2a. Guerra Mundial impidió que fueran entregadas oportunamente.

Avenida de diseño: 21,000 m<sup>3</sup>/s

Longitud de la cresta libre: 300 m

Capacidad máxima de descarga: 13,000 m<sup>3</sup>/s para  $h_{\text{máx}} = 6.70$  m

***Características generales de las diferentes partes que componen la obra de excedencias:***

Cimacio. Tiene 18.30m de altura (de la elevación 58.00 m a la 76.30 m) está provisto aguas arriba de un dentellón de concreto de 10 m de profundidad. Su cresta está a la elevación 76.30 m

Canal de descarga y tanque amortiguador. Al pie del cimacio se tiene una plataforma horizontal que se une por medio de una rápida con pendiente 4:1, revestida de concreto reforzado, a un tanque amortiguador de 50 m de ancho de plantilla y 146 m de longitud, también revestido de concreto, provisto en su extremo de aguas abajo de un umbral deflector. La estructura se continua aguas abajo, en un canal de descarga que conduce al cauce del río San Juan.

**5.2.1. Cálculo del tirante  $Y_{MM}$  en el tanque amortiguador**

Aplicando Bernoulli entre el embalse y la entrada al del tanque amortiguador con objeto de encontrar el tirante conjugado menor y de ahí el Número de Froude, se tiene:

$$6.7 + 39.5 = Y_1 + \frac{V_1'^2}{2 * g} = Y_1 + \frac{Q^2}{2 * g * A_1^2} = 46.2$$

$$Y_1 + \frac{13,000^2}{19.62(50 * Y_1 + 1.5 * Y_1^2)^2} = 46.2$$

$$Y_1 + \frac{8,613,659}{(50 * Y_1 + 1.5 * Y_1^2)^2} = 46.2$$

cuya solución  $Y_1 = 7.686$ m, es el conjugado menor.

Ahora, al aplicar la cantidad de movimiento para la sección al inicio del tanque amortiguador para la sección trapezoidal,

$$M_1 = \frac{B \cdot Y_1^2}{2} + \frac{k \cdot Y_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g(B \cdot Y_1 + k \cdot Y_1^2)}$$

se obtiene como respuesta

$$M_1 = 96.756.73 \text{ m}^3$$

al asignar el parámetro  $Y_1$  al conjugado mayor, para calcularlo se deberá cumplir la *cantidad de movimiento* ( $M_1 = M_3$ ), luego hay salto hidráulico claro, se podrá plantear así:

$$M_1 = \frac{B \cdot Y_3^2}{2} + \frac{k \cdot Y_3^3}{3} + \frac{Q^2}{g(B \cdot Y_3 + k \cdot Y_3^2)}$$

cuya respuesta es el conjugado mayor  $Y_3 = 43.356 \text{ m}$

De la consulta de los planos C.5 y C.6 del apéndice C, la plantilla del tanque amortiguador se ubica a la elevación 37.00 m, de tal manera que el tirante conjugado mayor para el salto claro deberá tener para el gasto de diseño una elevación de 80.356 m, el tanque tiene un escalón ascendente en su parte terminal de 6.00 m que ubica una primera plataforma a la elevación 43.00 m, posteriormente hay un tramo de canal a contrapendiente 4:1 que lleva el nivel de la plantilla hasta la cota 61.00 m. Estos dos controles permiten que en la parte terminal de la estructura se asegure un buen ahogamiento.

De acuerdo a la metodología propuesta en este trabajo, se calcula la función cantidad de movimiento para un tirante  $Y_2$  cuyo valor sea también un 15% menor al del tirante conjugado mayor; esto es, 36.85 m y entonces  $M_2 = 70.564.943 \text{ m}^3$ .

Lo anterior permite obtener la relación que hay entre ambos valores:

$$\frac{M_2}{M_1} = 0.729$$

Con este valor se consulta la figura 3.3, de la pág. 27 y se obtiene el valor de 1.06 para  $R$ , por lo que al emplear la ec. 3.13, se obtiene el valor de  $Y_{MM} = 52.465 \text{ m}$ .

Este valor encontrado, referido a la plantilla del tanque amortiguador da una

elevación de 89.465 m, que rebasaría la cota de la berma del tanque que es la 81.00 m, lo cual no ocurre. Seguramente dentro de las razones que impiden se forme un salto hidráulico asimétrico, se encuentran los controles tipo escalón ascendente y un canal a contrapendiente.

Cabe hacer mención que en los reportes encontrados (Sánchez, 1979) era hasta esas fechas el segundo vertedor con mayor frecuencia de operación a nivel nacional. Como dato se cita que en los primeros 19 años de servicio de esta presa en 14 de ellos ha operado el vertedor.

Otra de las razones que pudiesen pensar mejora el funcionamiento hidráulico de este segundo caso es el tipo de obra de excedencias, que es un vertedor de abanico, pues mientras en el vertedor de la presa Josefa Ortiz de Domínguez se tiene un flujo recto con presencia de ondas cruzadas en la rápida, en este caso el flujo es radial descargando a un canal de descarga y de ahí al tanque amortiguador que incluso tiene un talud más tendido (1.5:1) y de acuerdo a las características del flujo debiese ser más conflictivo que el caso anterior.

### 5.2.2. Longitud total del salto

Si se quisiera conocer de acuerdo al criterio de Hager y Wanoschek (1989) la longitud total del salto hidráulico, para este tanque amortiguador de la presa Marte R. Gómez, no es posible su empleo debido a que su estudio se limitó a taludes 1:1 en el canal.

COPIA  
SIN  
FIRMAR  
Y  
SIN  
FECHA



## CAPÍTULO SEIS

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Búsqueda de planos y memorias de cálculo

Lamentablemente, existe pérdida de información técnica tanto de las memorias de cálculo como de planos de las obras hidráulicas hechas en México. Se deberá hacer un esfuerzo por recuperarlas o en las futuras, documentarlas ampliamente; esto permitirá hacer el seguimiento de ellas, para tener la certeza de cómo funcionan respecto a su diseño original, además de las experiencias que se tendrían con esa información al ser de hecho un laboratorio hidráulico en prototipo.

Lo anterior permitiría establecer, por ejemplo, en casos como los que aquí se mostraron, cuáles fueron los parámetros de diseño. Esto tendrá como resultado el conocer el intervalo de prueba para los ensayos y así dar respuesta en el medio nacional a diversos análisis, logrando hacer la generalización de la investigación aplicada adecuada.

Las experiencias vividas en México en torno a los tanques amortiguadores de sección trapezoidal construidos han dejado enseñanzas que dan cuenta de lo complicado del problema; además, el costo que ha representado su reparación, de tal manera que en los últimos años no se han construido ya tanques amortiguadores. Se recuerda por ejemplo, la central hidroeléctrica Ángel Albino Corzo (presa Peñitas) sobre el río Grijalva aguas abajo de la central hidroeléctrica Malpaso (presa Netzahualcóyotl), donde inicialmente se había diseñado con un tanque amortiguador en su parte terminal de la obra de excedencias, pero ante la experiencia vivida por la desaparecida Secretaría de Recursos Hidráulicos en Malpaso, se prefirió otra solución.

#### Búsqueda bibliográfica

El trabajo de Sánchez y Gracia (1995a), tiene el mérito de intentar explicar el flujo asimétrico a partir de un prototipo, pero partiendo de esa base buscaron que sus resultados fueran generales, a diferencia de las demás referencias consultadas en donde el objetivo es la generalización del fenómeno pero

perdiendo la objetividad del resultado en el diseño.

### Experiencias en los ensayos realizados en el laboratorio

Los ensayos realizados en el modelo hidráulico del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, permitieron corroborar las conclusiones a las que llegaron Sánchez y Gracia (1995a), donde se indica que la asimetría del salto hidráulico depende fundamentalmente del nivel a la salida del tanque amortiguador a diferencia de las demás referencias que manifiestan la importancia por la variación del número de Froude a la entrada del tanque amortiguador.

Lo complicado del salto hidráulico en el modelo hidráulico, revela la necesidad de mejorar el equipo de medición para pruebas en el laboratorio de Hidráulica.

El fenómeno tiene histéresis; ésta se presenta cuando se tratan de establecer las condiciones gasto y tirante antes de proceder a las mediciones de las pruebas; cuando el interés es aumentar el gasto en el modelo manteniendo el tirante aguas abajo constante se presentará una asimetría negativa, pero cuando el gasto se mantiene constante y se desea aumentar el tirante aguas abajo entonces el ángulo de asimetría es positivo.

La presencia de un control tipo escalón ascendente, reduce levemente el valor del tirante máximo  $Y_M$ , pero el propósito de incluirlo en este trabajo era comprobar su influencia en todas las facetas del salto hidráulico.

Por otro lado el escalón si influye en el salto hidráulico al confinarlo y estabilizarlo, siempre que se encuentre dentro de la distancia recomendada de 4 a 5 veces el tirante conjugado mayor a partir de la terminación de la rápida; incluso su presencia inhibe la existencia del flujo asimétrico. Pero a distancias más alejadas que la señalada este control ya no tiene efectos. En varios de los ensayos se verificaron ambas situaciones.

Se acepta que la expresión 3.13 responde a las condiciones de flujo obtenidas por la experimentación; sin embargo el valor del parámetro "F" que interviene en ella la condiciona a una aproximación. Esta situación deberá mejorar cuando se pueda medir con más precisión.

### Este trabajo

1. Ha pretendido esclarecer algunas de las facetas del flujo que se presenta en los tanques amortiguadores de sección trapecial para que no dejen de ser una

opción ventajosa tanto desde el punto de vista económico como de seguridad en el diseño.

2. El método propuesto se basa en el principio de la *cantidad de movimiento*, lo que garantiza que el fenómeno no pierde su esquema realista comprobada con 32 ensayos de que constó este trabajo.

3. El objetivo fundamental sigue siendo el de anticipar para fines de diseño y operación, la magnitud del tirante máximo  $Y_M$ , dentro del tanque amortiguador partiendo de la expresión general indicada 3.5.

4. Comprobar que el desarrollo de la herramienta propuesta es sencilla y permite comparar el valor que se obtiene en la expresión 3.13 con el nivel del libre bordo propuesto para el tanque de tal manera que el flujo no rebase ese límite, lo anterior se hizo en dos tanques amortiguadores ya construidos, en la presa Josefa Ortiz de Domínguez y Marte R. Gómez.

5. Alentar a que se siga estudiando el salto hidráulico en tanques amortiguadores de sección trapecial; el campo de experimentación es basto y atractivo.

### ***Bibliografía:***

Berryhill R H, 1957, "Stilling Basin Experiences of the Corps of Engineers", paper 1264, Proceedings, Journal of Hydraulic Division, Junio.

Bhowmik N G, 1975, "Stilling Basin Design for Low Froude Number", Journal of Hydraulic Division, Julio.

Chanson H y Montes J S, 1995, "Characteristics of Undular Hydraulic Jumps: Experimental Apparatus and Flow Patterns", Journal of Hydraulic Engineering, Febrero.

Chow V T, 1959, "Open-Channel Hydraulics", McGraw Hill Kogakusha, Nueva York.

Diskin M H, 1961, "Hydraulic Jump in Trapezoidal Channels", Water Power, Enero.

Domínguez S F J, 1974, "Hidráulica", Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Editorial Universitaria.

Echávez A G, 1996, "Introducción a los Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental", Universidad Nacional Autónoma de México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Asociación Mexicana de Hidráulica.

Elevatorski E, 1959, "Hydraulic Energy Dissipators", McGraw Hill, Nueva York.

Flores J O, 1954, "Le Ressaut", La Houille Blanche, Diciembre.

French R H, 1985, "Open Channel Hydraulics", McGraw Hill Company, Nueva York.

Gerhart P, Gross R y Hochstein J, 1995, "Fundamentos de Mecánica de Fluidos", Addison Wesley Interamericana.

Hager W H y Wanoschek R, 1987, "Hydraulic Jump in Triangular Channel", Journal of Hydraulic Research, Vol. 25, No. 5, Agosto.

Hager W H y Bretz N V, 1986, "Hydraulic Jumps at positive and negative steps", Journal of Hydraulic Research. Enero.

Hager W H, 1992, "Energy Dissipators and Hydraulic Jump", Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers.

Henderson F M, 1966, "Open Channel Flow", The MacMillan Company, New York

Hickox G H, 1934, "Graphical Solution for Hydraulic Jump", Journal of the

Hydraulic Division. Abril.

Hsing P S, 1937, "The Hydraulic Jump in a Trapezoidal Channel", tesis presentada en la Universidad Estatal de Iowa, como parte de los requisitos para obtener el grado de doctor.

Long D, Rajaratnam N, Steffler P M y Smy P R, 1990, "Structure of Flow in Hydraulic Jump", Journal of Hydraulic Research, Mayo.

Manual de Obras Civiles, C.F.E., 1980, "Diseño de Obras de Excedencias", Serie Hidráulica, Fascículo 10.

Massey B S, 1961, "Hydraulic Jump in Trapezoidal Channels - An Improved Method", Water Power, Junio.

Mohed M B y Sharp J J, 1971, "The hydraulic Jump in Trapezoidal Channels", Water and Water Engineering, Enero.

Ohtsu Y y Yasuda Y, 1977, "Free Hydraulic Jump and Submerged Hydraulic Jump in Trapezoidal and Rectangular Cannels", Japan Society of Civil Engineers, Traducción del japonés. Vol. 8, Noviembre.

Posey C J, 1963, discusión del artículo "General Solution of the Hydraulic Jump in Sloping Channels", de P.A. Argyropoulos, Journal of the Hydraulic Division, Enero.

Rouse H (editor), 1958, "Advanced Fluid Mechanics", J Wiley, Nueva York.

Sánchez B J L, 1979, "Behavior of Spillways in Mexican Dams", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M. Publicación E-40.

Sánchez B J L y Gracia S J, 1995, "Funcionamiento de tanques amortiguadores de sección trapecial", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M. Proy. 5310.

Sánchez B J L y Gracia S J, 1995a, "Asymmetric Flows in Stilling Basins with Trapezoidal Cross Sections", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.

Sánchez B J L y Gracia S J, 1997, "Introducción al Diseño de Obras de Excedencias", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M. Publicación CI-2.

Sandover J A y Holmes P, 1962, "The Hydraulic Jump in Trapezoidal Channels", Water Power, Noviembre.

Silvester R, 1964, "Hydraulic Jump in all Shapes of Horizontal Channels", Journal of the Hydraulic Division. Enero.

Sotelo A G, 1961, "Cálculo de Tanques de Amortiguación de Sección Trapecial", Ingeniería Hidráulica en México, Enero.

Sotelo A G, 1998, "Hidráulica Fundamental. Vol. II", en preparación.

Vergara S M A, 1993, "Técnicas de Modelación en Hidráulica", Alfaomega, México, D.F.

Wanoschek R y Hager W C, 1989, "Hydraulic Jump in Trapezoidal Channel", Journal of Hydraulic Research, International Association for Hydraulic Research, Septiembre.

## APÉNDICES

- A.- Secuela de cálculo para obtener el valor del coeficiente R
  
- B.- Esquema de instalaciones del modelo hidráulico y fotografías de ensayos.
  
- C.- Detalles de las presas: Josefa Ortiz de Domínguez y Marte R. Gómez

## APÉNDICE A



**A.1 SECUELA DE CÁLCULO PARA OBTENER EL VALOR DE R**

**1.- OBTENCIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO M1 A PARTIR DE LOS DATOS DEL MODELO.**

Al asignar valores a las incógnitas que intervienen en el problema, se tienen los siguientes datos:

$$Q = 0.019 \text{ m}^3/\text{s} \quad B = 0.335 \text{ m} \quad z = 0.66 \text{ m}$$

$$L = 1.50 \text{ m} \quad k = 1 \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad n = 0.011$$

Considerando que al final del tramo horizontal se tiene el tirante crítico, éste se puede calcular con la expresión general del régimen crítico.

$$Y_c = 0.010 \text{ m} \text{ valor propuesto del tirante crítico}$$

Ecuación general del régimen crítico.

$$Q^2 = \frac{Y_c \cdot B \cdot k \cdot Y_c^2}{g \cdot B \cdot k \cdot Y_c^2}$$

Res Find  $Y_c$  Res = 0.058855 m

$Y_c$  Res  $Y_c = 0.058855 \text{ m}$  Que es el tirante crítico.

Con el tirante crítico antes calculado, se obtienen el área, la velocidad, el perímetro mojado y la energía específica críticas.

$$A_c = Y_c \cdot B \cdot k \cdot Y_c^2 \quad A_c = 0.02318 \text{ m}^2$$

$$v_c = \frac{Q}{A_c} \quad v_c = 0.819666 \text{ m/s}$$

$$E_c = Y_c + \frac{v_c^2}{2 \cdot g} \quad E_c = 0.093098 \text{ m}$$

$$P_c = B \cdot 2 \cdot \sqrt{1 + k^2} \cdot Y_c \quad P_c = 0.501466 \text{ m}$$

De la ecuación de la energía, aplicada entre el inicio de la rápida ( sección crítica ) y el tanque amortiguador ( inicio del salto hidráulico ), se tiene lo siguiente:

El valor propuesto para el conjugado menor es  $Y_1 = 0.00010 \text{ m}$

$$E_c = Z + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot B \cdot Y_1 - k \cdot Y_1^2} + Y_1 \cdot L \cdot \frac{v_c}{n} \cdot \frac{Q}{B \cdot Y_1 - k \cdot Y_1^2} + \frac{A_c}{P_c} \cdot \frac{B \cdot Y_1 - k \cdot Y_1^2}{B - 2 \cdot 1 - k^2 \cdot Y_1}$$

Res = Find(Y1)      Res = 0.015246 m

Cuya respuesta es el conjugado menor, se denominará:

$Y_1 = \text{Res}$        $Y_1 = 0.015246 \text{ m}$

Y la cantidad de movimiento en la sección 1 para la sección trapezoidal se puede calcular así:

$$M_1 = \frac{B \cdot Y_1^2}{2} + \frac{k \cdot Y_1^3}{3} + \frac{Q^2}{g \cdot B \cdot Y_1 - k \cdot Y_1^2}$$

$M_1 = 0.006932 \text{ m}^3$

Que es el valor de la cantidad de movimiento en la sección 1

**2. OBTENCIÓN DEL CONJUGADO MAYOR A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE LA FUNCIÓN CANTIDAD DE MOVIMIENTO.**

Para presentarse el salto hidráulico claro, la función cantidad de movimiento se debe igualar en la condición de régimen subcrítico, por lo que el conjugado mayor será:

$Y = 10\text{m}$       Se propone como el valor del tirante conjugado mayor

Al igualar la cantidad de movimiento, se obtiene el conjugado mayor.

$$M_1 = \frac{B \cdot Y^2}{2} - \frac{k \cdot Y^3}{3} - \frac{Q^2}{g \cdot B \cdot Y \cdot k \cdot Y^2}$$

Res : Find(Y)

Res = 0.170296 m

$$Y_3 \text{ Res } Y_3 = 0.170296 \text{ m}$$

La condición anterior implica que se garantiza el salto hidráulico claro y que éste es simétrico dado que el ancho del canal queda ocupado por el flujo.

### 3. OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN CANTIDAD DE MOVIMIENTO PARA OTRO TIRANTE EN RÉGIMEN SUBCRÍTICO MENOR QUE EL CONJUGADO MAYOR.

Sin embargo, la presencia del flujo asimétrico en este fenómeno se da cuando el tirante conjugado mayor es menor que aquel que corresponde al salto claro, de aquí que se proponga un tirante en el régimen subcrítico que cumpla con esa condición.

Se propone en consecuencia el valor de 0.145 m, que representa el 82.33 % del valor del conjugado mayor para el salto claro.

$$Y_2 = 0.145 \text{ m}$$

$$M_2 = \frac{B \cdot Y_2^2}{2} - \frac{k \cdot Y_2^3}{3} - \frac{Q^2}{g \cdot B \cdot Y_2 \cdot k \cdot Y_2^2}$$

Con este valor propuesto, la cantidad de movimiento es menor que para el salto claro.

$$M_2 = 0.005067 \text{ m}^3$$

$$\frac{M_2}{M_1} = 0.730955$$

Esta relación de cantidades movimiento, resulta ser del 73.09 %

### 4. OBTENCIÓN DEL TIRANTE MÁXIMO EN EL TANQUE AMORTIGUADOR, A PARTIR DE LA EXPERIENCIA DEL MÉTODO DE SÁNCHEZ - GRACIA.

Para el cálculo se requiere obtener el número de Froude para la condición del régimen subcrítico, lo cual se hace así:

$$Fre = \frac{Q}{(B + k \cdot Y_2) \cdot Y_2 \cdot \sqrt{g \cdot Y_2}}$$

$$Fre = 0.228889$$

Importante señalar que se incorpora a la expresión general, el coeficiente de 0.875, para tomar en cuenta las fluctuaciones medias.

$$Y_M = Y_2 \cdot 2.85 \cdot 0.875 \cdot \frac{Y_2}{B} \cdot (1 - k^2)^{0.5} \cdot Fre^{0.397}$$

$Y_M = 0.21254m$  Que es el valor máximo de la sobreelevación dentro del tanque amortiguador, y que sobrepasa al valor del conjugado mayor para salto claro.

El porcentaje que involucra ambos tirantes es del 46.57 %

$$\frac{Y_M}{Y_2} = 1.465791$$

Antes de continuar es necesario validar la expresión, que debe ser mayor que 1.

$$2.85 \cdot \frac{Y_2}{B} \cdot (1 - k^2)^{0.5} \cdot Fre^{0.397} > 1$$

$$2.85 \cdot 0.85 \cdot \frac{Y_2}{B} \cdot (1 - k^2)^{0.5} \cdot Fre^{0.397} = 1.423912$$

Luego entonces cumple con ser mayor a 1

##### 5. PROPUESTA DE "R" PARA LIGARLA CON LA RELACIÓN DE CANTIDADES DE MOVIMIENTO M2 / M1

De los cálculos realizados hasta el momento, se considera que el flujo al barrerse el salto y producir una asimetría, ya no ocupa todo el ancho del canal y existe un reflujo (se mueve en sentido contrario). El flujo principal ocupa una parte del ancho total del canal (B) al que se denominará (b).

La ecuación planteada abajo, es la propuesta para relacionar los "anchos" de la plantilla ocupados por el flujo principal.

$$b = B \cdot \frac{M_2^k}{M_1}$$

Obsérvese que  $k$  es el talud del canal

$$b = 0.24487 \text{ m}$$

que es el ancho ocupado por el flujo en el sentido principal.

$$\frac{b}{B} = 0.730955$$

de esta relación se desprende que el sentido del flujo ocupa el 73.09 % del ancho.

Al proponer el valor de  $R = 1.03$  en la siguiente expresión se obtiene,

$$R = 1.03 \quad F = \frac{M_2}{M_1} \cdot R \quad F = 0.752884$$

y este valor, al incluirse en la función cantidad de movimiento permite calcular el tirante máximo  $Y_{MM}$ .

$$Y_{MM} = 10.00 \text{ m} \quad \text{valor propuesto del tirante } Y_{MM}$$

$$M_1 = \frac{b \cdot Y_{MM}^2}{2} + \frac{k \cdot Y_{MM}^3}{3} \cdot F = \frac{Q^2}{g \cdot (b \cdot Y_{MM} + k \cdot Y_{MM}^2)}$$

$$\text{Res} = \text{Find } Y_{MM} \quad \text{Res} = 0.212248 \text{ m}$$

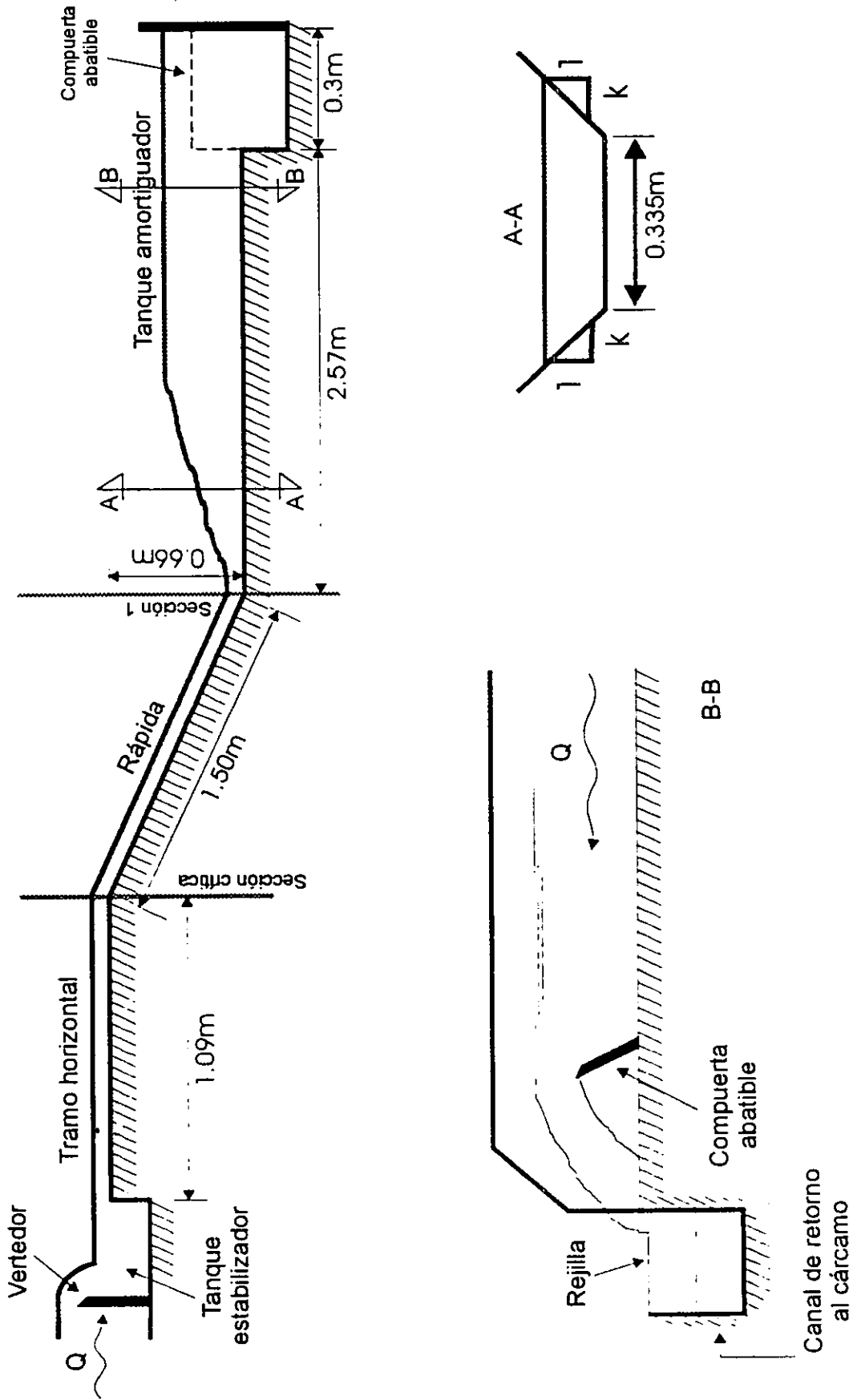
Este valor permite aceptar al "R" propuesto pues

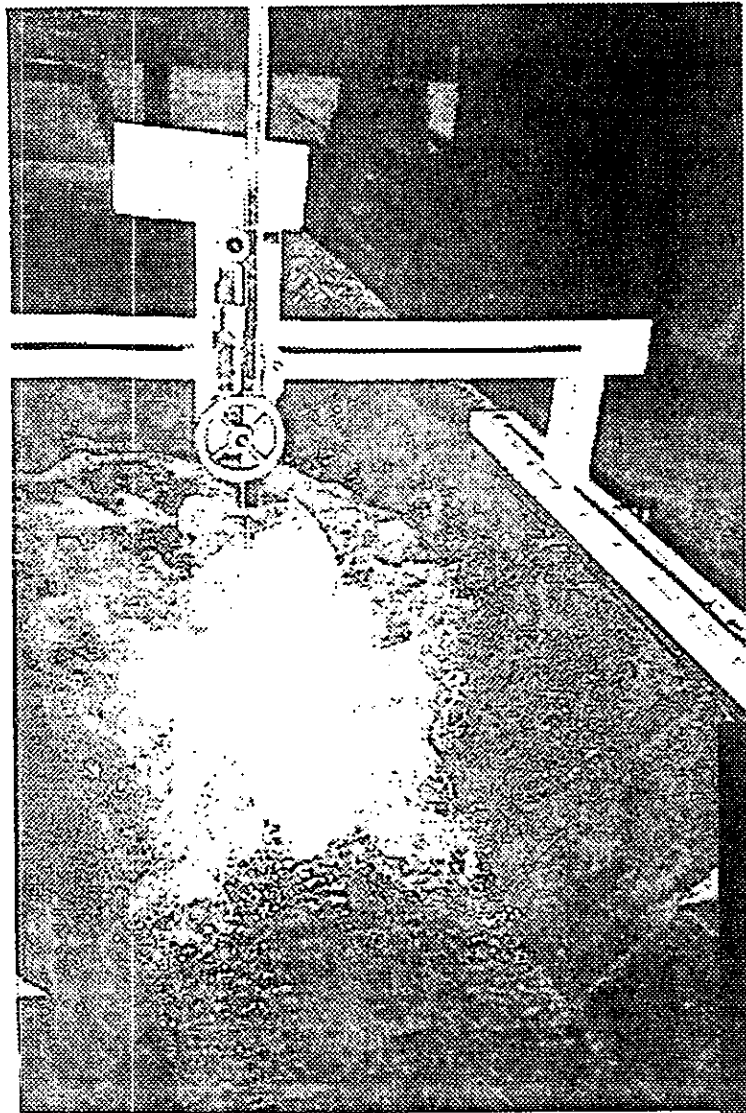
$$\frac{Y_M}{\text{Res}} = 1.001373$$

De la misma forma, se hizo con otros valores de  $Y_2$  para lograr los resultados en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3.

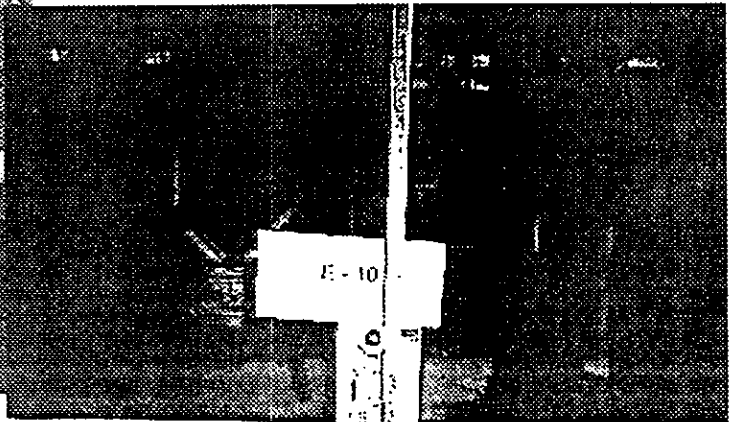
## APÉNDICE B

Figura B.1. Características del modelo hidráulico

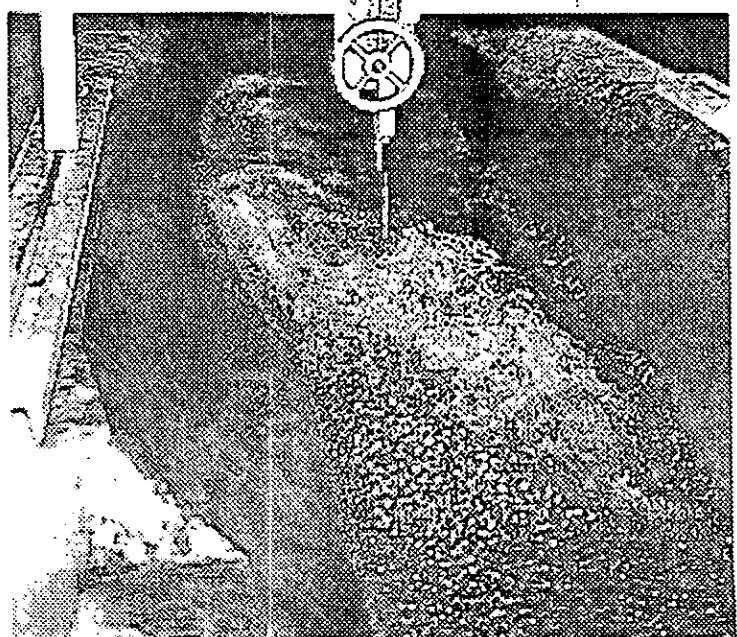




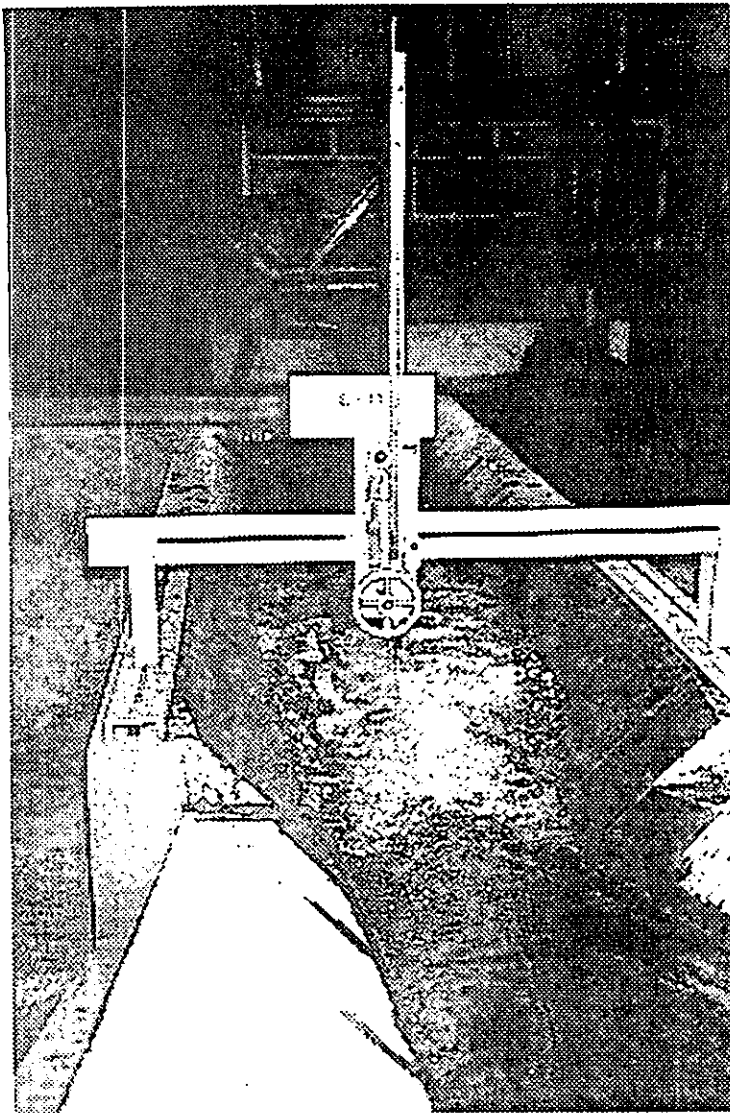
Fotografía B.1. Ensayo 4. Salto Hidráulico simétrico con la presencia del escalón a 0.43 m del cambio de pendiente, para  $Q = 0.019 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Y_1 = 0.13 \text{ m}$ .



Fotografía B.2. Ensayo 10. Salto Hidráulico con asimetría negativa de  $60^\circ$  sin escalón para  $Q = 0.012 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Y_1 = 0.099 \text{ m}$ .

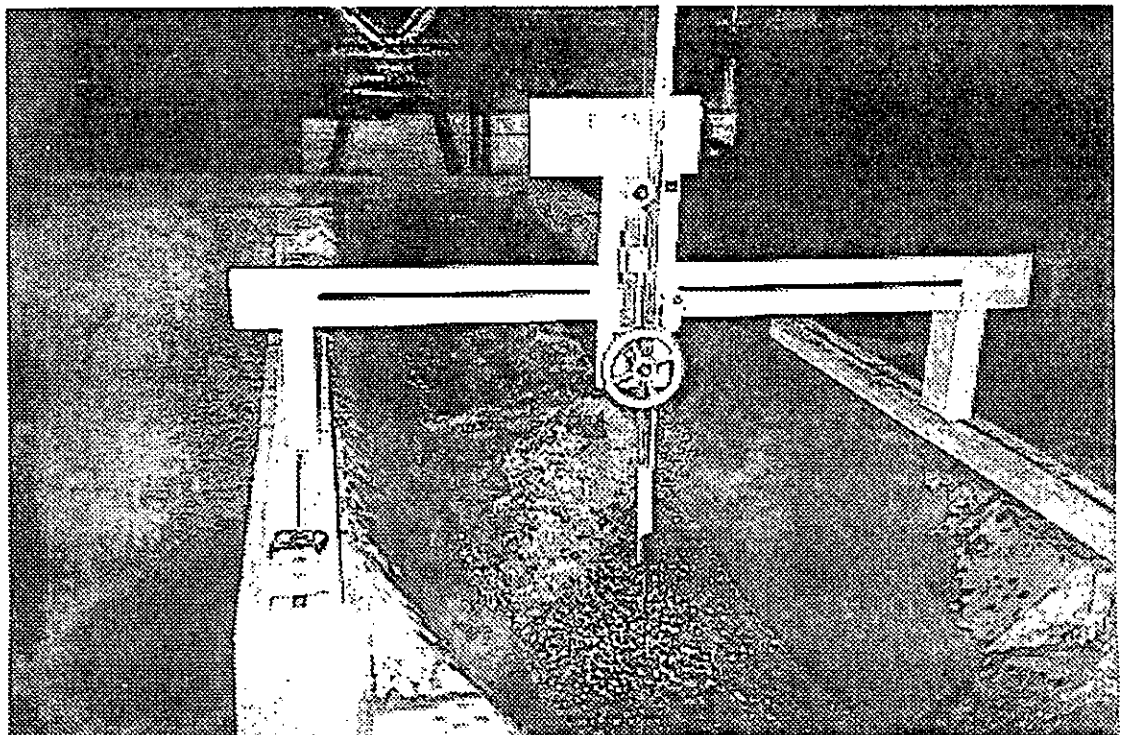






Fotografía B.3. Ensayo 11. Vista general del salto hidráulico simétrico con la presencia del escalón a 0.43 m del cambio de pendiente, para  $Q = 0.012 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Y_1 = 0.11 \text{ m}$ .

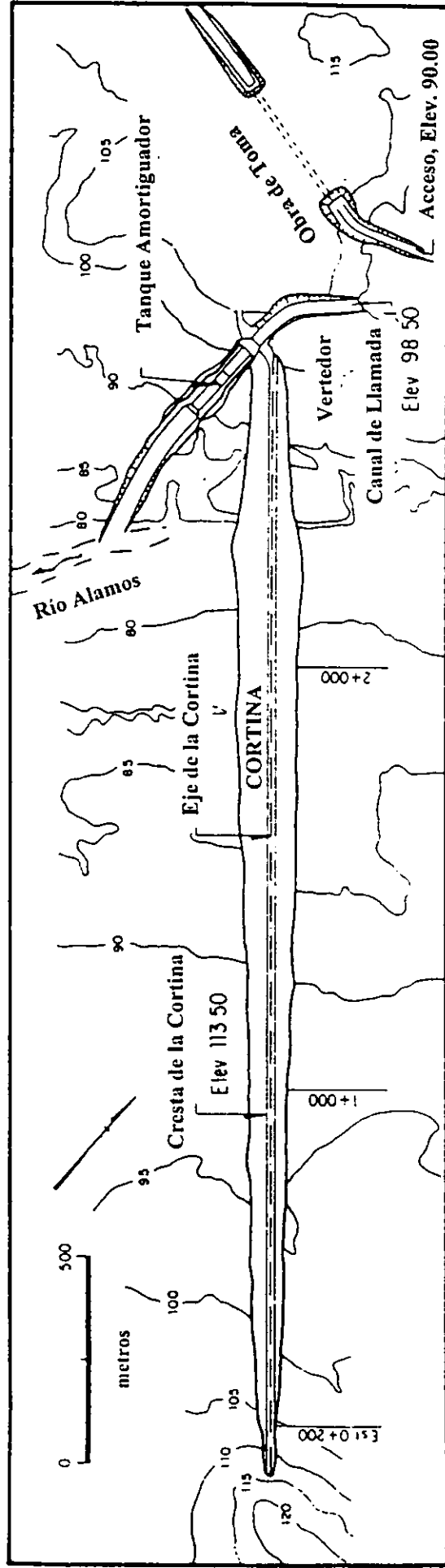
Fotografía B.4. Ensayo 15. Salto hidráulico con asimetría positiva de  $54^\circ$  con escalón a 1.43 m del cambio de pendiente, para  $Q = 0.012 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Y_1 = 0.11 \text{ m}$ .



## APÉNDICE C

**PRESA JOSEFA ORTIZ DE DOMÍNGUEZ, SIN.**  
(EL SABINO)

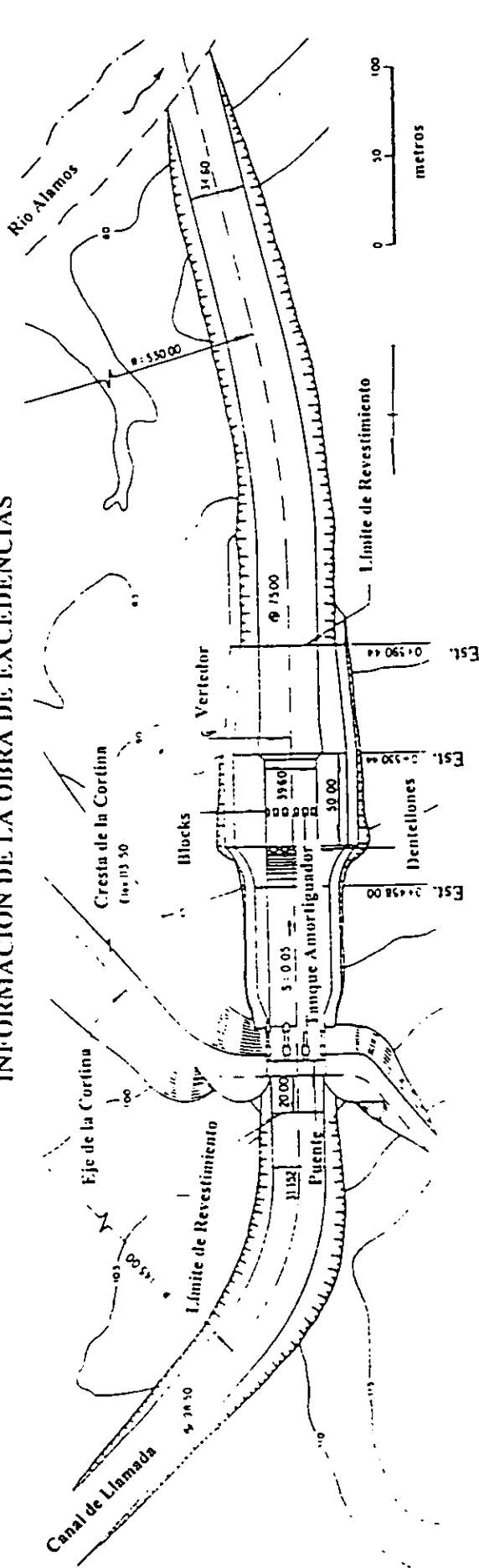
**INFORMACIÓN GENERAL DE LA OBRA**



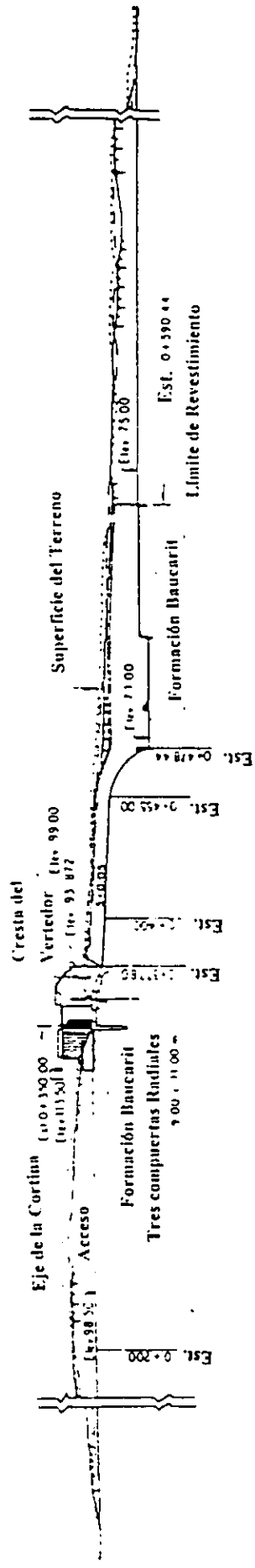
**VISTA EN PLANTA DEL PROYECTO**

Plano C.1 Vista en planta de la Presa Josefa Ortiz de Domínguez

**PRESA JOSEFA ORTIZ DE DOMÍNGUEZ, SIN.**  
**(EL SABINO)**  
**INFORMACIÓN DE LA OBRA DE EXCEDENCIAS**



**VISTA EN PLANTA**

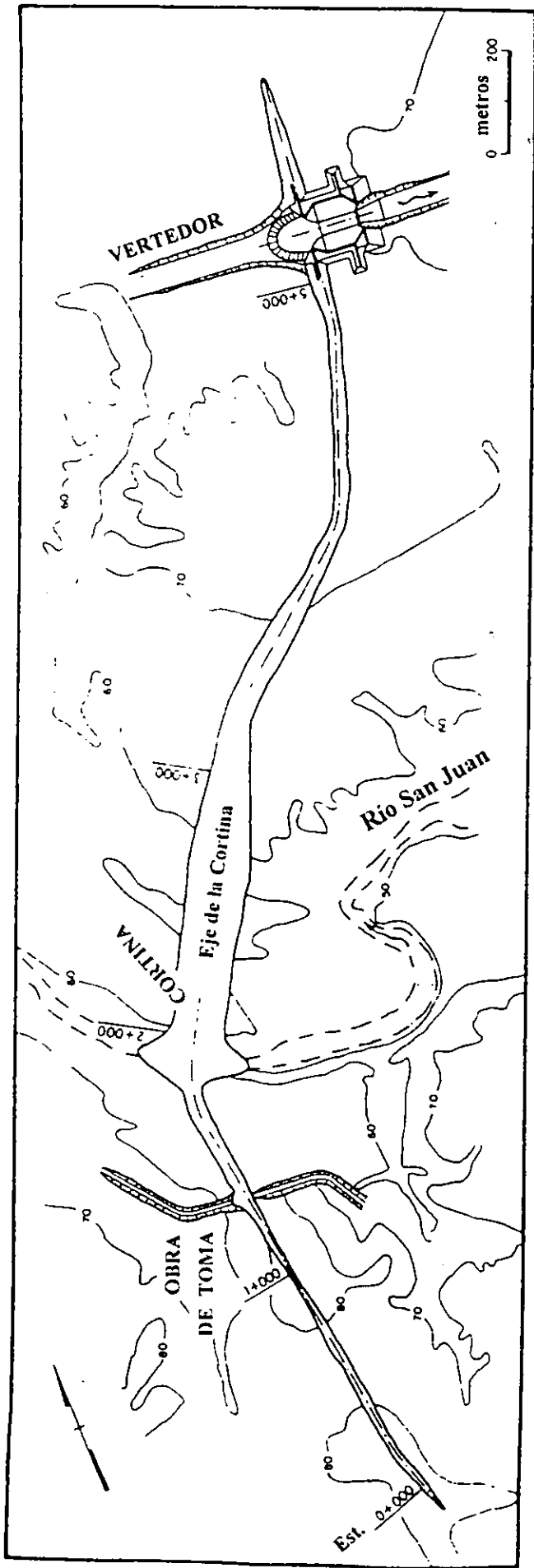


**CORTE LONGITUDINAL POR EL EJE DEL VERTEDOR**

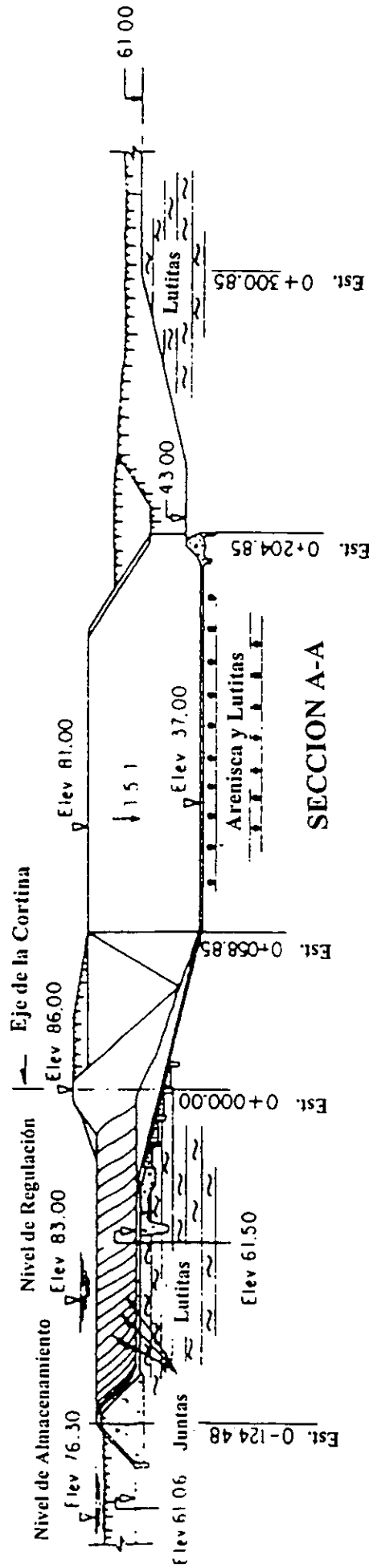
Planos C.2 y C.3 Vista en planta y corte longitudinal de la obra de excedencias de la Presa Josefa Ortiz de Domínguez.



Fotografía C.1. Presa Josefa Ortiz de Dominguez. Compuertas de la obra de excedencias, vistas desde aguas abajo; salida del canal de descarga y tanque amortiguador.

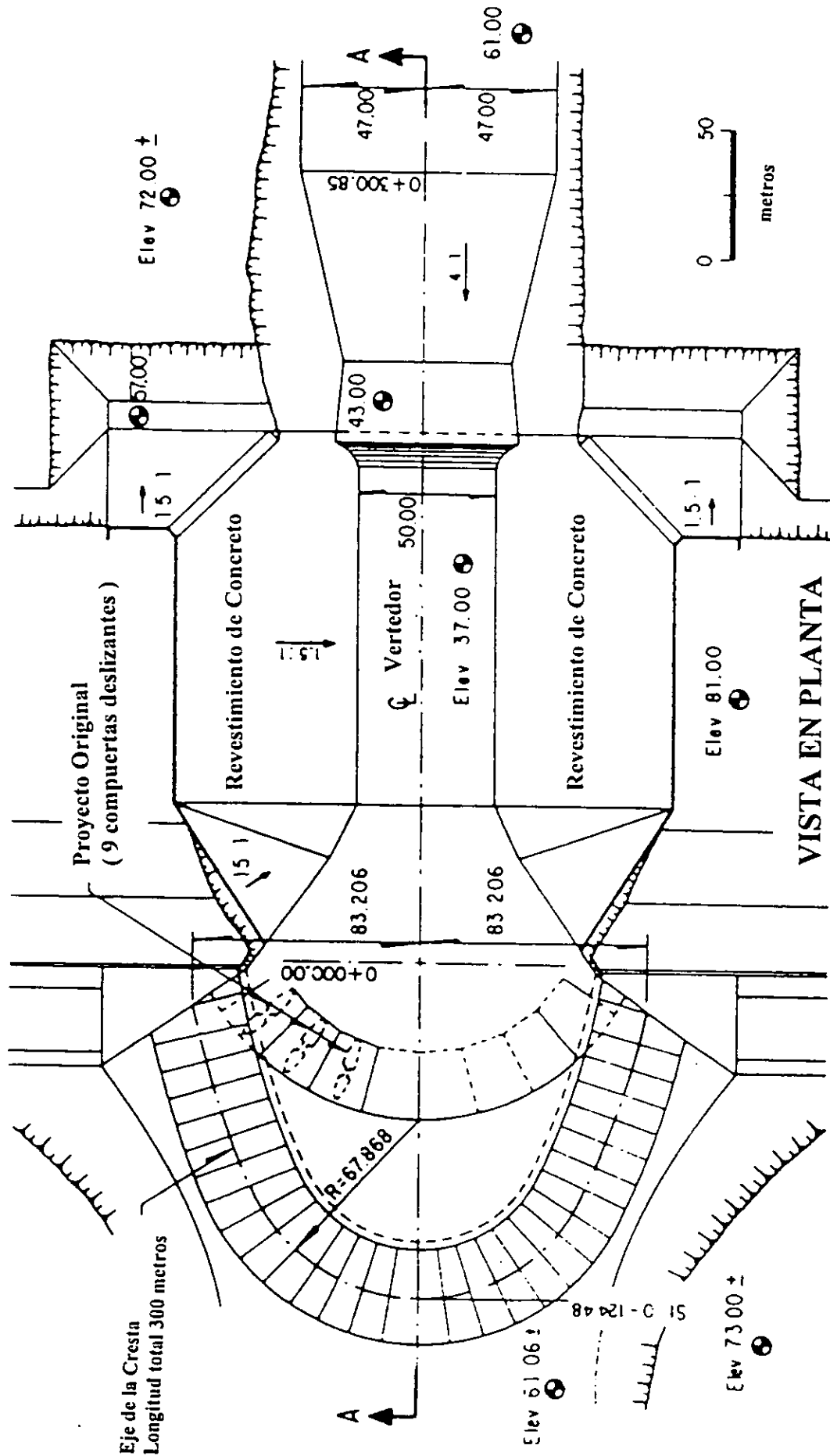


### VISTA GENERAL DEL PROYECTO EN PLANTA



Planos C.4 y C.5. Vista general del proyecto y vista desde la sección A - A del vertedor de excedencias de la Presa Marte R. Gómez, (El Azúcar), Tamps.

**PRESA MARTE R. GÓMEZ, TAMP.**  
(EL AZÚCAR)



Plano C.6. Vista en planta del vertedor de excedencias de la Presa Marte R. Gómez, (El Azúcar), Tamps.



Fotografía C.2. Presa Marte R. Gómez, Tamps. Panorámica de la presa desde la margen izquierda. La obra de excedencias derramando.