

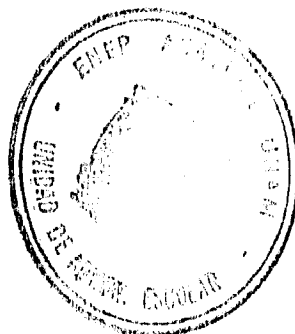
16  
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"

TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

"SALTO HIDRAULICO EN CANALES CON PENDIENTE  
Y SECCION VARIABLE"

MEJIA DIAZ FRANCISCO JAVIER



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN  
COORDINACION GENERAL DEL PROGRAMA DE ESTUDIOS PROFESIONALES



CARTA DE CONFORMIDAD PARA LA ASESORIA DE TESIS

C. Ing. Oscar Alberto Almaraz Peña  
Jefe del Departamento de  
Física Aplicada

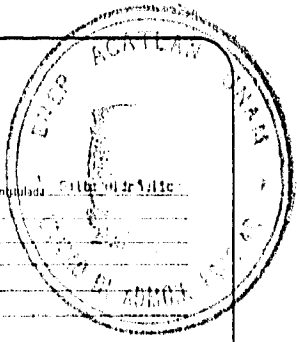
Después de haber analizado el proyecto para la elaboración de tesis intitulada Elaboración de un Sistema con Fuente y Acción Variable,  
que presenta el alumno Francisco Javier Peña Cruz,  
de la carrera de Ingeniería Civil,  
con número de cuenta 2044771-2  
 doy mi conformidad para asesorarlo.

**ATENTAMENTE**  
  
 Nombre y firma del asesor

Sello y Vo. Bo. del Departamento

Acatlán, Edo. de Méx., a 13 de octubre de 19 97

*Recibe copia original 27/8/97*



**INSTRUCTIVO**

Llévese a máquina

Original rosa: Unidad de Administración Escolar.  
 Copia amarilla: Profesor asesor asignado.  
 Copia azul: Coordinación del programa específico.  
 Copia blanca: Alumno.  
 Copia verde: Departamento correspondiente.

*27/8/97*



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLÁN  
 COORDINACIÓN GENERAL DEL PROGRAMA DE ESTUDIOS PROFESIONALES



SOLICITUD DE REGISTRO DE TESIS INDIVIDUAL  
 Y ASIGNACIÓN DE ASESORÍA

C. D.F. DOMINGILLO ALCOR CORVAO  
 Coordinador del Programa  
 INGENIERÍA CIVIL  
 Presente

Me dirijo a usted con el fin de solicitar mi registro de tema de tesis, la cual realizaré a  
 efecto de obtener el título de licenciado en Ingeniería Civil por lo que a continuación proporciono los siguientes datos:

Nombre del alumno: Francisco Javier Rojas Eliz.	No. Cta: 333277163
Domicilio particular: Grupo Encanto - Cda - 0	Tel: 5 41 52 36
Domicilio del trabajo:	Tel:

Título de la tesis: Salto Hidráulico en canales con pendiente y sección variable.

Objetivo: Analizar y comparar estudios realizados por investigadores como N. Abarca, A. B. Hagar y otros en el campo del Salto Hidráulico en canales con cambios de pendiente y sección, para definir los criterios dentro de un rango de 0.11117.

*Recibido copia revisada 21/11/87*

Cuando y bifurcación ver al reverso

Asignación de asesor:

Nombre: Jorge Esteban Athala Polanco  
 Adscrito al Departamento de Física Aplicada  
 Domicilio particular: Av. Cranzónes No. 743-7  
 Domicilio trabajo: Av. Alcañones y Av. San Juan de los Rios  
 Mi proporción de asesoría: Las amplias experiencias en el tema, el área de nuestra especialidad hacia la investigación del salto de agua.

Acatlán Edo. de México, a 19 de octubre de 1987.

*[Firma]*  
 Firmado del Alumno

Forma de la tesis.

**Introducción.**

- Capítulo I.-** Generalidades.  
I.1.- Conceptos y Definiciones.  
I.2.- Ventajas y Desventajas del Salto Hidráulico en canales.  
I.3.- Teoría General del salto hidráulico en canales.  
**Capítulo II.-** Salto hidráulico en canales con pendiente variable.  
II.1.- En caso de disolución de pendiente.  
II.1.1.- Situación de No separación.  
II.1.2.- Caso de aumento de pendiente.  
II.2.1.- Situación de No separación.  
II.2.2.- Caso de pendiente constante.  
**Capítulo III.-** Salto hidráulico en canales con pendiente variable.  
III.1.- Caso de aumento de pendiente.  
III.1.1.- Situación de No separación.  
III.1.2.- Situación de No separación.  
**Capítulo IV.-** Ensayos de aplicación.  
IV.1.- Flujo entre verticales.  
IV.2.- Sección vertical.  
IV.3.- Comparación de resultados.  
**Conclusiones y Recomendaciones.**

**Bibliografía preliminar.**

- 1) Henderson, "Open channel flow". McMillan, 1960, 543 pp.
- 2) Van Te Zool, "Open channel hydraulics". McGraw-Hill, 1931, 303 pp.
- 3) W. H. Rouse, "The hydraulic jump in "irrigation canals". Irrigation and Power, 1946, pp. 134-135.

**Revistas.**

- 1) Journal of the Hydraulic Division, A.S.C.E.
- 2) Journal of the Hydraulic Engineers, I.H.E.S.

AUTORIZACIONES

VO BO

FECHA

CELLO DE LA COORDINACIÓN

COORDINADOR DEL PROGRAMA

En caso de ser necesario, por favor dirigirse al departamento correspondiente.

**INSTRUCTIVO**

1. Llévese a máquina.
2. Los anexos deberán examinarse de acuerdo a los casos y a las otras disposiciones.

Copialista	Unidad de Administración y Control
Copialista	Profesor Asesor en planta
Copialista	Coordinador del programa específico correspondiente
Copialista	Alumno
Copialista	Departamento correspondiente

## I N D I C E

	PAG.
Introducción.	4
Capítulo I.- Generalidades.	5
I.1.- Conceptos y Definiciones.	5
I.2.- Ventajas y Desventajas del Salto Hidráulico en canales.	7
I.3.- Teoría General del Salto Hidráulico en canales.	9
Capítulo II.- Salto Hidráulico en canales con pendiente variable.	20
II.1.- En caso de disminución de pendiente.	20
II.1.1.- Estudios de N. Rajaratnam.	21
II.2.- Caso de aumento de pendiente.	40
II.2.1.- Estudios de N. Rajaratnam.	40
II.3.- Caso de pendiente constante.	40
Capítulo III.- Salto Hidráulico en canales con sección variable.	45
III.1.- Caso de ensanchamiento.	45
III.1.1.- Estudios de W. H. Hager.	47
III.1.2.- Estudios de K. Herbrand.	67
Capítulo IV.- Ensayos de aplicación.	78
IV.1.- Pendiente variable.	78
IV.2.- Sección variable.	85
IV.3.- Comparación de Resultados.	88
Conclusiones y Recomendaciones.	91
Bibliografía.	94

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

En el área de Ingeniería Civil y en especial en Hidráulica, nos encontramos con una gran variedad de fenómenos físicos en los cuales llegar a una explicación o demostración es un problema excesivamente complicado o sin solución, por lo cual se recurre a la simulación del fenómeno para determinar una solución empírica de dicho problema.

En base a lo antes comentado la presente tesis busca profundizar en el fenómeno del Salto Hidráulico en canales con diferentes variantes cuya solución ha sido desarrollada por varios -- autores en base a la experimentación.

El interés por profundizar en el desarrollo del Salto Hidráulico en canales con variación de pendiente y variaciones de sección, radica fundamentalmente a la escasa o nula información teórica sobre dichos temas y porque el Salto Hidráulico en dichas condiciones, tiene situaciones más favorables en aspectos económicos y técnicos que durante el desarrollo de la tesis se explicarán a detalle.

Los procedimientos de solución serán trabajados por medio de gráficas y fórmulas simples que reducirán a su mínima expresión en tiempo y dificultad, dichas soluciones.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1. Conceptos y definiciones.

##### Salto Hidráulico.

Un Salto Hidráulico surge en un tramo relativamente corto del cauce, donde el flujo pasa bruscamente del estado supercrítico ( $Y_1 < Y_{crit}$ ), al estado subcrítico ( $Y_2 > Y_{crit}$ ), formando sobre el flujo intensas zonas de remolino, a dicha zona se le llama onda superficial del Salto Hidráulico (fig. 1).

La Proyección Horizontal de la onda representa el largo del tramo de movimiento no uniforme y se le llama longitud del Salto Hidráulico (1).

La diferencia de profundidades antes  $Y_1$  y después  $Y_2$  del Salto Hidráulico (llamados Tirantes Conjugados) es la Altura del Salto Hidráulico:

$$\Delta Y = Y_2 - Y_1 \dots \text{ec. 1}$$

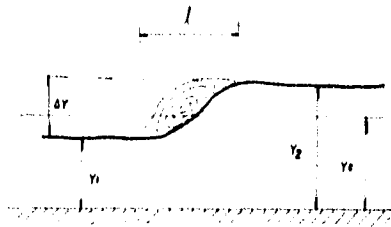


FIG. 1



Los dos tipos de Salto Hidráulico más comunes son:

- a) El Salto Hidráulico con una gran turbulencia que provoca que cierta porción del líquido retorne contra la corriente (fig.1). En este caso, el aire que entra permite una cierta aireación de líquido.
- b) El Salto Hidráulico agitado pero sin remolino y sin retorno del líquido. Esta segunda forma se presenta cuando la profundidad inicial no se encuentra muy abajo del valor crítico, - llamado Salto Barrido (fig. 2).

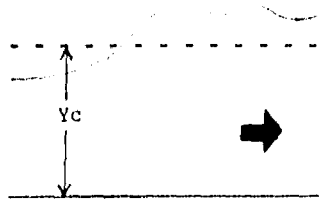


fig. 2

En la práctica el Salto Barrido se utiliza para amortiguar la energía cinética excesiva detrás de los vertedores y otras - - obras hidráulicas.

Con ayuda del Salto Hidráulico se conjugan dos curvas de la superficie libre, una situada por debajo de la línea de los tirantes críticos (Estado-Supercrítico) la cual pasa por intermedio del Salto Hidráulico, a otra situada por arriba de los tirantes críticos (Estado - Subcrítico).

Como en el Salto Hidráulico se produce un cambio bastante brusco del régimen de la corriente, va acompañado de pérdida de energía.

En general en un Canal Rectangular la Pérdida de Energía,  $Y_f$ , entre 2 Secciones, será:

$$Y_f = \left( \frac{V_1^2}{2g} + Y_1 \right) - \left( \frac{V_2^2}{2g} + Y_2 \right) \dots \text{ ec. 2}$$

Donde  $Y_1$ ,  $Y_2$  son los tirantes conjugados y  $V_1$ ,  $V_2$  son las velocidades de las Secciones antes y después del Salto Hidráulico.

En la fórmula antes citada consideramos que las velocidades de la Corriente en cada Sección están distribuidas uniformemente ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ).

#### 1.2 Ventajas y Desventajas del Salto Hidráulico.

En lo referente a la utilidad que se presenta al provocar un Salto Hidráulico en una obra de Ingeniería citaremos las siguientes posibilidades:

- 1) La disipación de energía en flujos sobre los vertedores y otras estructuras hidráulicas.

- 2) El mantenimiento de altos niveles de agua en canales que se utilizan para propósitos de distribución de Agua.
- 3) Incremento del Gasto descargado por una compuerta deslizante al rechazar el retroceso del agua contra la compuerta, - esto aumenta la carga efectiva y con ella la descarga.
- 4) La reducción de la elevada presión bajo las estructuras - mediante la elevación del tirante del Agua sobre la guarnición de defensa de la Estructura.
- 5) La Aerificación de flujos y el desclorinado en el tratamiento de Agua.
- 6) La remoción de bolsas de aire con flujo de Canales abiertos en Canales Circulares.
- 7) La identificación de condiciones especiales de flujo, como la existencia del Flujo Supercrítico o la presencia de una Sección de Control para la medición de la Razón Efectividad - Costo del Flujo.<sup>1</sup>

Ref.1 Richard H. French, Hidráulica de Canales Abiertos, pag. 79, ed. 1988.

Tratando el aspecto relativo a las posibles desventajas y problemas, solo haremos énfasis al excedente que pasa por un vertedor de demasias o un conducto de desfogue, capaz de causar erosión en el lecho de la Corriente, y en los bancos abajo de una presa.

Para proteger la erosión debida a los excedentes, la decisión depende del grado de la misma y los daños que produzca, tomando como factores las características del material del lecho de la corriente, de la distribución de la velocidad y de la frecuencia con que se presente el escurrimiento erosivo.

Podemos mencionar generalizando que la tierra y la roca son vulnerables a la acción erosiva del agua en escurrimientos con velocidades bajas. La roca sólida es resistente a la erosión, aunque si tiene planos muy marcados puede erosionarse a velocidades altas. Si la roca tiene una superficie aspera dentada, la cavitación puede contribuir a la erosión. Este tipo de fenómenos pueden analizarse por medio de un modelo hidráulico de lecho móvil.

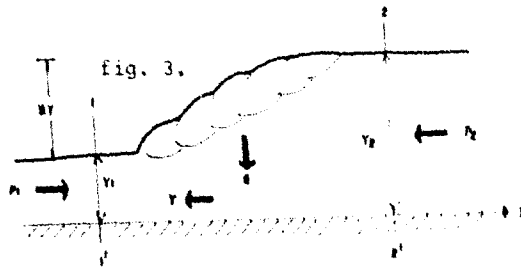
### 1.3 Teoría General del Salto Hidráulico en Canales.

Para determinar la dependencia funcional entre los tirantes conjugados del Salto Hidráulico:

$$Y_1 = f(Y_2) \quad \text{ó} \quad Y_2 = f'(Y_1)$$

Haremos uso del teorema sobre la Variación de la Cantidad de Movimiento. Según dicho teorema, la proyección del incremento de la cantidad de movimiento de una masa unitaria del líquido sobre cualquier dirección, es igual a la suma de las proyecciones sobre la misma dirección de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema.

Examinaremos entonces el Salto Hidráulico perfecto en un canal prismático entre las secciones 1 - 1' y 2 - 2' (fig. 3).



$$\Delta(\dot{m} V_i)_x = \sum F(i)_x \quad \dots \text{ec. 3}$$

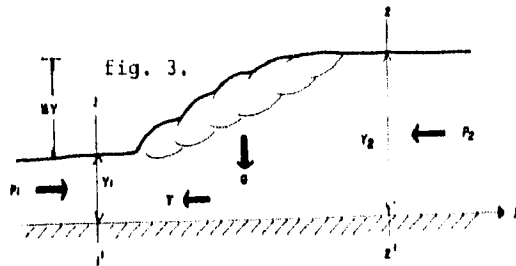
Proyectaremos las fuerzas y el incremento de la cantidad de movimiento en la dirección del movimiento de la corriente, es decir sobre el eje X. Por lo tanto la proyección del incremento de la cantidad de movimiento en el tramo del Salto Hidráulico desde la sección 1 - 1' hasta la sección 2 - 2' es:

$$(\dot{m} V_1)_x = \dot{m}_2 V_2 - \dot{m}_1 V_1 \quad \dots \text{ec. 4.}$$

siendo  $\dot{m}_2 = \rho A_2 V_2$  y  $\dot{m}_1 = \rho A_1 V_1$ , las masas del líquido que pasan a través de las Secciones 1 - 1' y 2 - 2' respectivamente

Haremos uso del teorema sobre la Variación de la Cantidad de Mo vimiento. Según dicho teorema, la proyección del incremento de la cantidad de movimiento de una masa unitaria del líquido sobre cualquier dirección, es igual a la suma de las proyecciones sobre la misma dirección de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema.

Examinaremos entonces el Salto Hidráulico perfecto en un canal prismático entre las secciones 1 - 1' y 2 - 2' (fig. 3).



$$\Delta(\dot{m} V_i)_x = \sum F(i)_x \quad \dots \text{ec. 3}$$

Proyectaremos las fuerzas y el incremento de la cantidad de movimiento en la dirección del movimiento de la corriente, es decir sobre el eje X. Por lo tanto la proyección del incremento de la cantidad de movimiento en el tramo del Salto Hidráulico desde la sección 1 - 1' hasta la sección 2 - 2' es:

$$(\dot{m} V_1)_x = \dot{m}_2 V_2 - \dot{m}_1 V_1 \quad \dots \text{ec. 4.}$$

siendo  $\dot{m}_2 = \rho A_2 V_2$  y  $\dot{m}_1 = \rho A_1 V_1$ , las masas del líquido que pasan a través de las Secciones 1 - 1' y 2 - 2' respectivamente

en la unidad de tiempo (segundo),  $A_1$  y  $A_2$ , las áreas del flujo en esas secciones,  $\rho$  la densidad del líquido,  $V_1$  y  $V_2$ , las velocidades medias en las secciones 1 - 1' y 2 - 2'.

Considerando el Gasto (  $Q$  ) constante, las masas del líquido serán:

$$m_2 = m_1 = \rho Q, \text{ por lo tanto:}$$

$$\Delta(\dot{m} v)_x = \rho Q (V_2 - V_1) \dots \text{ ec. 5}$$

Siendo la suma de las proyecciones de todas las fuerzas exteriores de acuerdo a la ecuación 3:

$$\sum (F_i)_x = G_x + T_x + R_x + P_{ix} \dots \text{ ec. 6}$$

donde actúan las siguientes fuerzas:

$G_x$  = Peso del líquido

$T_x$  = Fuerza de Fricción en el lecho del Canal

$R_x$  = La Fuerza de reacción de las paredes laterales, igual a la presión del flujo sobre las paredes, laterales.

$P_{ix}$  = Las fuerzas de Presión Hidráulica en las Secciones 1 - 1' y 2 - 2'.

Para un cauce prismático con fondo horizontal (  $i = 0$  ) la suma de proyección de esas fuerzas es:

$$(F_i)_x = P_1 - P_2 = \gamma_{cg1} A_1 - \gamma_{cg2} A_2 \dots \text{ ec. 7.}$$

como las proyecciones  $R_x = 0$ ,  $G_x = 0$  y la fuerza de fricción puede despreciarse, entonces sustituyendo los valores de la ecuación 5 y 7 en la ec. 3 tendremos:

$$\frac{\rho}{g} Q (V_2 - V_1) = \rho (Y_{cg1} A_1 - Y_{cg2} A_2) \dots \text{ec. 8}$$

simplificando  $\rho$  en ambos términos:

$$\frac{QV_1}{g} + Y_{cg1} A_1 = \frac{QV_2}{g} + Y_{cg2} A_2 \dots \text{ec. 9.}$$

expresando en la ecuación 9, la velocidad en función del gasto,  $V_i = Q/A_i$ ; tendremos la ecuación principal del salto hidráulico perfecto en un canal prismático:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + Y_{cg1} A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + Y_{cg2} A_2 \dots \text{ec. 10}$$

La ecuación 10 nos permite, conociendo un tirante conjugado del Salto Hidráulico, hallar el otro.

Función del Salto y su Diagrama.

El primero y segundo término de la ec. 10 son de igual estructura y para el gasto y tipo de flujo, están en función del tirante, es decir:

$$M_1 = M_2 \dots \text{ec. 11}$$

$$M_1 = \frac{Q^2}{gA_i} + Y_{cgi} A_i \dots \text{ec. 12}$$



La ecuación 12 se llama función del Salto.

Los tirantes  $Y_1, Y_2$  son los tirantes conjugados del Salto - Hidráulico.

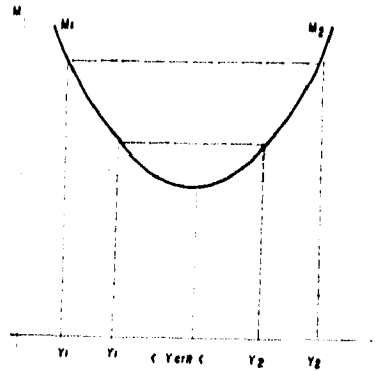


FIG. 4

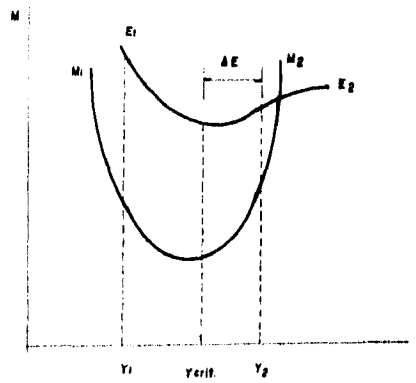


FIG. 5

Para el flujo de cualquier sección se puede construir en base a la ecuación 12, el diagrama de la función del Salto, (fig. 4). Conociendo el gasto  $Q$ , se pueden determinar con este propósito - una serie de valores de la función del Salto para diferentes  $Y$ . Generalmente el cálculo se efectúa en forma tabular, como se indica a continuación:

$Y$ (m)	$B$ (m)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$Y_{cg} \cdot A$ (m <sup>3</sup> )	$Q^2/gA$ (m <sup>3</sup> )	$M=Q^2/gA+Y_{cg}A$
------------	------------	--------------------------	---------------------------------------	-------------------------------	--------------------

Valiéndose del diagrama expuesto en la fig. 4, se puede determinar a partir del tirante conocido del Salto Hidráulico, por ejemplo, con el valor de  $Y_1$  se obtiene el valor de  $Y_2$ , interceptando el ramal  $M_1$  a la izquierda con el ramal  $M_2$  a la derecha.

El valor mínimo de la función del Salto en régimen crítico será:

$$\left( \frac{Q^2}{gA^3} B \right) = 1 \quad \dots \text{ec. 13.}$$

o bien

$$\left( \frac{V^2}{gA} B \right) = 1 \quad \dots \text{ec. 14.}$$

Si analizamos un canal rectangular donde la sección es  $A=BY$ , nos queda:

$$\frac{V^2}{gY} = 1 \quad \dots \text{ec. 15.}$$

Finalmente el tirante crítico, será:

$$Y_{\text{crit}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad \dots \text{ ec. } 16$$

lo que conduce a la relación:

$$\frac{q^2}{g Y_{\text{crit}}^3} = 1 \quad \dots \text{ ec. } 17$$

De esta manera la función del Salto M, tiene un mínimo con la ecuación para el tirante crítico de la corriente, su ramal izquierda ascendente  $M_1$  corresponde a la zona del Estado Supercrítico del flujo,  $Y_1 < Y_{\text{crit}}$  antes del Salto y el ramal derecho descendente  $M_2$ , corresponde a  $Y_2 > Y_{\text{crit}}$ , después del Salto.

Si el diagrama de la función del Salto M coincide con el diagrama de la energía específica del flujo E, expuesto en la -- fig. (5) entonces, haciendo uso de tal diagrama combinado se - pueden determinar las pérdidas de Energía  $\Delta E$ , del flujo durante la formación del Salto Hidráulico.

FORMULA PARA EL CALCULO DE LOS TIRANTES CONJUGADOS EN UN CANAL RECTANGULAR.

Para el canal prismático de Sección transversal rectangular  $A=BY$ , con el fondo horizontal ( $i=0$ ), la ecuación principal del Salto Hidráulico:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + Y_{c1} A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + Y_{c2} A_2 \quad \dots \text{ ec. } 18$$

se puede transformar en:

$$\frac{Q^2}{gBY_1} + \frac{Y_1^2 B}{2} = \frac{Q^2}{gBY_2} + \frac{Y_2^2 B}{2} \quad \dots \text{ ec. 19}$$

donde:

$$\frac{Y_1}{2} = Y_{cg1} \quad \text{y} \quad \frac{Y_2}{2} = Y_{cg2}$$

Simplificando B y considerando que  $q = \frac{Q}{B}$  tendremos:

$$\frac{q^2}{gY_1} + \frac{Y_1^2}{2} = \frac{q^2}{gY_2} + \frac{Y_2^2}{2} \quad \dots \text{ ec. 20}$$

haciendo transformaciones:

$$\frac{2q^2}{g} = Y_1 Y_2 (Y_1 + Y_2) \quad \dots \text{ ec. 21}$$

Resolviendo la ecuación cuadrática anterior tendremos la fórmula para el cálculo de los tirantes conjugados del Salto Hidráulico:

$$Y_1 = \frac{Y_2}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8q^2}{gY_2^3}} - 1 \right) \quad \text{o bien}$$

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8q^2}{gY_1^3}} - 1 \right) \quad \dots \text{ ec. 22}$$

tomando en cuenta la ecuación 16, la ecuación 22, se puede expresar, como:

$$Y_1 = \frac{Y_2}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \left( \frac{Y_{crit}}{Y_2} \right)^3} - 1 \right) \quad \text{o bien}$$

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \left( \frac{Y_{crit}}{Y_1} \right)^3} - 1 \right) \quad \dots \text{ ec. 23}$$

En el análisis de Saltos Hidráulicos en canales prismáticos no rectangulares, no hay ecuaciones análogas, en tales casos la ecuación general puede resolverse por tanteos, pero también se pueden emplear aproximaciones semiempíricas y otras técnicas analíticas.

#### DETERMINACION DE LA LONGITUD DEL SALTO HIDRAULICO.

La longitud del Salto Hidráulico se determina experimentalmente, expresando en partes de la altura, los Tirantes Conjugados y la Energía Cinética de la corriente.

Dentro del tema referente a la determinación de la longitud del Salto Hidráulico, su determinación es experimental, mencionaremos algunas fórmulas:

$$l_s = 2.5 (1.9 Y_2 - Y_1) \quad \text{N.N. Pavlosky}$$

$$l_s = 10.3 Y_1 \left( \sqrt{\frac{Y_{crit}}{Y_1}} - 1 \right) \quad \text{M.D. Chertodsov}$$

$$l_s = 3.6 Y_2 \left( 1 - \frac{Y_1}{Y_2} \right) \left( 1 + \frac{Y_1}{Y_2} \right)^2 \quad \text{Schaumiam}$$

#### CONDICIONES DE LA CDNJUGACION DE LAS CORRIENTES AGUAS ABAJO.

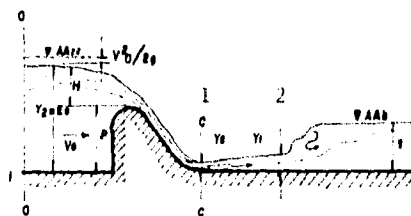
Para un flujo estable del Agua ( $Q=\text{cte.}$ ) por el vertedor se presenta un aumento de la Velocidad  $V_1$  y disminución del -

tirante del flujo  $Y_i$ . Estas magnitudes están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$Q' = V_i Y_i \quad \dots \text{ ec. } 24$$

Siendo  $Q'$  el gasto específico del agua que pasa por lm. de ancho del Vertedor.

La Energía específica potencial del flujo Aguas arriba ( $v \geq 0$ ) se transforma durante el movimiento del flujo por el vertedor, en Cinética, que alcanza su valor máximo en la Sección contraída, como muestra la siguiente figura:



**FIG. 6 .a**

Siendo:

$$E_c = Y_c + \frac{V_c^2}{2g} \quad \dots \text{ ec. } 25$$

donde:

$E_c$  = Energía Cinética.

$Y_c$  = Profundidad de la corriente en la Sección contraída (c-c')

$V_c$  = Velocidad de la corriente en la Sección contraída (c-c')

El posterior comportamiento del flujo depende de la reserva de Energía y de las condiciones del flujo aguas abajo.

El Salto Hidráulico no se forma si la pendiente del canal aguas abajo es mayor que la crítica:

$s > s_{crit}$  y la profundidad normal

$t < Y_{crit}$

Para  $t > Y_{crit}$  es posible la formación de las 3 formas de Salto Hidráulico.

Salto Hidráulico desplazado si  $Y_2 > t$  (fig. 6.a)

Salto Hidráulico normal si  $Y_2 = t$  (fig. 6.b)

Salto Hidráulico ahogado si  $Y_2 < t$  (fig. 6.c)



FIG. 6.b

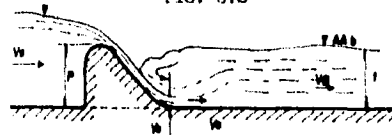


FIG. 6.c

## C A P I T U L O    I I

### SALTO HIDRAULICO EN CANALES CON PENDIENTES VARIABLES

En este capítulo presenta un extenso reanálisis del problema de la formación del Salto Hidráulico en canales con pendiente. El problema general estará dividido en 4 pasos denotados saltos A, B, C y D.

Se hará uso de una gráfica para fijar los Saltos A, B, C y D. Para el Salto C, se dará una forma simple de igualar la ecuación de Kindsvater con la ecuación de momento de Belanger. Se utilizan 2 métodos para la localización de los Saltos, el primero - cuando el flujo tiene terminación supercrítica y el otro cuando la terminación no es supercrítica. La pérdida de Energía se analizará para saltos con pendiente. Finalmente se demostrará la pérdida de Energía relativa en función del No. de Froude y la pendiente.

#### 11.1. Caso de disminución de Pendiente.

De acuerdo a la información sobre la formación de saltos en canales horizontales y saltos en canales con pendientes, se ha comprobado que este último es preferible para la disipación de Energía, siendo su primera ventaja contra el Salto Hidráulico



en Canales horizontales que el movimiento longitudinal del Salto en canales con pendiente puede realizarse dentro de límites reducidos para varios niveles de descarga de agua. Segundo, --- mientras la provisión del canal horizontal requiere mucha excavación, el canal con pendiente en este mismo aspecto es más --- económico. Tercero, en el canal horizontal se podría presentar un salto ahogado, perdiendo eficacia como disipador de Energía, sin embargo en canales con pendiente, las pérdidas de Energía debido a la fricción y otros accesorios son menores, aunque hay el riesgo de un salto desplazado.

Mientras el caso clásico del Salto Hidráulico (Salto en canales con sección rectangular) tiene una solución precisa, en canales con cambio de pendiente no es posible el desarrollo de una solución precisa, la principal dificultad es que la ecuación de momento esta definida para la dirección paralela al lecho del Canal y la componente del peso del cuerpo del Salto es aproximada. Si, por otra parte, está definida en la dirección horizontal, la componente horizontal de la presión sobre el piso es aproximada. Por lo antes expuesto el Salto Hidráulico en canales con pendiente tiene un fundamento semiempírico, no pudiendo ser calculado sobre las condiciones iniciales.

#### II.1.1. Estudio de N. Rajaratnam.

Para el desarrollo de una solución, se dividió el caso general de la formación de saltos en canales con pendiente en función

de las características principales de cada caso. En el primer caso, el salto se forma en un canal con pendiente que sufre un cambio a canal horizontal, para este caso existen 4 tipos posibles de saltos (Fig. 7), estos saltos se deben a estudios de -- Kindsvater.

Como se observa en la figura 7,  $Y_1$  es el tirante antes del salto, en flujo supercrítico, medido normal al lecho del canal y  $Y_2$  es el tirante vertical subcrítico al final del mismo.

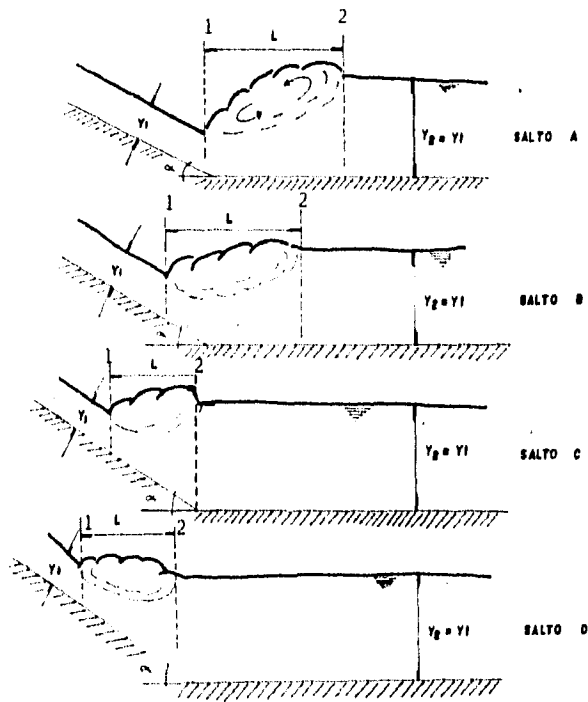


FIG. 7

Respecto al final del salto en canales horizontales es generalmente aceptado que la zona final del salto es la sección donde se fijará el máximo tirante. Este concepto no es válido para el salto Hidráulico en canales con pendiente ya que después de la acción del salto la superficie del agua es posible que ascienda debido a la expansión del fluido por la inclinación del lecho. Como una buena alternativa, el final de la superficie del salto, está indicado como la terminación del Salto por Kindsvater. Hickox estableció que para pendientes entre el 1% y 6%, el final de la onda es prácticamente igual a la sección de máximo tirante.

Al respecto del factor de corrección de la Energía de Coriolis del tirante al final de la onda para los saltos sobre pendientes de 1% a 6%, Kindsvater fundamenta que dicho coeficiente ( $\beta$ ) es muy cercano a la unidad. Para fines de cálculo en este estudio se consideró el fin de la onda del salto como el fin del salto en canales con pendiente.

En la figura (7),  $Y_t$  es el tirante de descarga y  $L$  la longitud del salto medida horizontalmente. Con el fin de simplificar, se asumió el tirante de la corriente supercrítica como constante sobre la pendiente. Si el salto ocurre justo al final de la pendiente como muestra la figura 7, se denomina Salto "A", que es el Salto Clásico y el tirante de descarga  $Y_t$  se determina igual que el tirante Subcrítico  $Y_2^*$  por medio de la ecuación de Belanger:

$$\frac{Y_2^*}{Y_1} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + 8 (F_1)^2} - 1 \right\} \quad \dots \text{ec. 26.}$$

Donde  $F_1$  es el número de froude Supercrítico. Si  $Y_1 > Y_2$  el Salto es empujado sobre la pendiente. Por otra parte, si el final del salto se ubica justo en el cambio de pendiente será el Salto C. Si el principio del Salto es sobre la pendiente y su terminación sobre el piso horizontal se trata del Salto B. Finalmente si el salto termina sobre la pendiente se trata del salto D.

Los cuatro casos más conocidos del Salto Hidráulico se describen a continuación:

- 1) Los cuatro saltos A, B, C y D, son los más importantes en relación con el diseño de disipadores de Energía, (fig. 7).
- 2) Otro tipo de salto ocurre en una parte de la longitud del Canal horizontal. En este caso el agua superficial es paralela al lecho antes y después del salto, aquí  $Y_1$  y  $Y_2$  son medidas normales al lecho del canal, este será llamado Salto E, (fig. 8).
- 3) Este salto se da sobre una pendiente adversa y será llamado Salto F, (fig.8), es muy poco común y ocurre al final de ciertos tipos de Canales pendiente abajo y caídas.

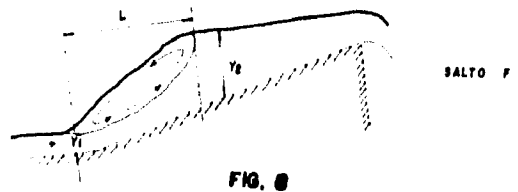
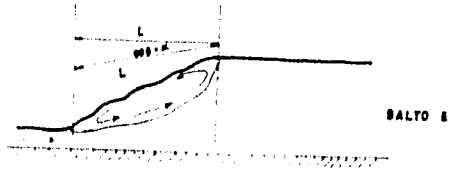


FIG. 8

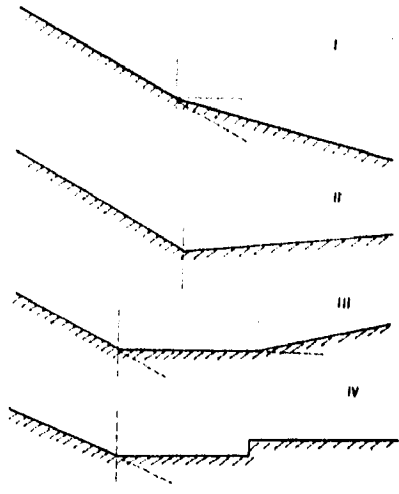


FIG. 9

4) Comprende todas las posibles combinaciones que se muestran en la figura 9), en este caso, la fuerza del salto se forma en alguna parte del canal y bajo tales circunstancias es muy difícil de analizar.

Saltos A, B, C y D.

Una solución racional para el salto C, fue desarrollada por Kindsvater, como se presenta a continuación. Refiriéndose a la fig. 7, las secciones 1-1' y 2-2' definen el cuerpo del salto, en esas condiciones la ecuación de momento será:

$$P_1 - P_2 + P = M_2 - M_1 \quad \dots \text{ec. 27}$$

donde:

$P_1, P_2$  = Son las presiones horizontales sobre sus respectivas secciones.

$P$  = Es la componente Horizontal de reacción ejercida sobre el salto.

$M_1, M_2$  = Son los momentos respectivos proporcionales en la dirección horizontal.

Basados en las mediciones experimentales de Backmeteff y ---  
 Matzke, se puede determinar la distribución de presión hidros-  
 tática en las 2 secciones y  $P$ , como sigue:

$$P_1 = \frac{\gamma(Y_1)^2}{2 \cos^2 \alpha} \quad , \quad P_2 = \frac{\gamma(Y_2)^2}{2} \quad y$$

$$P = \left\{ 2K \frac{\gamma(Y_2)^2}{2} - \frac{\gamma(Y_1)^2}{2 \cos^2 \alpha} \right\} \tan \alpha$$

así también los momentos serán:

$$M_1 = \frac{q^2 \gamma}{g Y_1} \cos \alpha \quad y \quad M_2 = \frac{q^2 \gamma}{g Y_2}$$

donde:

- $\gamma$  = Peso específico del Agua.
- $K$  = Constante Emprica.
- $q$  = Intensidad de descarga.
- $g$  = Aceleración de la Gravedad.

Sustituyendo las anteriores ecuaciones en la ec. 27 y simpli-  
 ficando se obtiene la ecuación final;

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2 \cos \alpha} \left\{ \sqrt{1 + 8 F_1^2 \frac{\cos^3 \alpha}{1 - 2 K \tan \alpha}} - 1 \right\} \quad \dots \text{ ec. 28.}$$

Para esta investigación Bradley y Peterka fundamentaron que K está en función de la pendiente y puede ser considerada satisfactoriamente independiente de No. de froude  $F_1$ , reescribiendo se la ec. 28, como:

$$\frac{Y_2}{Y_1 / \cos \alpha} = \frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + 8 G_1^2} - 1 \right\} \quad \dots \text{ ec. 29}$$

donde  $Y_1$  es el tirante vertical supercrítico antes del salto y:

$$(G_1)^2 = (\Gamma_1)^2 (F_1)^2 \quad \dots \text{ ec. 30}$$

donde:

$$(\Gamma_1)^2 = \frac{\cos^3 \alpha}{1 - 2K \tan \alpha} \quad \dots \text{ ec. 31}$$

La variación de  $\Gamma_1$  con  $\alpha$  se muestra en la fig. 10 y la relación se puede dar en una simple expresión;

$$\log_{10} \Gamma_1 = 0.027 \alpha \quad \dots \text{ ec. 32}$$

con  $\alpha$  en grados.



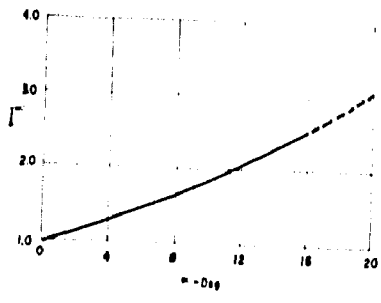


FIG. 10

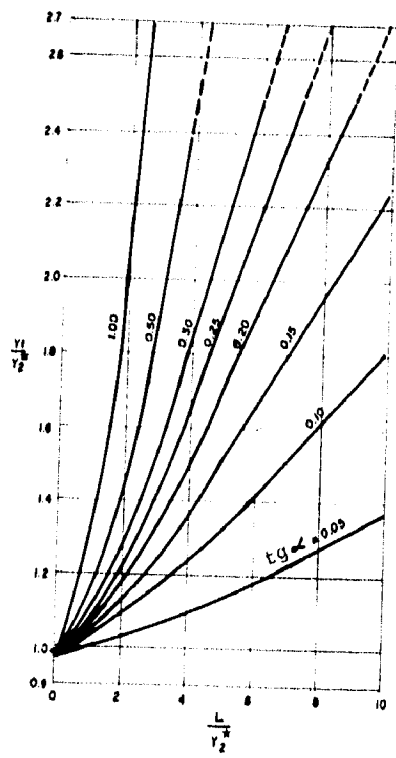


FIG. 11

La Gráfica que representa la relación expresada en la ec. 32 se observa en la fig. 10.

Otra ecuación para el Salto C con  $Y_1 = Y_2$ , es:

$$\frac{Y_t}{Y_1} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + 8 G_1^2} - 1 \right\} \quad \dots \text{ ec. 33}$$

En base a los experimentos de Bradley y Peterka se desarrollo la ecuación 29 para el Salto C y para el Salto D no ha sido posible desarrollar una forma simple, sin embargo Bradley y Peterka lograron una gráfica, fig. 11, que tiene curvas que varían de  $\tan \alpha = 1.0$  y  $\tan \alpha = 0.05$ , donde el eje de las abscisas representa  $\lambda / Y_2^*$  y las ordenadas  $Y_t / Y_2^*$  siendo:

$Y_t$  = Tirante Vertical Subcritico al final del Salto.

$Y_2^*$  = Tirante Subcritico del Salto Clásico dado por la ecuación 26.

$\lambda$  = Distancia horizontal de la punta del Salto B a la junta de la Sección.

Determinación del Tipo de Salto y su Localización.

Para la determinación del salto será necesario conocer la pendiente, el tirante de descarga y las condiciones del flujo supercrítico. Con el fin de simplificar el cálculo del Salto - - Hidráulico de una corriente Supercritica, se considera constante la pendiente, esta suposición se aproxima a las condicio-

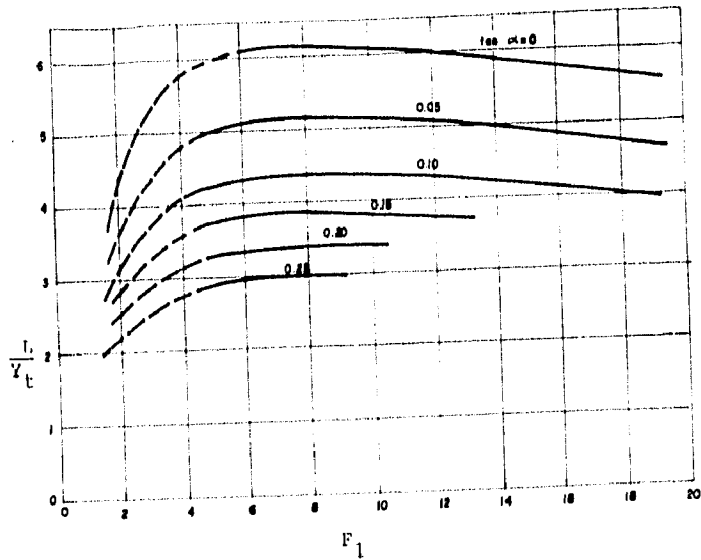


FIG. 12

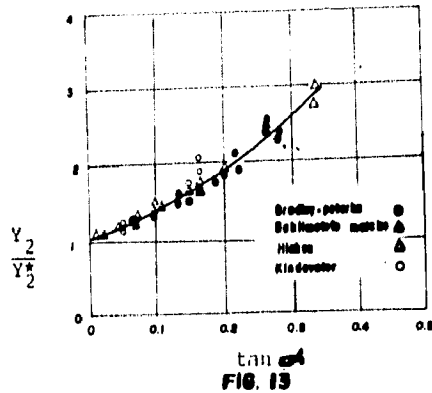


FIG. 13

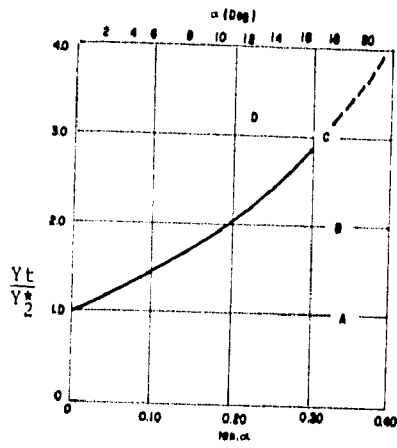


FIG. 13-A

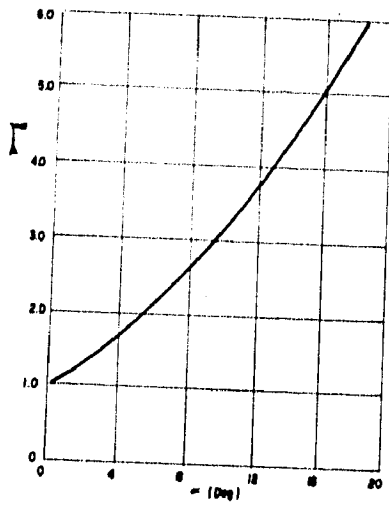


FIG. 14

nes reales del flujo de dicho salto. Puede comprobarse que para el salto A, si  $Y_t < Y_2^*$ , el salto será corriente abajo. Si  $Y_t > Y_2^*$  se forman los saltos B, C y D, de estos tres se puede comprobar el salto C haciendo uso de la ecuación 29. Si  $Y_t < Y_2$  se forma el salto B y si  $Y_t > Y_2$  se forma el salto D. Si  $Y_t = Y_2$  se trata del Salto C.

$$Y_t = Y_2 + l' \tan \alpha \quad \dots \text{ ec. 34}$$

siendo  $l'$  = la distancia horizontal del fin del salto de cambio de pendiente del Canal.

Usando la ec. 34,  $l'$  puede calcularse y usando la fig. 12, quedará el salto localizado en función de la pendiente. Este procedimiento para fijar el tipo de salto puede determinarse con una simple gráfica, dividiendo la ec. 26 entre la ec. 29.

$$\frac{Y_2}{Y_2^*} = \frac{1 + \sqrt{1 + 8 G_1^2} - 1}{\cos \alpha \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1} \quad \dots \text{ ec. 35}$$

En la fig. 13 se relacionan  $\frac{Y_2}{Y_2^*}$  con  $\text{tg} \alpha$ . Para los saltos C y D los puntos quedan por debajo de esta curva. El Salto A será definido por la línea  $\frac{Y_2}{Y_2^*} = 1$ . Con el fin de simplificar se considera el tirante supercrítico constante sobre la pendiente, pero hay casos en ciertos canales y caldas de pendiente, donde la corriente supercrítica será acelerada, esta situación se analizará de la siguiente forma:

Primero asumiendo nulo el salto sobre la pendiente obtendremos el perfil de la corriente supercrítica antes del salto. Como una primera aproximación la pérdida de energía en el salto será omitida.

Si el tirante  $Y_t$  es mayor que el tirante requerido para el salto A, se presentarán los saltos B, C ó D.

La revisión del Salto C se hará usando una relación de tipo inverso:

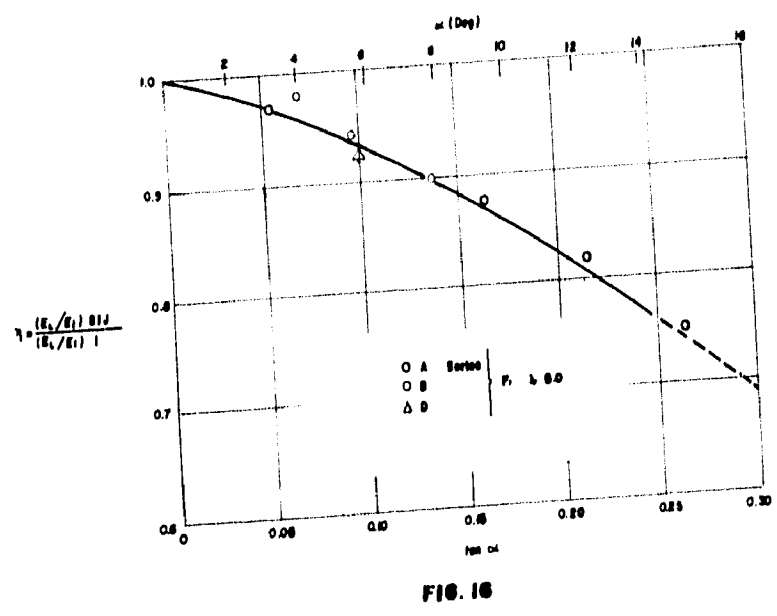
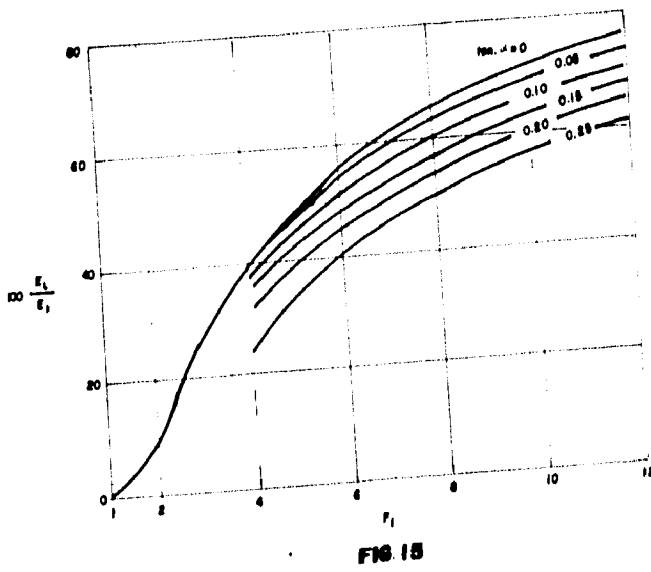
$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{Y_1}{Y_t} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + 8 G_2^2} - 1 \right\} \quad \dots \text{ ec. 36}$$

donde:

$$(G_2)^2 = (\Gamma_2)^2 F \quad \dots \text{ ec. 37}$$

$$(\Gamma_2)^2 = \frac{1}{1 - 2 K \tan \alpha} \quad \dots \text{ ec. 38}$$

La Variación de  $\Gamma_2$  con  $\alpha$  se muestra en la fig. 14, usando la ecuación 36 para determinar el tirante de descarga,  $Y_1'$  y  $Y_1$ , se podrá calcular  $F_1$  y  $L$ . El valor de  $F_1$  al pie del Salto se utiliza para calcular la longitud  $L$  y si  $F_1$  es igual al valor calculado se trata del Salto C. Si por otra parte  $F_1$  actual es mayor que  $F_1$  calculado se forma el Salto B, así también si  $F_1$  actual es menor que  $F_1$  calculado será el Salto D. El anterior procedimiento es muy laborioso, por lo que un método más simple es presentado más adelante.



PERDIDA DE ENERGIA DE SALTOS EN UN CANAL CON PENDIENTE.

Considerando primero el Salto C, refiriéndonos a la fig. 7, tomando el nivel del piso horizontal al final del salto como dato, la energía total para la sección aguas arriba será:

$$E_1 = L \tan \alpha + \frac{Y_1}{\cos \alpha} + \frac{V_1^2}{2g} \quad \dots \text{ec. 39}$$

con el fin de simplificar y como una aproximación, tomando

$$Y_1 = \frac{Y_1}{\cos \theta} \quad \text{La ecuación 39, se reescribirá como:}$$

$$E_1 = L \tan \alpha + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad \dots \text{ec. 40}$$

La Energía total al fin del Salto es:

$$E_2 = Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \dots \text{ec. 41}$$

La Pérdida de Energía será:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad \dots \text{ec. 42}$$

La Pérdida de Energía relativa, será en función del No. de Froude:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{\left(1 - \frac{Y_2}{Y_1}\right) + \frac{1}{2} (F_1)^2 \left\{1 - \left(\frac{1}{(Y_2/Y_1) \cdot 2}\right)\right\} + \tan \alpha \left(\frac{L}{Y_2}\right) \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)}{1 + \frac{(F_1)^2}{2} + \tan \alpha \left(\frac{L}{Y_2}\right) \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)} \quad \dots \text{ec. 43}$$

$$= \frac{\left(1 - \frac{Y_2}{Y_1}\right) + \frac{1}{2} (F_1)^2 \left\{1 - \left(\frac{1}{(Y_2/Y_1) \cdot 2}\right)\right\} + \tan \alpha \left(\frac{L}{Y_2}\right) \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)}{1 + \frac{(F_1)^2}{2} + \tan \alpha \left(\frac{L}{Y_2}\right) \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)}$$

$$= f \left\{ F_1, \tan \alpha \right\}$$



Para evaluar la ecuación 43 se calculará  $L$  por la fig. 12.

Si analizamos la figura 15 la información para determinar el Número de Froude menor a 4 es escasa debido a que la información para  $L/Y_2$  no es muy extensa. Además es notable como  $E/E_1$ , se vuelve muy sensible a una variación de  $L/Y_2$ . Es claro que para un cierto Número de Froude la pérdida de Energía relativa decrece conforme se incrementa la pendiente.

Para demostrar el efecto de la pendiente sobre la energía relativa. Si  $\eta$  es definida como la eficiencia de la pérdida de energía relativa en un salto en canales con pendiente. Siendo  $F$  el número de Froude y la pendiente  $\tan \alpha$ , reanalizando la fig. 15 se encontrará que para un  $F_1 > 5$   $\eta$  es independiente de  $F_1$  y depende únicamente de la pendiente. La Variación de  $\eta$  con  $\tan \alpha$  se muestra en la figura 16 se observa que para  $\eta = 1.0$ ,  $\tan \alpha = 0$  y se aproxima a 0.7 para  $\tan \alpha = 0.30$ . se observa que la figura 16 puede aplicarse al Salto D, así mismo el Salto B se demuestra que:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{\left\{ 1 - \frac{Y_t}{Y_2^*} \frac{Y_2^*}{Y_1} \right\} + \frac{F_1^2}{2} \left\{ 1 - \left( \frac{Y_1}{Y_2^*} \frac{Y_2^*}{Y_t} \right)^2 \right\} + \left( \frac{L}{Y_2^*} \frac{Y_2^*}{Y_t} \tan \alpha \right)}{1 + \frac{(F_1)^2}{2} + \left( \frac{L}{Y_2^*} \frac{Y_2^*}{Y_2} \tan \alpha \right)} \quad \dots \text{ ec. 44}$$

$$\text{si } \epsilon = \frac{(\Delta E/E_1)_B}{(\Delta E/E_1)_C} \quad \dots \text{ ec. 45}$$

refiriéndonos al Salto B y C respectivamente, se ve que:

$$\epsilon = \epsilon (\alpha, F_1, L/L) \quad \dots \text{ ec. 46}$$

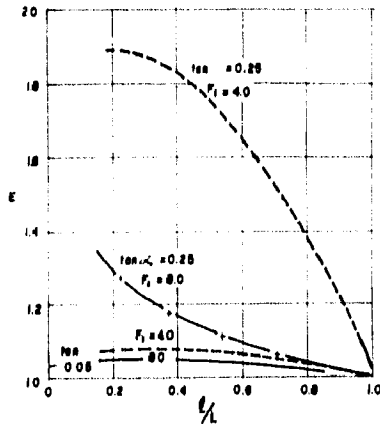


FIG 17

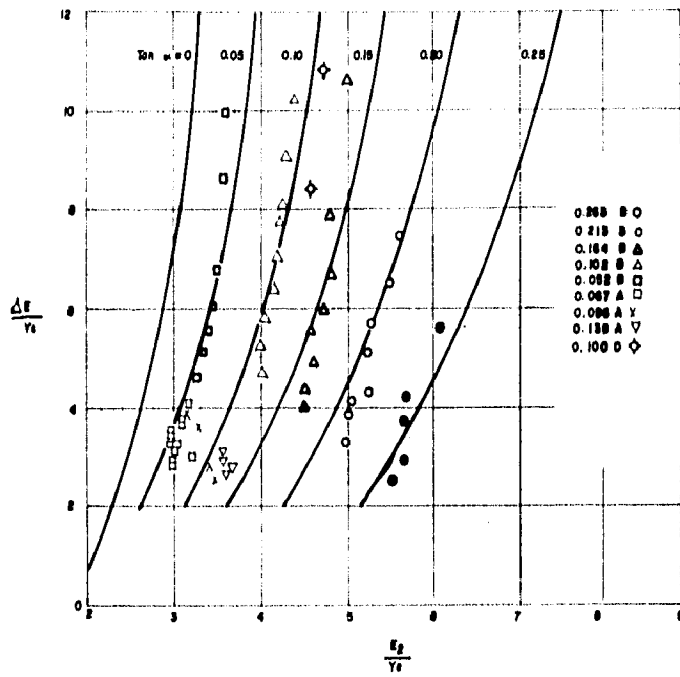


FIG 18

La gráfica de la Ecuación (46), se muestra en la figura 17 ( $\mathcal{E}$  contra  $L/L$ ) para algunos valores de  $F_1$  y  $\tan\alpha$ . Se observa que  $F_1$  y  $\tan\alpha$  decrecen gradualmente conforme  $L/L$  se acerca a la unidad.

#### METODO ALTERNATIVO PARA FIJAR EL SALTO D.

En el caso de Saltos por cambios de pendiente, el método es particularmente simple. Primero asumimos que la línea de energía de la corriente aguas arriba es horizontal, también se supone que la línea de energía en la corriente del canal aguas abajo es horizontal. Entonces, para fines prácticos,  $\Delta E$  puede conocerse inmediatamente, esto se basa en que  $\Delta E/Y_c$  es una función de  $\Delta E/Y_1$ , únicamente para determinada pendiente donde  $Y_c$  es el tirante crítico. Las Curvas  $\Delta E/Y_2$  contra  $E_2/Y_c$  fueron desarrolladas en la ecuación 44 y se muestra en la figura (18) donde se indican los resultados de Bradley y Peterka. Para un determinado problema  $\Delta E$ ,  $q$ ,  $Y_c$ ,  $\Delta E/Y_c$  y  $\tan\alpha$  deben ser considerados. Basados en la figura (18) calculamos  $E_2/Y_c$  y por lo tanto se obtiene  $E_2$ .

## II.2 Caso de Aumento de Pendiente.

### II.2.1. Estudios de N. Rajaratnam.

#### Salto Tipo F.

Este salto es muy raro, ocurre sobre la pendiente inversa, antes de que se presente el declive. Para un estudio preliminar sobre una pendiente adversa, en 1 y 10, el autor estableció que era extremadamente difícil lograr el salto sobre la pendiente.

## II.3 Caso de Pendiente Constante.

#### Salto tipo E.

El Salto tipo E se considera que ocurre en un lugar del canal horizontal. Por lo regular es una ecuación teórica, con el uso de coeficientes empíricos en una serie de ensayos. Con referencia a la figura 8, se puede demostrar que la relación entre tirantes está dada por:

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + 8 F_1^2 \left( \frac{1}{1 - (K'x \text{ Sen } \alpha)} \right) - 1} \right\} \dots \text{ec. 47}$$

donde:

$$\frac{1}{x} = \frac{Y_2 - Y_1}{L/\text{Cos } \alpha} \dots \text{ec. 48}$$

siendo  $K'$  un factor empírico.

La ecuación 47 puede ser reescrita como:

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + 8 (N_1)^2} - 1 \right\} \quad \dots \text{ ec. 49}$$

donde:

$$N_1 = F_1 \psi_1 \quad \dots \text{ ec. 50}$$

siendo

$$\psi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - K'_x \text{ Sen} \alpha}} \quad \dots \text{ ec. 51}$$

La forma de la Ecuación fue publicada por Kennison en 1944 y luego reducida por Chow y Argyropoulos.

Para hacerla más simplificada se asume  $K'$  como la unidad y la variación de  $\psi_1$  con  $\alpha$  para tres valores de  $X$  como se muestra en la figura (19), esto es válido para muy pequeños valores de  $\alpha$ ; por lo tanto la Variación de  $X$  sobre  $\psi_1$  debe ser tomada en cuenta. Una vez que  $\psi_1$  es calculada correctamente se pueden calcular fácilmente los tirantes del Salto E, usando la Gráfica de la Ecuación de Momento de Belanger.

Ecuaciones generalizadas para este Salto en canales fueron desarrolladas por Argyropoulos, este mismo condujo estudios experi-

mentales sobre saltos en canales con pendiente, con Sección parabólica y triangular. Para el Canal parabólico las pendientes estudiadas fueron 0.005, 0.010, 0.020 y 0.030 y el máximo número de Froude, fue más o menos 5, además fundamento que en este rango  $X$  varía de 4.5 a 8.5. Para el canal triangular las pendientes fueron 0.005, 0.010, 0.014 y 0.020, el máximo Número de Froude fue alrededor de 5 y fue este el argumento para establecer que  $X$  varía de 3 a 5. Habrá que considerar que la Sección parabólica y triangular son poco prácticas.

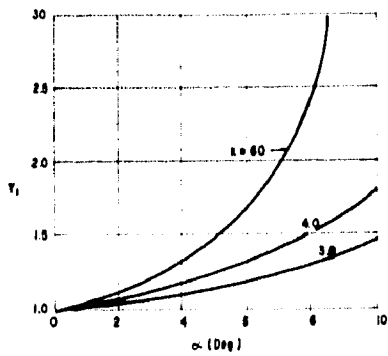


FIG. 19

## NOTACIONES

- $Y_1$  = Tirante supercrítico antes del Salto.  
 $Y_2$  = Tirante subcrítico después del Salto.  
 $\beta$  = Factor de Corrección de la Energía de Coriolis.  
 $L$  = Longitud del Salto.  
 $\alpha$  = Angulo de la pendiente.  
 $Y_2^*$  = Segundo Tirante Subcrítico.  
 $F_1$  = Número de Froude.  
 $P$  = Presión Horizontal.  
 $M$  = Momento.  
 $\gamma$  = Peso específico del Agua.  
 $q$  = Intensidad de descarga.  
 $g$  = Aceleración de la Gravedad.  
 $l'$  = Distancia horizontal del fin del Salto al cambiar de pendiente del Canal.  
 $\Delta E$  = Pérdida de Energía.  
 $E$  = Energía del flujo.  
 $\eta$  = Eficiencia de la pendiente Energía Relativa.  
 $Y_c$  = Tirante crítico.  
 $K'$  = Factor Empírico.  
 $B$  = Ancho del canal rectangular.



## C A P I T U L O    I I I

### SALTO HIDRAULICO EN CANALES CON SECCION VARIABLE

#### III.1 Caso de Ensanchamiento.

En el presente estudio el Salto Hidráulico será analizado en canales rectangulares, horizontales y no prismáticos. Se ha hecho una distinción entre dos casos, que más adelante se mencionaran. Se analiza también la relación de tirantes en función del Número de Froude, y la relación de anchos del canal, así como la disipación de energía relativa y las características de la longitud de onda del salto. Los resultados son presentados en términos de valores de diseño cuyo fin es facilitar una aplicación simple en la práctica de la hidráulica.

Los tanques amortiguadores son el dispositivo usual para la disipación de energía en obras hidráulicas conforme a los diferentes funcionamientos que se presentan en la práctica. Su geometría no sólo depende de los aspectos hidráulicos sino de los topográficos, geológicos y económicos.

El tanque amortiguador más simple consiste en un canal prismático, rectangular y casi horizontal, para el cual la fórmula de Belanger puede ser aplicada para calcular la relación de tirantes conjugados, en las zonas de aguas arriba y aguas abajo del Salto Hidráulico. No obstante, este tipo de tanques adolece

de estabilidad hidráulica por el hecho de que en un nivel relativamente alto de corriente aguas abajo es necesario garantizar una transición apropiada del flujo supercrítico al subcrítico y además la estabilidad del salto es relativamente pobre.

Estas desventajas han conducido a crear disipadores más eficientes, pueden mencionarse las variantes de fondos de canal (escalones negativos y positivos), trampas y canal divergente.

Cuando se analizan los saltos hidráulicos en canales no prismáticos se debe hacer una distinción para los flujos que no son separados de las paredes laterales de los canales y para los que si lo son. El primer tipo ocurre con ángulos de divergencia pequeños (ampliación gradual), mientras en el segundo puede sufrir un abrupto cambio (ampliación súbita).

Los Saltos Hidráulicos en divergencia gradual son también referidos como Saltos Circulares y Radiales, estos han sido discutidos intensamente durante las dos últimas décadas.

El siguiente estudio busca establecer enfoques racionales, para saltos con canales de ampliación gradual y súbita.

III.1.1.- Estudios de W. H. Hager.

Salto Hidráulico en canales rectangulares.

Salto Hidráulico en ampliación gradual de sección.

Análisis Local.

La transición en canales se puede presentar por la variación de la pendiente (escalones positivos y negativos, bordes y trampas) y de la variación de la sección transversal (convergente y divergente). Aquí restringimos nuestras consideraciones al segundo caso en canal con variación de sección transversal de área  $A = Bh$ , en el cual  $B = B(x)$  denota el ancho del canal,  $X$  es la longitud coordenada y  $Y$  es el tirante del flujo. La geometría tiene una variación lineal del ancho  $B$ , luego  $B = b + vx$ , el cual  $b = B(0)$ , y  $v$  es la tangente del ángulo cerrado del perfil. Evidentemente, el canal converge para  $v < 0$  ó diverge para  $v > 0$  y es rectangular para  $v = 0$ .

En el canal de transición los elementos son locales, puesto que la longitud es mayor comparada al tramo del canal típico.

Es consecuencia el efecto de la fricción y la pendiente del piso puede ser despreciada por ser relativamente pequeña.

En consecuencia, la energía caída o pérdida del salto es:

$$H = Y + \frac{Q^2}{2g A^2} \quad \dots \text{ ec. } 52$$

donde:            Q = Gasto  
                      g = Aceleración de gravedad (constante).  
                      A = Area  
                      Y = Tirante del Agua

Es conveniente determinar la expresión que define la variación del ancho del canal como  $B = vx$ , donde la ec. 52 dará:

$$x = 1/(Y \sqrt{1-Y}) \quad \dots \text{ ec. } 53$$

en el cual:

$$x = \frac{\sqrt{2gv^2 H_0^3}}{Q} (x) \quad \dots \text{ ec. } 54$$

Examinando el Salto Hidráulico en un canal con transición en la Fig. (20). Entonces la ecuación ( 53) se limitará su aplicación dentro de la región del salto, pero es válido en las zonas de aguas abajo y aguas arriba de la formación del salto, por lo tanto la caída de energía es calculada de dos formas. Debido al impreciso orden de aproximación el Salto Hidráulico puede ser considerado como una discontinuidad local.

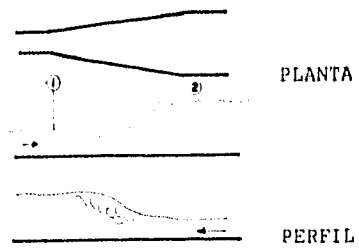


FIG 20

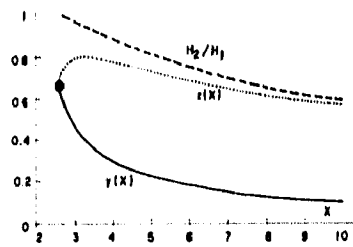


FIG 21

Para el caso en que se presenta un cambio abrupto de la corriente supercrítica de aguas arriba a la corriente subcrítica aguas abajo. Este caso particular se analizará en una dimensión, para la ecuación de momento, es decir:

$$\frac{b_1 Y_1^2}{2} + \frac{Q^2}{g b_1 Y_1} = \frac{b Y_2^2}{2} + \frac{Q^2}{g b_2 Y_2} \quad \dots \text{ ec. 55}$$

En la cual los subíndices "1" y "2" indican las secciones antes y después del Salto Hidráulico. Evidentemente, los anchos de canal para el estudio es conveniente considerarlos iguales,  $b_1 = b_2$ , entonces:

$$1 + \frac{4}{X^2 Y^3} = \frac{Z^2}{Y^2} + \frac{4}{X^2 Y^2 Z} \quad \dots \text{ ec. 56}$$

En el cual  $Z = Y_2/H$  denota el tirante conjugado aguas abajo y  $H = H_1$  es la pérdida de energía. Factorizando obtenemos:

$$X^2 Y Z (Y+Z) = 4 \quad \dots \text{ ec. 57}$$

La cual corresponde a la ecuación para tirante sucesivo del flujo,  $Z (X)$  para varios  $y$ . Eliminando  $X$  con la ecuación (53) puede expresarse como  $Z (y)$ , es decir

$$Z = \frac{1}{2} ( \sqrt{16 Y - 15 Y^2} - Y ) \quad \dots \text{ ec. 58}$$

La Fig. (21) muestra graficada a  $Y(X)$  de acuerdo a la ec. (53) y  $Z(X)$  de acuerdo a (53) y (58), hay que hacer notar que la condición para que el flujo esté en estado supercrítico es cuando  $Y < 2/3$ , y estado subcrítico cuando  $Y > 2/3$ . Esta gráfica - permite una inmediata determinación del siguiente tirante del - flujo en canales con variación lineal del ancho del canal, una vez que las condiciones  $H$ ,  $Q$  y  $V$  son prescritas.

La Fig. (21) tiene interesantes puntos a tratar:

- a) Las curvas son definidas únicamente para  $X \geq 3\sqrt{3/2} = 2.6$ ; para determinado  $H=H_1$ ,  $Q$  y  $V$ , aquí es reducido el límite para el cual el flujo es físicamente posible (condición de flujo crítico).
- b) Mientras  $Y(X)$  decrece constante, se incrementa  $X$ ,  $Z(X)$  tiene un máximo  $Z = 4/5$  en el cual  $Y = 2/5$  y  $X = 5 - - \sqrt{5/(2\sqrt{3})} \approx 3.23$ . Siendo  $F^2 = Q^2/(gB^2Y^3) = 2/X^2Y^3$  con  $F$  como Número de Froude, esta condición dará  $F = \sqrt{3}$ , el cual es el punto de transición entre el Salto Hidráulico Ordinario y el Circular.

En la práctica como muestra la Fig. (21) en este caso está limitado a  $X > 3.23$ .

c) El tirante decrece para flujos en canales divergentes pero se incrementa para canales convergentes, siempre que el flujo es supercrítico (ver Fig. 20).

d) Cuando  $X \rightarrow \infty$ ,  $Y$  es muy cercana a la unidad, por lo tanto la ecuación (53) puede ser escrita como  $Y (X \rightarrow \infty) \rightarrow 1/X$ . Eliminando  $Y (X)$  en (58) obtenemos el resultado que  $Z (X \rightarrow \infty) \rightarrow 2/\sqrt{X}$ , el siguiente tirante del flujo  $Z (X)$  decrece suavemente conforme al perfil del flujo supercrítico  $Y (x)$  así que se obtiene una gráfica asintótica.

La energía aguas abajo  $H_2$  puede ser igualada a la energía  $H_1 = H$  aplicando la ecuación de Bernoulli;

$$H_1 = Y_2 + \frac{Q^2}{2gV^2 X^2 Y_2^2} + \Delta H = H_2 + \Delta H \quad \dots \text{ec. 59}$$

en la cual  $\Delta H$  denota la pérdida de energía local del Salto Hidráulico. Calculando para la ecuación (54), esta también puede expresarse como:

$$H_2/H_1 = Z + \frac{1}{2Y^2} \quad \dots \text{ec. 60}$$

La cual se muestra en su gráfica en la Fig. (21). Usando las equivalencias del punto(d) citado anteriormente, la ecuación (60) puede reescribirse como:

$$H_2/H_1 = \frac{2}{\sqrt{X}} \left( 1 - \frac{1}{4\sqrt{X}} \right) \quad \dots \text{ec. 61}$$



La desviación entre la ecuación (60) y (61) es muy pequeña, aproximadamente 1.5 % siempre que  $x > 10$ .

#### Análisis del Salto Hidráulico.

El anterior método será utilizado a continuación para determinar aproximadamente la posición del salto. Un análisis detallado puede obtenerse en relación a la longitud  $L$  del salto.

Aplicando el teorema de momento en la dirección longitudinal, tendremos:

$$\frac{b_1 Y_1^2}{2} + \frac{Q^2}{gb_1 Y_1} + F_x = \frac{b_2 Y_2^2}{2} + \frac{Q^2}{gb_2 Y_2} \quad \dots \text{ec. 62}$$

En el cual la distribución de presiones en las dos secciones transversal "1" (aguas arriba) y "2" (aguas abajo) es considerada hidrostática y con una distribución de velocidades uniformes. Hay que hacer notar que  $F_x$  es la fuerza de presión ejercida lateralmente a las paredes del canal o sea la dirección del eje  $x$ . Evidentemente,  $F_x \sim (b_2 - b_1)$  y  $F_x \sim h_a^2$  con  $h_a$  como el promedio de tirantes entre las secciones "1" y "2".

Para la ecuación (62) es razonable asumir  $Y_a^2 = (Y_1^2 + Y_2^2)/2$  así  $F_x = (b_2 - b_1) Y_a^2/2$ , con:

$$Y = Y_2/Y_1 = \phi = b_2/b_1, \quad F_1^2 = Q^2/gb_1^2 Y_1^3 \quad \dots \text{ec. 63}$$

La ecuación (62) puede escribirse como:

$$F_1^2 = \frac{(\beta+1)(Y^2-1)\beta Y}{4(\beta Y-1)} \quad \dots \text{ ec. 64}$$

La cual representa la relación de tirantes conjugados en términos del Número de Froude  $F_1$  y la relación de anchos .

La ecuación (64) puede simplificarse a:

$$Y = \sqrt{\frac{2}{\beta+1}} (\sqrt{2} F_1 - 1/2) \quad \dots \text{ ec. 65}$$

la cual siempre nos dará valores un poco abajo que los obtenidos por la ecuación (64). Finalmente la ecuación de Belanger se fundamentó ajustando  $\beta = 1$  en la ecuación (64) (canal prismático), obteniéndose:

$$F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \quad \dots \text{ ec. 66}$$

entonces:

$$Y = \sqrt{2} F_1 - 1/2 \quad \dots \text{ ec. 67}$$

#### Variación Experimental.

De particular interés son las observaciones de Rubatta para las ecuaciones (66) y (67) quien examinó experimentalmente canales con transición de variación lineal convergente y divergentes de sección transversal rectangular. El dato in-

cluye ángulo  $-8^\circ \leq \theta \leq -4^\circ$  (convergente) y  $2^\circ \leq \theta \leq 24^\circ$  (divergente), el gasto  $16.5 \leq Q \leq 130$  lt/seg. con anchos de  $0.2 \leq b_1 \leq 0.6$  (m) y caídas de energía  $0.25 \leq H_1 \leq 0.78$  (m). En un total de 53 y 26 experimentos en canales divergentes y convergentes respectivamente, reportados a detalle. Estos están agrupados por un número adimensional característico  $\xi = Q / (v \sqrt{gH_1^3})$ , el cual tuvo valores de 0.5 y 1.0 y 2.0. Rubatta propone una relación empírica para los tirantes conjugados del flujo, la cual está basada en estas observaciones. Estos datos fueron reconsiderados para la ecuación empírica número (64).

La fig. (22) compara los resultados de Hager con los de Rubatta y se encontró una desviación extremadamente pequeña.

También son incluidos los datos obtenidos por Khalifa y - - - McCorquodale para Saltos Hidráulicos Circulares. Puede notarse que la desviación con respecto a la ecuación (64) es mayor conforme aumenta  $\beta$  y  $F_1$ .

Para la ecuación (64),  $Y$  es independiente del ángulo de divergencia,  $v$ , depende de la relación de anchos  $\beta$ . Esta tendencia se observa en la Fig. 22, siendo válida para pequeños valores de  $v$ .

Asumiendo que el perfil del flujo es lineal entre las secciones "1" y "2", el promedio de presiones sobre la pared lateral

$F_x = (b_2 - b_1) (Y_1^2 + Y_1 Y_2 + Y_2^2) / 3$ , siempre será pequeño cuando  $Y_2 > Y_1$ .

Pérdidas de Energía Relativa.

La pérdida de energía debido a un Salto Hidráulico puede estudiarse aplicando la ecuación de energía en una dimensión entre la sección "1" y "2".

$$H_1 = Y_1 + \frac{Q^2}{2gb_1^2 Y_1^3} = Y_2 + \frac{Q^2}{2gb_2^2 Y_2^3} + \Delta H \quad \dots \text{ ec. 68}$$

o por la combinación de las dos ecuaciones en la expresión (68):

$$\frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{\frac{F_1^2}{2\beta^2 Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad \dots \text{ ec. 69}$$

en la cual se relacionan  $\Delta H/H_1, Y, F_1, \beta$ . Eliminando  $Y = Y(\beta, F_1)$ .

Con la ec. (64) el resultado puede expresarse como  $\Delta H/H_1 (F_1, \beta)$  en el cual se muestra la gráfica en la Fig. (23). Se puede ver que, para determinados  $F_1, \Delta H/H_1$ , se incrementa significativamente conforme se incrementa  $\beta$ . Esto es de particular interés en el diseño, puesto que la energía cinética es considerable y puede ser disipada con un relativamente bajo número de Froude.

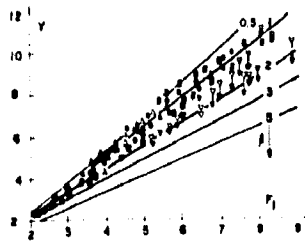


FIG. 22

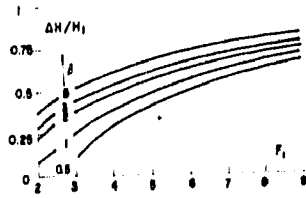


FIG. 23

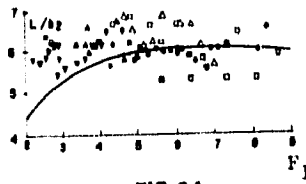


FIG. 24

La eficiencia de un Salto Hidráulico en un canal abierto con una sección transversal gradualmente variada puede analizarse por otra forma utilizando la ecuación de la relación (65). Eliminando  $Y$  en (69) obtenemos:

$$\frac{\Delta H}{H_1} = \left(1 - \frac{C_1^2}{Y_1^2} - \frac{C_2^2}{F_1^2}\right)^2 \quad \dots \text{ec. 70}$$

En el cual hay que contar que estará en un cierto orden de aproximación. Comparado a un Salto Hidráulico en canales prismáticos ( $C_1 = 1$ ), de nuevo se puede ver  $\Delta H/H_1 > 1 < \Delta H/H_1$  para  $C_1 > 1$ , siempre que  $F_1$  sea  $< 1$ .

#### Características de la Longitud.

En relación a las características del Salto Hidráulico, la longitud de la onda  $L_r$ , y la longitud del salto  $L_j$ , serán medidas al pie de Salto Hidráulico; al final de la onda es donde la velocidad promedio del flujo desaparece en la superficie, mientras el final del salto es donde la superficie de onda se acaba. Evidentemente ambos límites de la sección estarán sujetos a un juicio personal, pues no existe una definición del fin del salto aguas abajo.

Los únicos datos convincentes en relación a la longitud del salto fueron publicados por Rubatta. Una gráfica para  $L_j/Y_2$  en función de  $F_1$  es presentado en la Fig. 24. Hay que notar que la relación de anchos  $\beta$  no tiene un efecto obvio sobre la longitud relativa de salto, pero los resultados para  $\beta \neq 1$  son en algún orden de magnitud parecidos a los obtenidos para  $\beta = 1$ .

Salto Hidráulico con ensanchamiento brusco.

Un caso particular de canales con variación lineal de anchos ocurre para el ensanchamiento abrupto, es decir  $90^\circ$ ; denotaremos el ancho aguas arriba como  $b$ , y el ancho aguas abajo como  $B$ . (ver Fig. (25)). La separación del ángulo de ensanchamiento  $W = W(F_1, x)$  del flujo, no corresponde al ángulo de divergencia del canal.

Estudios de Rajaratnam y Subramanya indican que  $W$  puede ser considerada independiente de la longitud (coordenada  $x$ ), dependiendo únicamente del Número de Froude  $F_1^2$ , los resultados se muestran en la Fig. 26 y una correlación favorable con la fórmula de Herbrand (7).

$$\tan W = \frac{2 L_0 / b}{F_1^2 - 1} = 2F_1^2 / 3 \quad \dots \text{ec. 71}$$

Evidentemente el fluido se separa de las paredes laterales del canal cuando  $v > \tan(w)$ , y este es el caso que será tratado a continuación.

El tirante del fluido puede ser calculado de nuevo - - - aplicando el teorema de momento longitudinal. Asumiendo la presión hidrostática y una distribución de velocidades uniformes en las secciones aguas abajo y aguas arriba "1" y "2", resulta:

$$\frac{bY_1^2}{2} + \frac{Q^2}{gbY_1} + Fx = \frac{BY_2^2}{2} + \frac{Q^2}{gBY_2} \quad \dots \text{ec. 72}$$



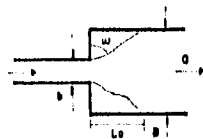


FIG. 25

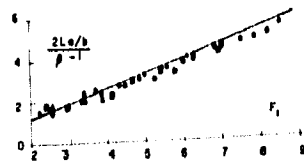


FIG. 26

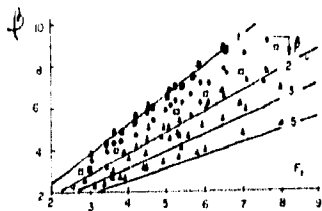


FIG. 27

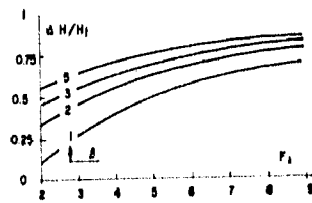


FIG. 28

En donde  $F_x$  es la fuerza de presión relativa sobre la pared lateral con longitud (B-b). Se ha demostrado experimentalmente que para ciertas condiciones del flujo aguas arriba y - aguas abajo, la configuración es como se muestra en la Fig. (25). Por lo tanto, la condición mínima es  $F_x = 0$ .

Usando la ecuación de ajuste (63), en la cual  $\beta = \frac{B}{b}$ , para este caso la ecuación (72) se convierte en:

$$F_1^2 = \frac{\beta Y(\beta Y^2 - 1)}{2(\beta Y - 1)} \quad \dots \text{ ec. 73}$$

Esta es graficada en la Fig. (27) y comparada con las observaciones de Herbrand (58) y Rajaratnam y Subramanya (65). Se puede observar que los datos de Herbrand se encuentran arriba de los datos de Rajaratnam dando mejores resultados los de éste último, de acuerdo a la ecuación (73). Esto puede explicarse cuando analizamos las posiciones de referencia por ambos estudios. Herbrand localizó el salto justo en la zona de transición  $x \approx 0$ , mientras Rajaratnam y Subramanya consideraron los saltos aguas abajo del ensanchamiento brusco  $x > L_0$ , en el cual  $x = 0$  denota la sección de transición. Por lo tanto, los datos tienen como referencia dos límites diferentes para las condiciones del flujo y la ecuación (73) puede ser simplificada considerando la expansión asintótica para  $Y \rightarrow \infty$ , resultando:

$$Y = \frac{1}{\sqrt{\beta}} (\sqrt{2} F_1 - 1/2) \quad \dots \text{ ec. 74}$$

en la cual se obtienen valores abajo de  $Y$  determinados por la ecuación (73). Para igual Número de Froude  $F_1$ , la relación de tirantes  $Y_2$  es siempre más pequeña en un ensanchamiento brusco que cuando el flujo no se separa de las paredes laterales del canal.

#### Pérdida de Energía Relativa.

La eficiencia energética de un Salto Hidráulico en un ensanchamiento brusco puede ser calculado aplicando las ecuaciones (69) y (73), siendo  $\beta = B/b$ . Una analogía de la Fig. 23 se presenta en la Fig. 28 y se observa que el ensanchamiento brusco posee substancialmente mayor disipación de energía relativa para igual  $F_1$  y  $\beta$ , cuando  $\beta > 1$ . por ejemplo: Si tenemos  $F_1 = 4$ ,  $\beta = 2$  para el cual  $H/H_1 = 0.48$  para la Fig. 23 y  $H/H_1 = 0.62$  para la Fig. 28; la disipación de energía relativa aumentó en un 30%, además hay que recordar que el efecto de  $\beta$  sobre  $H/H_1$  aparece para todo  $F_1 > 1$ , siendo un fuerte disipador de energía. Eliminando  $Y$  en la ec. (69) con la ecuación (74), la relación para la disipación de energía relativa será:

$$\frac{\Delta H}{H_1} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\beta}} \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right)^2 \quad \dots \text{ec. 75}$$

Comparado ésta con la ec. (70) y el caso en el cual  $\beta = 1$  se observará que para igual Número de Froude  $F_1$  la eficien-

cia del salto es más alta para un ensanchamiento brusco, siguiéndole el ensanchamiento gradual y finalmente el salto en un canal prismático rectangular como menor disipador de energía.

#### Características de Longitud.

Una simple descripción de la estructura interna es imposible, la longitud de la onda,  $L_r$ , y la longitud del salto,  $L_j$ , deben determinarse experimentalmente. Los resultados se caracterizan por una significativa dispersión de datos y los únicos datos válidos para saltos hidráulicos con ensanchamiento brusco son dados por Rajaratnam y Subramanya ec. (65). La Fig. (29) muestra una gráfica de valores adimensionales  $L_r/Y$ ,  $L_j/Y$  en los rangos  $1.2 \leq \beta \leq 6$ ,  $2 \leq F_1 \leq 9$ .

#### Volumen del Salto Hidráulico.

Restringiendo las consideraciones al efecto de Número de Froude  $F_1 > 3$  y seleccionados  $L_j/Y_2 \approx 6$  determinados arriba, el volumen del Salto Hidráulico  $V$  será expresado como:

$$V_j = Y_a \quad BL_j \quad \dots \text{ec. 76}$$

siendo  $Y_a$  el promedio de tirantes del salto:

$$Y_a = Y_1 + \frac{2}{3} (Y_2 - Y_1) \quad \dots \text{ ec. 77.}$$

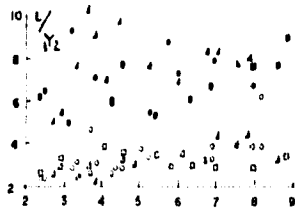


FIG. 29  $F_1$

## NOTACIONES

A	Area de la sección transversal.
b	Ancho del canal afluente.
B	Ancho de canal.
F	Número de Froude, $F = Q$ .
$F_x$	Fuerza de presión relativa.
g	Aceleración de la gravedad.
y	Tirante del flujo.
$Y_a$	Tirante promedio del flujo.
H	Carga del salto.
$\Delta H$	Pérdida de energía
$L_o$	Longitud de la alfuenta.
$L_j$	Longitud del salto.
$L_r$	Longitud de onda.
Q	Gasto.
$V_j$	Volumen del salto.
x	Longitud coordenada.
X	Coordenada adimensional. $X = \frac{\sqrt{2gv^2 H^3}}{Q} (x)$
y	Tirante del flujo adimensional.
Y	Relación de tirantes.
z	Tirante adimensional.
$\beta$	Relación de anchos.
v	Tangente del ángulo del canal de expansión.
w	Angulo de expansión del flujo.

### III.1.2. Estudios de K. Herbrand.

A continuación se presenta un estudio sobre el llamado Salto Hidráulico Espacial. Este estudio trata de los problemas que involucra el cálculo y diseño de un salto en un canal - amortiguador o tanque amortiguador, que se presenta como un canal de ensanchamiento gradual o brusco.

#### Rango de Aplicación.

Un Salto Hidráulico Espacial, bajo ciertas condiciones, - ocurre en forma de chorro que es confinado entre las paredes laterales de un canal que varía de un menor a un mayor ancho para la salida. Cuando el flujo, por ejemplo, es únicamente sobre una parte del umbral vertebral o sobre una de las compuertas limitrofes, aparece la transición - del flujo con carácter espacial. En el vertedor de una presa el cambio de la condición del flujo ocurre en la -- transición entre el estrecho canal y el ensanchamiento del canal de aguas de descarga.

Cuando el tirante de agua de salida es menor que el tirante del Salto Hidráulico Clásico, se necesitan emplear accesorios para poder formarlo, y una excavación en un tanque amortiguador se excluye por las condiciones económicas y - de operación, entonces, una expansión lateral es la única

posibilidad para garantizar la disipación de energía necesaria por medio de un Salto Hidráulico Espacial. La transición de un canal estrecho a un ensanchamiento dentro de un tanque amortiguador es posible hidráulicamente y bajo ciertas condiciones es también ventajoso desde el punto de vista económico.

El ancho de la conexión del canal aguas abajo puede estar excedida, por eso, después del Salto Hidráulico es posible hacer un estrechamiento de la sección transversal como - - muestra la Fig. (30).

En estudios anteriores, la existencia de ondas laterales - - fue considerada como algo necesario y en algún tiempo un requisito para la realización de un Salto Hidráulico Espacial. Para poder definir mejor esta situación, fue necesario crear modelos de prueba en los cuales todas las condiciones de transición de flujo supercrítico o subcrítico, - - provocarían un Salto Hidráulico Espacial, si el flujo de transición se encontrara dentro de la zona de expansión.

Para el Salto Hidráulico Espacial el comienzo de la superficie de la onda se puede localizar en un área de  $L_b \approx 5(Y_2 + b - Y_1)$  aguas arriba de la expansión y  $A \approx (B-b)/2 \operatorname{tg}(\omega)$ , aguas abajo de la expansión del canal, esta región en el flujo de transición tiene un carácter bidimensional y puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$\gamma_b = Y_2/Y_1 = \frac{1}{2} = \left( \sqrt{8 F_r^2 + 1} - 1 \right) \quad \dots \text{ ec. 78.}$$



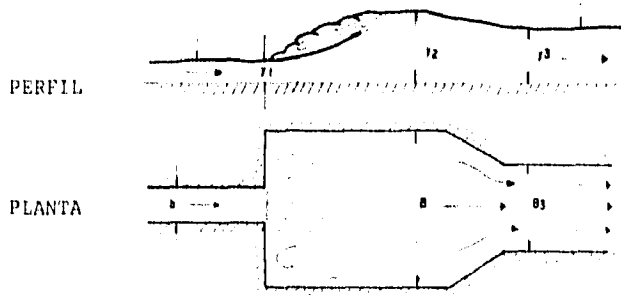


FIG. 30

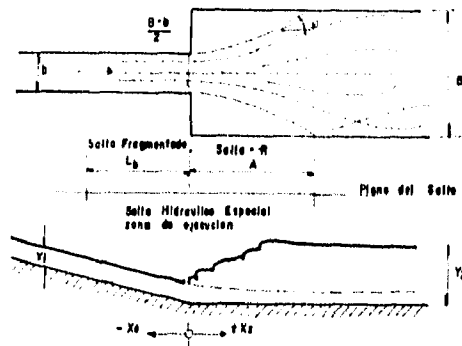


FIG. 31

En la cual  $F_{r1} = v_1 / \sqrt{gY_1}$ , la longitud  $L_b$  del Salto Hidráulico será, entre 4.5 y 6 veces la altura del salto ( $Y_2 - Y_1$ ); el tirante  $Y_2$  requerido para el tanque amortiguador es establecido por la excavación (s) cuando el tirante de aguas de salida  $Y_3$  en el canal contiguo está dado:

$$Y_2 = Y_3 + s \quad \dots \text{ ec. } 79$$

Ecuación General de Momento.

En la formulación de la ecuación general de momento, se usaron los valores promedio de las secciones transversales sin algún coeficiente de corrección a considerar para la distribución de velocidad no uniforme. Esto tiene una justificación para propósitos prácticos, pues en muchos cálculos de Salto Hidráulico la influencia sobre la relación de tirantes local y la variación de velocidades de la presión no hidrostática y el arrastre del aire son pequeñas, en algunas partes, tienden a cancelarse una a otra. Para los cálculos de fricción de la pared será despreciada. La ecuación de momento basada en la nomenclatura de la Fig. (32) es entonces:

$$C_{QV_1} + \gamma \frac{1}{2} b Y_1^2 + \gamma \frac{1}{2} (B-b) Y_e^2 = C_{QV_2} + \frac{1}{2} \gamma B Y_2^2 \quad \dots \text{ec. 80}$$

Utilizando la ecuación de continuidad  $Q = v_1 b Y_1 = v_2 B Y_2$

e introduciendo parámetros adimensionales  $\eta_B = Y_2/Y_1$ ,

$\beta = \frac{b}{B}$ ,  $e = Y_e/Y_1$  la ecuación será:

$$\eta_B^3 - \eta_B (\beta - \beta e^2 + e^2 + 2\beta F_r^2) + 2\beta^2 F_{r1}^2 = 0 \quad \dots \text{ec. 81}$$

Con el fin de introducir alguna otra ayuda que nos permita obtener una ecuación más simple para fines de diseño práctico, a continuación se dará una simplificación de la ecuación de momento.

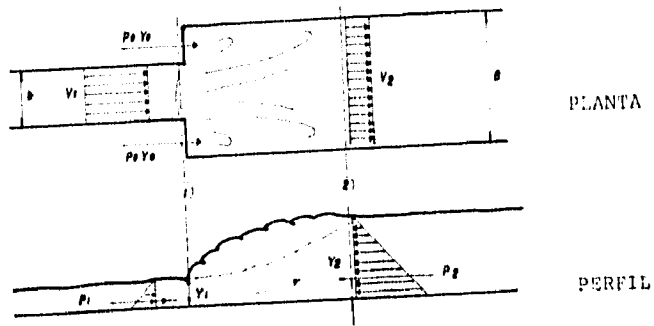


FIG. 32

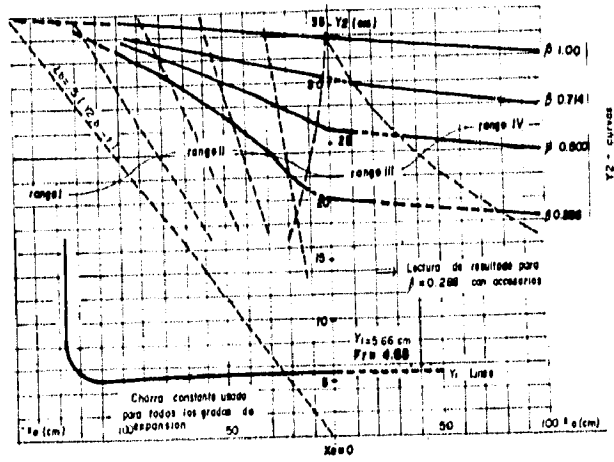


FIG. 33

Simplificación de la Ecuación de Momento.

En la expansión de un tanque amortiguador para el Salto -  
Hidráulico, el momento es  $\mathcal{C}Qv_1 = J_1$  y la presión resultan-  
te  $\frac{1}{2} \gamma b y_1^2 = p_1$  de entrada quedará igual. El sumar la  
fuerza de presión  $\frac{1}{2} \gamma (B-b) y_2^2 = p_e$  sobre el área de -  
expansión, será despreciable como puede verse si asumimos  
que los tirantes  $y_e$  y  $y_1$  son iguales y relacionando la  
fuerza de presión al momento de entrada nos producirá - -  
 $\frac{1}{2} Fr^2 / (1/\beta - 1)$ . Esto simplificará la ecuación (81) a:

$$\frac{1}{\beta}^3 - \frac{1}{\beta} (\beta + 2\beta Fr_1^2) + 2\beta^2 Fr_1^2 \quad \dots \text{ ec. 82}$$

hay que reconocer que sobre el agua de salida el momento -  
es pequeño en comparación con la fuerza de presión del agua  
estática y considerando que el momento que resulta durante la  
expansión del tanque es constantemente pequeño, entonces esto  
conduce a la conclusión de que la presión resultante debe  
ser la misma en el Salto Clásico y en el tanque amorti-  
guador con expansión, es decir:

$$\frac{1}{2} \gamma \beta y_{2,b}^2 y_2^2 = \frac{1}{2} \gamma b y_2^2 y_{2,b}^2 \quad \dots \text{ ec. 83}$$

simplificando:

$$\frac{b}{\beta} = \frac{y_{2,b}^2}{y_2^2} \quad \dots \text{ ec. 84}$$

La aplicación de la ecuación (84) a un tanque amortiguador es parcial, implica que el tanque tendrá un ensanchamiento por lo cual necesitará un factor de ajuste para el tirante actual -- que es más pequeño que el tirante calculado. Acatando esa regla, entonces las condiciones hidráulicas para el Salto serán válidas.

Un ejemplo numérico con  $F_{r1} = 7.0$  y  $\beta = 0.5$  (1:2 relación de expansión) dará la desviación de los resultados de las ---- ecuaciones (3) y (4) para comparar estas a la ecuación (2)

$$\begin{array}{ll}
 E_q (2) : Y_a = Y_1 & n = 6.812 \\
 E_q (3) : Y_a = 0 & n = 6.773 \rightsquigarrow 0.56 \% \\
 E_q (4) : Y_a = j_{2,b} - J_{2,\beta} = 0 & n = 6.655 \rightsquigarrow 2.30 \%
 \end{array}$$

Evaluación de los Modelos de Prueba.

Las investigaciones de Herbrand se realizaron con un ancho de 0.15 m, con  $3.1 \leq F_{r1} \leq 9.6$  y  $\beta = 1.0, 0.833, 0.714, 0.625, 0.500$  y  $0.288$ , a causa de la pendiente del canal,  $m_1 = 0, 0.3, 0.5$ , también fue considerada la influencia del cambio en la pendiente del lecho. El tirante  $Y_2$  fue medido al final del Salto Hidráulico, graficándose curvas como una función de la distancia  $x_e$  que se mide al principio del Salto Hidráulico, a la expansión de la sección transversal. (Ver Fig. 33).

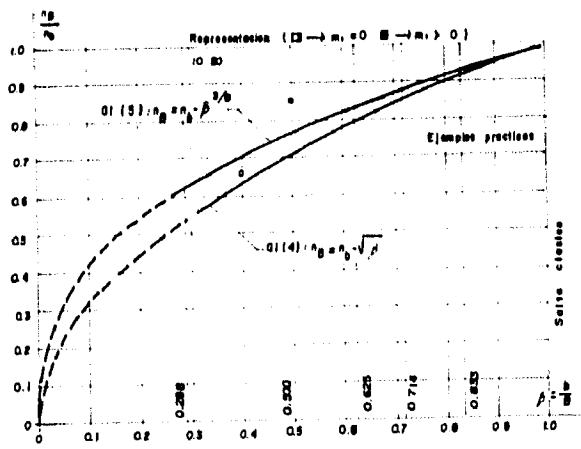


FIG. 34

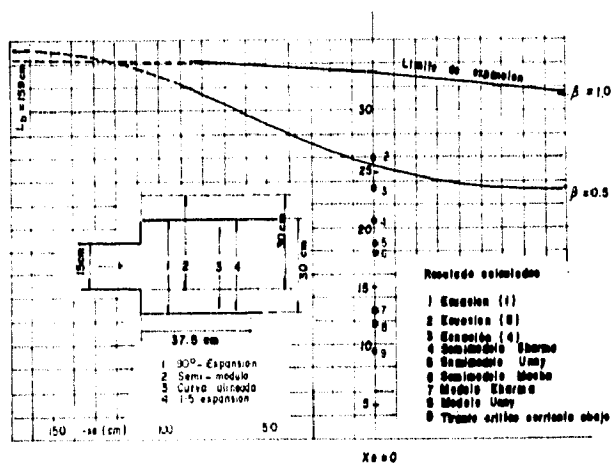


FIG. 35

La curva  $Y_2$  para  $\beta = 1.0$  (Salto Hidráulico Tradicional) demuestra la influencia de la fricción del piso. La región range I corresponde al Salto Hidráulico Clásico antes de la expansión, con  $Y_2$  medido en la ampliación del canal; el Salto Hidráulico Amortiguado se encuentra entre la región I y  $x_e = 0$  en la región III, el Salto Hidráulico con superficie de onda perpendicular a la dirección del flujo no será posible sin accesorios. En la región IV, el Salto Hidráulico tiene una apariencia bidimensional y que se propaga fuera del primer ancho. La deducción aproximada de la ecuación (33) para  $x_e = 0$ , es la ec. 85.

En la Fig. (34), todas las medidas de relaciones de tirantes para  $x_e = 0$  son relacionadas al Salto Hidráulico Clásico y graficadas como una función de la relación de expansiones. El valor medio será representado por la ecuación (85).

$$\eta_e = \eta_b \beta^{3/8} \quad \dots \text{ec. 85}$$

La desviación será dentro de cierta previsión de medidas.

En la gráfica de la función de la ec. (84), se derivan resultados aproximados para algunos casos el tirante del tanque amortiguador fue pequeño. La diferencia entre las dos curvas refleja la influencia de los accesorios. Para una aplicación práctica la ecuación (84) debe contemplar la influencia de los accesorios.

Como se muestra en la Fig. (35), los resultados fueron graficados para una expansión gradual.



## NOTACIONES

- Y Tirante del agua.
- L Longitud del Salto Hidráulico.
- b Ancho del canal antes de la expansión.
- B Ancho del canal después de la expansión.
- $\beta$  Relación de expansión.
- $\omega$  Angulo de expansión del Flujo turbulante.
- 1 Sección transversal al principio del salto.
- 2 Sección transversal al final del salto.
- e Subíndice para la sección de expansión.
- b Subíndice para el Salto Hidráulico Clásico.
- B Subíndice para el Salto Hidráulico Espacial.
- n Relación de tirantes.
- e Excavación del tanque amortiguador.
- $x_e$  Distancia del principio del Salto Hidráulico hasta la sección de expansión.
- Q Gasto.
- v Velocidad promedio.
- $F_r$  Número de Froude.
- P Resultante de la presión del agua.
- J Momento en la sección transversal.
- $\rho$  Densidad del agua.
- $M$  Pendiente del canal.
- $\lambda$  Relación tirante-ancho.
- $\gamma$  Peso específico del agua.

## C A P I T U L O     I V

### IV.- ENSAYOS DE APLICACION.

#### IV. 1 PENDIENTE VARIABLE.

A continuación se resolverán ejercicios sobre los Estudios de N. Rajaratnam.

Ejemplo 1.

En un canal de sección rectangular una corriente supercrítica de tirante normal inicial  $Y_1 = 2$  pies (0.61 m) con una velocidad de 70 pies/seg. (21.34 m/seg), fluye con una pendiente de  $\text{tg } \alpha = 0.25$ .

Si el piso inclinado cambia a piso horizontal originándose un Salto Hidráulico cuyo tirante final es  $Y_2 = 30$  pies (9.14 m).

Calcule e ilustre el tipo de Salto?

Solución:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}} = \frac{70 \frac{\text{pies}}{\text{seg}}}{\sqrt{(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{seg}^2}) (2 \text{ pies})}} = \underline{\underline{8.72}}$$

Usando la ecuación 26 entonces:

$$\frac{Y_2^*}{Y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1) \quad \text{sustituyendo,}$$

$$\frac{Y_2^*}{Y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8(8.72)^2} - 1) = 11.84$$

Por lo tanto como  $Y_1 = 2$  pies

$$Y_2^* = 11.84 (Y_1) \text{ entonces}$$

$$Y_2^* = 11.84 (2 \text{ pies}) = \underline{\underline{23.68 \text{ pies}}}$$

Para clasificar este Salto utilizaremos la siguiente secuencia lógica.

- a) Si  $Y_2^* > Y_t$  será el Salto A  
si no se cumple entonces;
- b) Si  $Y_2 = Y_t$  será el Salto C  
si no se cumple entonces;
- c) Si  $Y_2 < Y_t$  será el Salto D  
si no se cumple entonces;
- d) Si  $Y_2 > Y_t$  será el Salto B

ESTA TESTIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

como  $Y_t = 30$  pies  $>$   $Y_2^* = 23.68$  no cumple con el Salto A  
 entonces es necesario calcular  $Y_2$  . ( $\text{tg}\alpha = 0.25, \alpha = 14.036^\circ$ )  
 con la ecuación 30 y 32.

$$r_1 = 10^{0.027 (14.036^\circ)} = 10^{0.3789}$$

$$r_1 = 2.39$$

$$(G_1^2) = r_1^2 F_1^2 = 2.39^2 (8.72)^2 = 435.34$$

Haciendo uso de la ecuación 29 obtenemos  $Y_2$ :

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2\text{Cos } \theta} (\sqrt{1 + 8 G_1^2} - 1) = \frac{2}{2\text{Cos } 14.036} (\sqrt{1 + 8(435.34)} - 1)$$

$$Y_2 = 59.8 \text{ pies}$$

como  $Y_2 > Y_t$

entonces será el Salto B

Para calcular la distancia l del salto será:

$$\frac{Y_t}{V_2^2} = \frac{30 \text{ pies}}{23.68 \text{ pies}} = 1.27$$

En base a la gráfica 11.

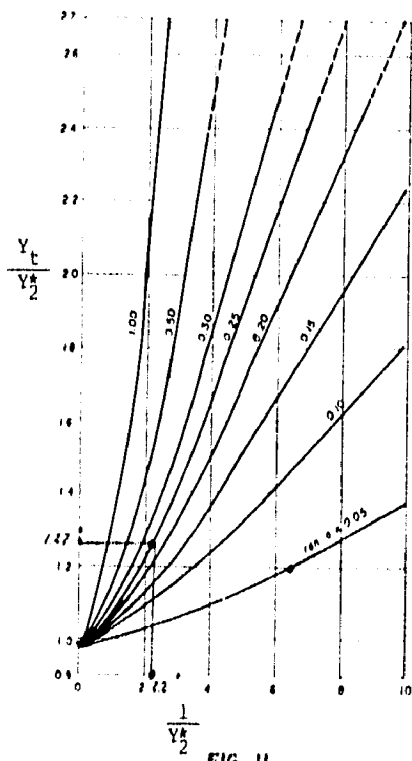


FIG. 11

El valor de  $\frac{y_t}{Y_2^*} = 1,27$  se interseca con  $\text{tg}\alpha = 0,25$  y se baja

el eje de las abscisas donde  $\frac{l}{Y_2^*} = 2,2$ , despejando  $l$ :

$$l = 2.2 (Y_2^*) = 2.2 (23.68 \text{ pies}) = 52.10 \text{ pies.}$$

Para obtener la longitud del Salto  $L_r$  se calcula intersectando en la Gráfica 12, el Número de Froude  $F_1 = 8.72$  y la curva  $\text{tg}\alpha = 0.25$ .

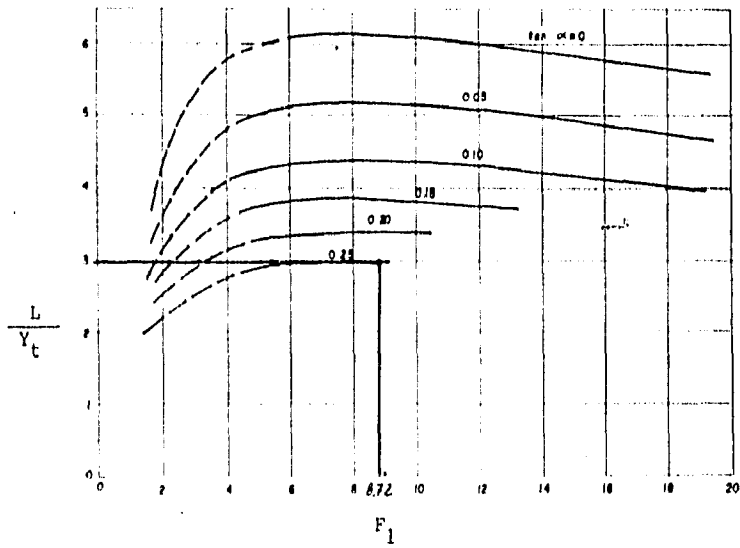


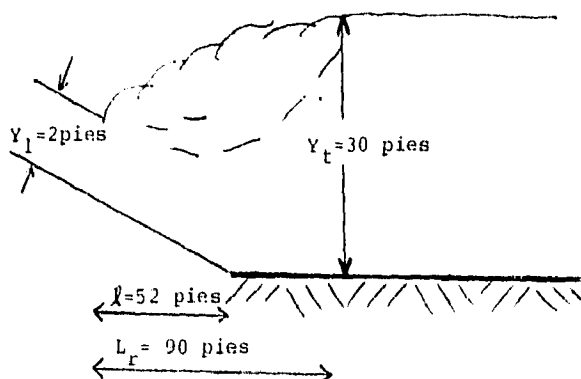
FIG. 12

El resultado de la intersección es  $\frac{L_r}{Y_t} = 3.0$

por lo tanto  $L_r = 3.0 (Y_t) =$

$$L_r = 3.0 (30 \text{ pies}) = 90 \text{ pies}$$

### Salto Tipo B.



La Pérdida de Energía considerando que el fondo horizontal es el plano de referencia y calculando las Energías inicial y final totales, ec. 39 y ec. 41.

$$E_1 = L \tan \theta + \frac{Y_1}{\cos \theta} + \frac{V_1^2}{2g} = 52.10 \tan 14.036^\circ + \frac{2}{\cos 14.036} + \frac{(70)^2}{2(32.2)} =$$

$$E_1 = \underline{91.17 \text{ pies}} //$$

$$E_2 = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} = 30 + \frac{v_2^2}{2g} \text{ falta obtener } v_2$$

$$v_2 = Q/A_2 = \frac{v_1(A_1)}{A_2} = \frac{70 (B)(y_1)}{B(y_2)} = \frac{70 y_1}{y_2}$$

$$v_2 = \frac{70(2)}{30} = 4.66 \text{ pies/seg.}$$

$$E_2 = 30 + \frac{4.66^2}{(32.2)2} = \frac{30.34 \text{ pies}}{\underline{\underline{\quad}}}$$

La pérdida de energía será con la ec. 42:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 91.17 \text{ pies} - 30.34 \text{ pies} = 60.83 \text{ pies} (18.6m.)$$

La Energía relativa será:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{60.83}{91.17} = \frac{0.66}{\underline{\underline{\quad}}}$$



#### IV.2 SECCION VARIABLE. (W.H. HAGER).

Ejemplo 2.

Dado un canal rectangular con un gasto  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{seg}$ , aguas arriba con un ancho  $b = 10 \text{ mts.}$  tirante  $Y_0 = 1.0 \text{ mts.}$ , variando estos dos últimos en forma divergente entre una distancia de  $50,00 \text{ mts.}$ , aguas abajo es  $H_2 = 3.70 \text{ mts.}$  Con  $b = 10.0 \text{ mts.}$  y  $v = 0.2$ , el origen del canal puramente divergente es a:

$$X_d = X_0 - 50 \text{ mts.}$$

Solución:

La Energía Potencial es:

$$H_0 = Y_0 + \frac{Q^2}{2g b^2 h_0^2} \text{ Sustituyendo}$$

$$H_0 = 1.0 + \frac{(100)^2}{2(9.81)(10)^2(1.0)^2} = 6.10 \text{ mts.}$$

$$\text{Entonces } \frac{H_2}{H_1} = \frac{H_2}{H_0} = \frac{3.7}{6.1} = 0.61 \text{ intersectando}$$

$\frac{H_2}{H_1} = 0,61$  en la figura 21, obteniendo  $X = 9,5$

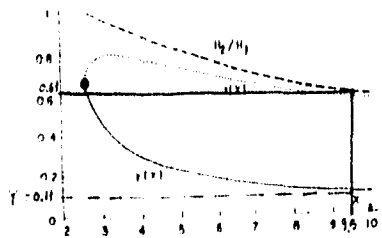


FIG 21

y  $Y = 0,11$ , sustituyendo en:

$$Y = \frac{Y_1}{H_0} \text{ es decir } Y_1 = H_0 (Y) = 6,10 (0,11) = 0,67 \text{ mts.},$$

$$X = \frac{\sqrt{2vg^2 H_0^3}}{Q} (x) \text{ ó sea } x = \frac{XQ}{\sqrt{2vg^2 H_0^3}}$$

Sustituyendo

$$x = \frac{9,5 (100)}{\sqrt{2(9,81) (0,2)^2 (6,1)^3}} = 71,2 \text{ mts.}$$

La posición del Salto promedio, por lo tanto, a - - -

$$X - X_0 = 71,2 - 50,00 = 21,2 \text{ mts.}$$

además, por la ec. 58 se obtiene:

$$z = \frac{1}{2} (\sqrt{16y - 15y^2} - y), \text{ sustituyendo}$$

$$z = \frac{1}{2} (\sqrt{16(0.11) - 15(0.11)^2} - 0.11) = 0.573$$

entonces  $Y_2$  teórica será:

$$H_2 = Y_2 + \frac{Q^2}{2gv^2x^2h_2^2} = \text{sustituyendo}$$

$$3.7 = Y_2 + \frac{(100)^2}{2(9.81)(0.2)^2(71.2)^2 Y_2^2} \text{ despejando}$$

$Y_2 = 3.50$  mts. (Tirante Conjugado subcrítico).

El análisis local entonces da que un Salto Hidráulico ocurre al alcanzar un canal divergente.

Determinando el Número de Froude ( $F_0$ ):

$$F_0^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_0^3} = \frac{(100)^2}{(9.81)(10)^2(1.0)^3} = 10.2$$

o sea  $F = 3.19$ ,

#### IV.3. COMPARACION DE RESULTADOS.

##### COMPARACION DEL EJEMPLO 1.

Con los mismos datos del anterior ejemplo No. 1, resolveremos el Salto Hidráulico de la forma tradicional con un escalón como disipador de Energía.<sup>(2)</sup>

Datos:  $Y_1 = 2$  pies  
 $V_1 = 70$  pies/seg.

Solución

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g Y_1}} = \frac{70 \frac{\text{pies}}{\text{seg.}}}{\sqrt{(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{seg.}})(2 \text{ pies})}} = 8.72$$

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} = \left( \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1 \right) \text{ sustituyendo,}$$

$$Y_2 = \frac{2 \text{ pies}}{2} = \left( \sqrt{1 + 8 (8.72)^2} - 1 \right) = 23.68 \text{ pies}$$

La pérdida de Energía será:

$$AE = \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{4 (Y_1 Y_2)} = \frac{(23.68 - 2.0)^3}{4 (2.0)(23.68)} = 53.79 \text{ pies}$$

La pérdida de Energía de un Salto Hidráulico producido por cambio de pendiente es 60.83 pies > 53.79 pies, por el Salto Hidráulico con un escalón como disipador de Energía.

COMPARACION DEL EJEMPLO 2.

Con los mismos datos del ejemplo 2 resolveremos la pérdida de Energía en condiciones:

$$Y_1 = 1.0 \text{ m, } Y_2 = 3.50 \text{ y } H_2 = 3.70 \text{ mts.}$$

La pérdida de Energía será de acuerdo a la ecuación 59:

$$H_1 - \left( Y_2 + \frac{Q^2}{2g v^2 x^2 Y_2^2} \right) = \Delta H$$

$$\text{siendo } H_1 = H_2 / 0.61 = 3.70 / 0.61 = 6.06$$

por lo tanto

$$6.06 - \left( 3.50 + \frac{(100)^2}{2(9.81)(0.2)^2(71.2)^2(3.50)^2} \right) = \Delta H$$

$$6.06 - 3.70 = 2.36 \text{ mts.}$$

Si fuera un canal tradicional sería:

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}} = \frac{10 \frac{\text{m}}{\text{seg}}}{\sqrt{9.81 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} (1.0 \text{ m})}} = 3.19$$

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1 \right) = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 (3.19)^2} - 1 \right) = 4.04 \text{ m.}$$

$$E = \frac{(4.04 - 1.00)^3}{4(1.00)(4.04)} = \frac{28.09}{16.16} = 1.73 \text{ m.}$$

La pérdida de energía de un Salto Hidráulico con Sección Variable es 2.36 m > 1.73 m. para el Salto Tradicional.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El fenómeno del Salto Hidráulico en canales con pendiente variable y sección variable, funcionan como un mejor disipador de energía, por su forma y pendiente representan un menor costo de Construcción, teniendo tantas ventajas, la problemática a resolver es el cálculo del Salto Hidráulico puesto que no existe un análisis teórico que desarrolle -- una fórmula general de dicho fenómeno.

Los estudios de esta tesis demuestran en base a la experimentación y a una serie de análisis estadísticos la forma de llegar a la determinación de las condiciones Geométricas del Canal donde se podría utilizar el Salto Hidráulico como disipador de Energía.

La solución basada en gráficas y coeficientes experimentales permite tener valores bastante precisos, además de ser formas simples y rápidas de analizar un problema complejo.

Considero de suma importancia el aplicar conocimientos -- más elaborados con soluciones prácticas en la rama de la Ingeniería Civil ya que ésta forma de ver los problemas físicos nos permiten, dando un buen manejo de estas teorías obtener ahorros en tiempo y economía de obras de gran

magnitud. La Ingeniería Civil busca realizar obras de Infraes  
tructura en el menor Costo-Tiempo con las mejores condiciones  
de trabajo, la tesis presentada corrobora este enfoque.



## BIBLIOGRAFIA

- 1) Henderson, "Open channel flow"  
McMillan, 1966, 522 pp.
- 2) Ven Te Chow, "Open channel hydraulics".  
McGrawhill, 1981, 688 pp
- 3) N. Rajaratnam, "The Hydraulic Jump in Sloping Channel"  
Irrigation and Powe, 1966, pp 137-149.
- 4) Richard H. French, Hidráulica de Canales Abiertos.  
McGrawhill, 1988, 724 pp.

## REVISTAS.

- 1) Journal of the Hidraulic Divition, A.S.C.E.
- 2) Journal of the Hidraulic Research, I.N.H.R.