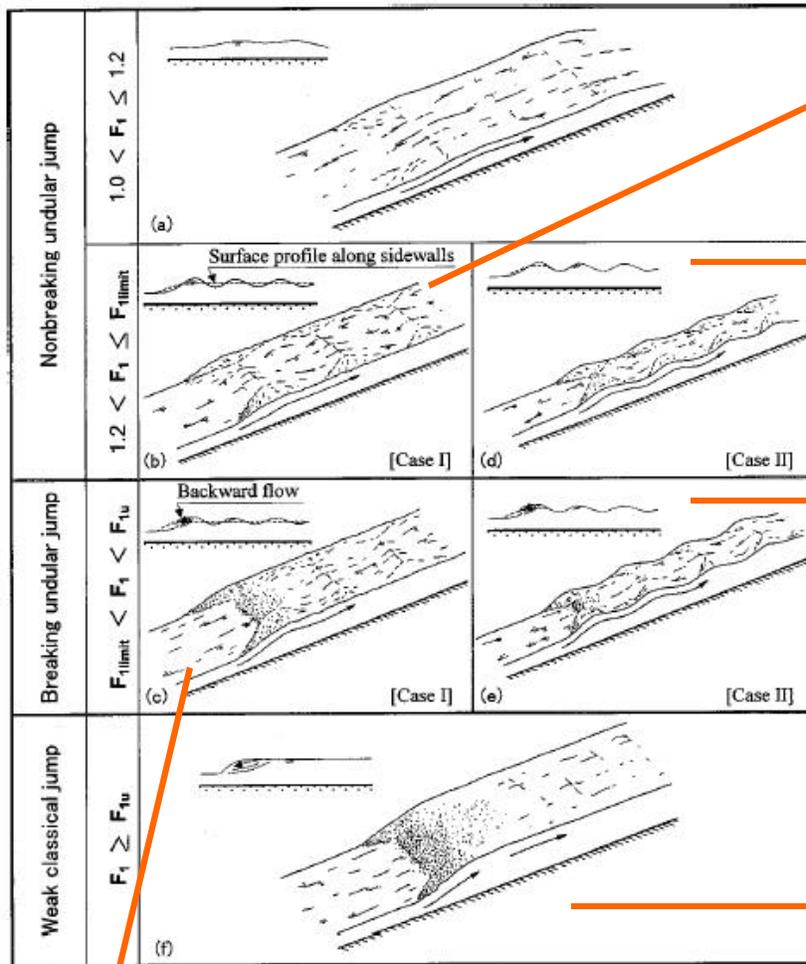


RESALTO DE ONDAS ($1 < Fr_1 < 1,7$)

Dependiendo del número de Froude del torrente, el resalto ondular se clasifica en distintos tipos. (Ohtsu, Yasuda and Gotoh, 2003, J. Hyd. Engng, Vol. 129, No. 12, pp.948-955; Ohtsu, Yasuda and Gotoh, 1997, J. Hyd. Engng, Vol. 123, No. 2, pp.161-162)

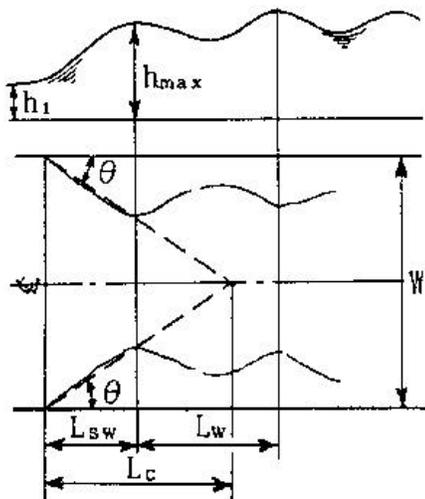


Lateral Shock Waves



$$F_{1limit} = 1.78 - 0.03 \left(10 - \frac{B}{h_1} \right)^{1.35} \quad 2 \leq \frac{B}{h_1} \leq 10$$

$$F_{1u} = 2.10 - 0.03 \left(12 - \frac{B}{h_1} \right)^{1.35} \quad 2 \leq \frac{B}{h_1} \leq 12$$



$$\frac{h_{max}}{h_1} = 1,51Fr_1 - 0,35$$

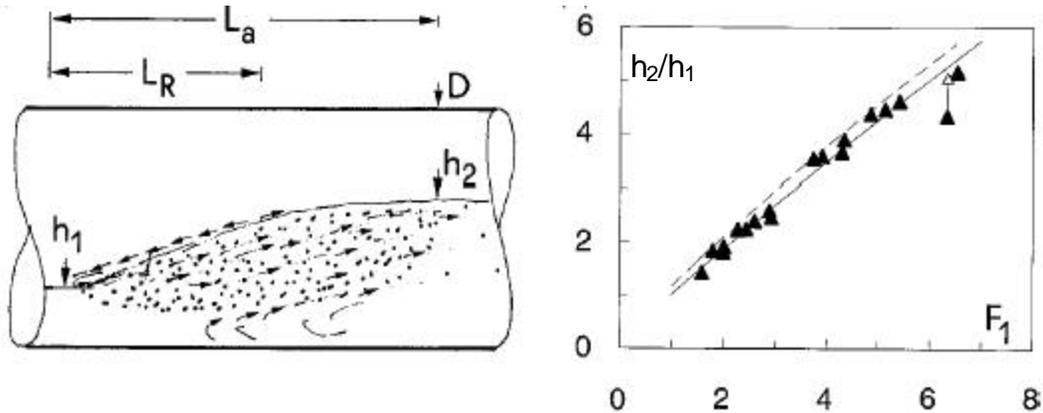
$$\frac{L_w}{h_2} = 2,75 + \frac{0,9}{Fr_1 - 1}$$

$$\frac{L_{sw}}{h_1} = 1,3Fr_1 + 2,56$$

$$\theta^\circ = 30,6Fr_1^{0,65}$$

RESALTOS COMPLETOS EN CONDUCTOS CIRCULARES

Los resaltos en conductos circulares han sido estudiado por Hager y sus colaboradores, obteniendo relaciones para la altura máxima de la onda y la longitud del resalto.

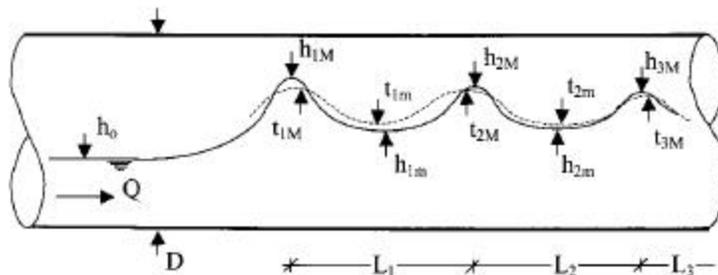


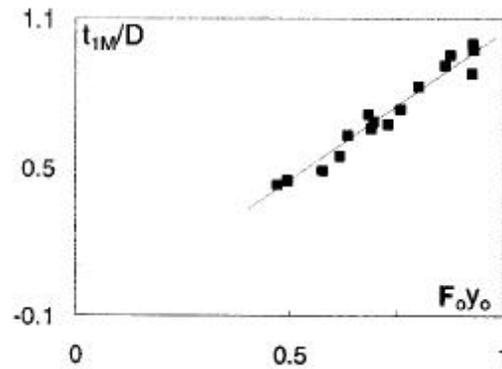
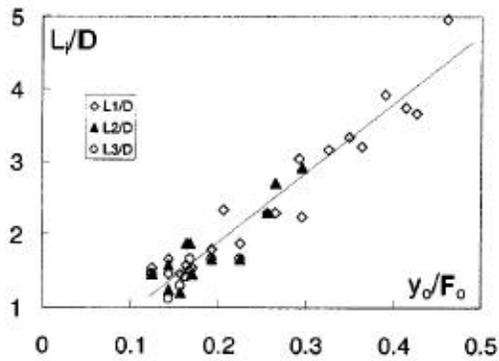
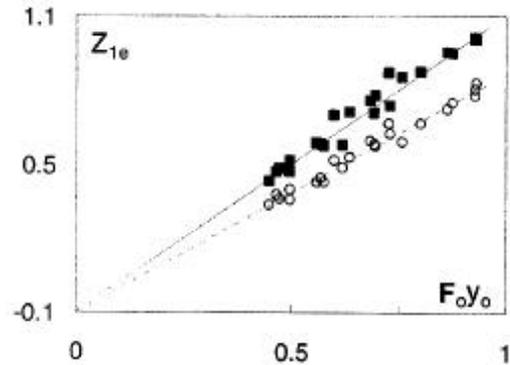
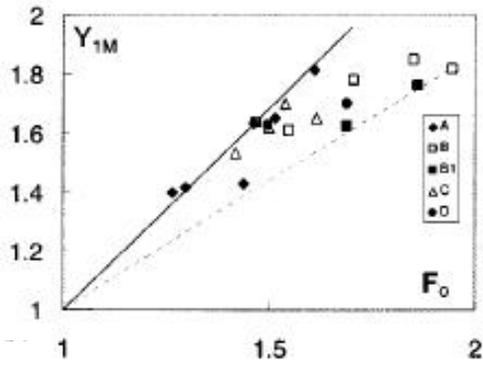
$$\frac{L_R}{h_2} = 2\sqrt{Fr_1} \qquad \frac{L_a}{L_R} = 2$$

\$L_R\$ es la longitud de recirculación, definida como la distancia entre el extremo de aguas arriba del resalto y el punto de estancamiento en la superficie.

\$L_a\$ es la longitud de aeración, definida como la distancia entre el extremo de aguas arriba del resalto y el punto donde termina la nube de burbujas de aire.

Gargano y Hager analizaron el resalto ondular en conductos circulares. Usando la notación de la figura:





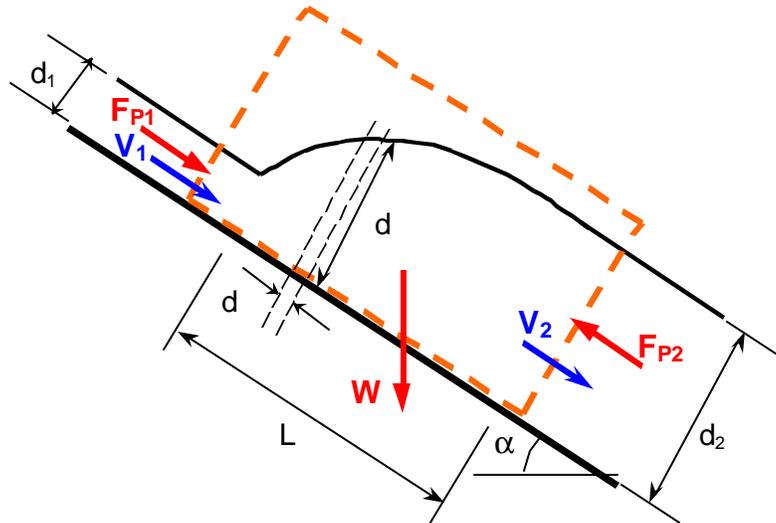
La línea continua corresponde a la primera onda y la de segmento a la segunda.

$$Z = \frac{h_M}{D} \quad Y = \frac{h_M}{h_0}$$

t altura del flujo en la pared,
 Subíndices: M: máximo, e: onda extrema

RESALTO EN LECHOS INCLINADOS

En un lecho inclinado, al aplicar el teorema de la cantidad de movimiento aparece la componente del peso, la que debe incorporarse en el análisis.



$$F_{P1} - F_{P2} + W \sin \alpha = \frac{\gamma}{g} Q (V_2 - V_1)$$

$$F_{P1} = \frac{1}{2} \gamma d_1^2 \cos \alpha \quad F_{P2} = \frac{1}{2} \gamma d_2^2 \cos \alpha \quad W = \gamma b \int_0^L d \, d\ell$$

$$Q = qb \quad V_1 = \frac{q}{d_1} \quad V_2 = \frac{q}{d_2}$$

$$\frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) = \frac{1}{2} (d_1^2 - d_2^2) \cos \alpha + \sin \alpha \int_0^L d \, d\ell$$

El problema es evaluar el volumen del líquido, $\forall = \int_0^L d \, d\ell$, ya que no se tiene una función analítica para el perfil del resalto.

V.T. Chow propone una relación del tipo $\nabla = K \frac{1}{2} L(d_1 + d_2)$, donde el coeficiente K toma en cuenta que el perfil no es lineal. De este modo, el teorema de la cantidad de movimiento queda:

$$\frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) = \frac{1}{2} (d_1^2 - d_2^2) \cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha K \frac{1}{2} L (d_1 + d_2)$$

$$\frac{q^2}{g} \left(\frac{d_1 - d_2}{d_1 d_2} \right) = \frac{1}{2} (d_1 - d_2) (d_1 + d_2) \left(\cos \alpha + \frac{\operatorname{sen} \alpha K L}{d_1 - d_2} \right)$$

El número de Froude en un canal rectangular puede escribirse como $Fr^2 = \frac{q^2}{gd^3}$, por lo que se tiene:

$$Fr_1^2 \frac{d_1}{d_2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right) (d_1 + d_2) \left(\cos \alpha + \frac{\operatorname{sen} \alpha K L}{d_1 - d_2} \right)$$

definiendo un nuevo parámetro adimensional: $G_1^2 = \frac{Fr_1^2}{\cos \alpha + \frac{\operatorname{sen} \alpha K L}{d_1 - d_2}}$, se tiene la la altura

del río se obtiene de resolver la ecuación $\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + \frac{d_2}{d_1} - 2G_1^2 = 0$. Esta ecuación es idéntica a la de Belanger, reemplazando G_1 por Fr_1 , de donde resulta:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8G_1^2} - 1 \right)$$

Notar que, a diferencia de la ecuación de Belanger (lecho horizontal), se requiere conocer la longitud del resalto, para lo cual debe utilizarse alguna relación (gráfica o analítica) adicional. El cálculo de d_2 es iterativo, ya que también se encuentra en G_1 .

Kindsvater y Hickox proponen que $\nabla = \int_0^L d d\ell = \phi (d_2^2 - d_1^2)$, donde ϕ es un parámetro que no depende de d_2 . Esta expresión para el volumen tiene cierta lógica. En efecto, si se considera que la longitud del resalto puede escribirse como proporcional a la diferencia de las alturas conjugadas,

$$L = k(d_2 - d_1)$$

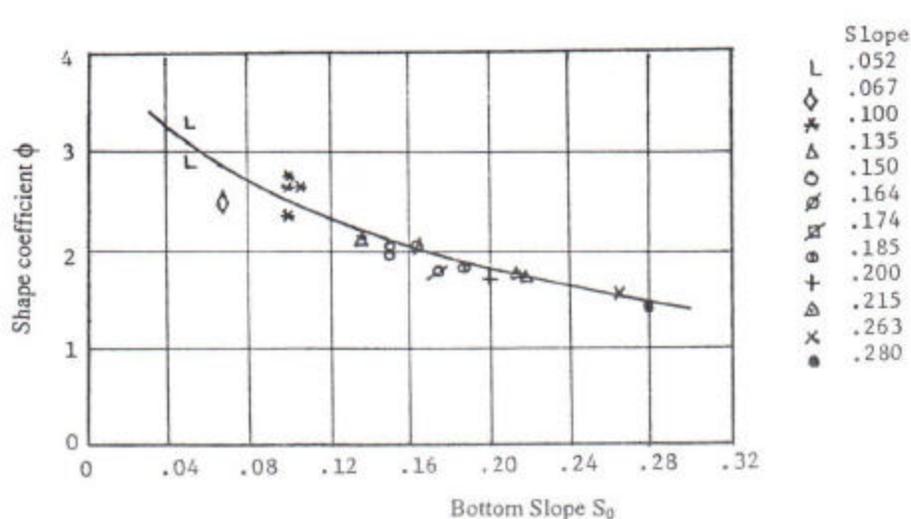
donde el coeficiente k no depende de la altura de río, entonces la expresión para el volumen de V.T. Chow queda:

$$V = \frac{1}{2} kK (d_2^2 - d_1^2)$$

Este volumen, reemplazado en la ecuación de la cantidad de movimiento conduce a la siguiente relación para las alturas conjugadas:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8Fr_1^2}{1 + 2\phi \text{sen}\alpha}} - 1 \right)$$

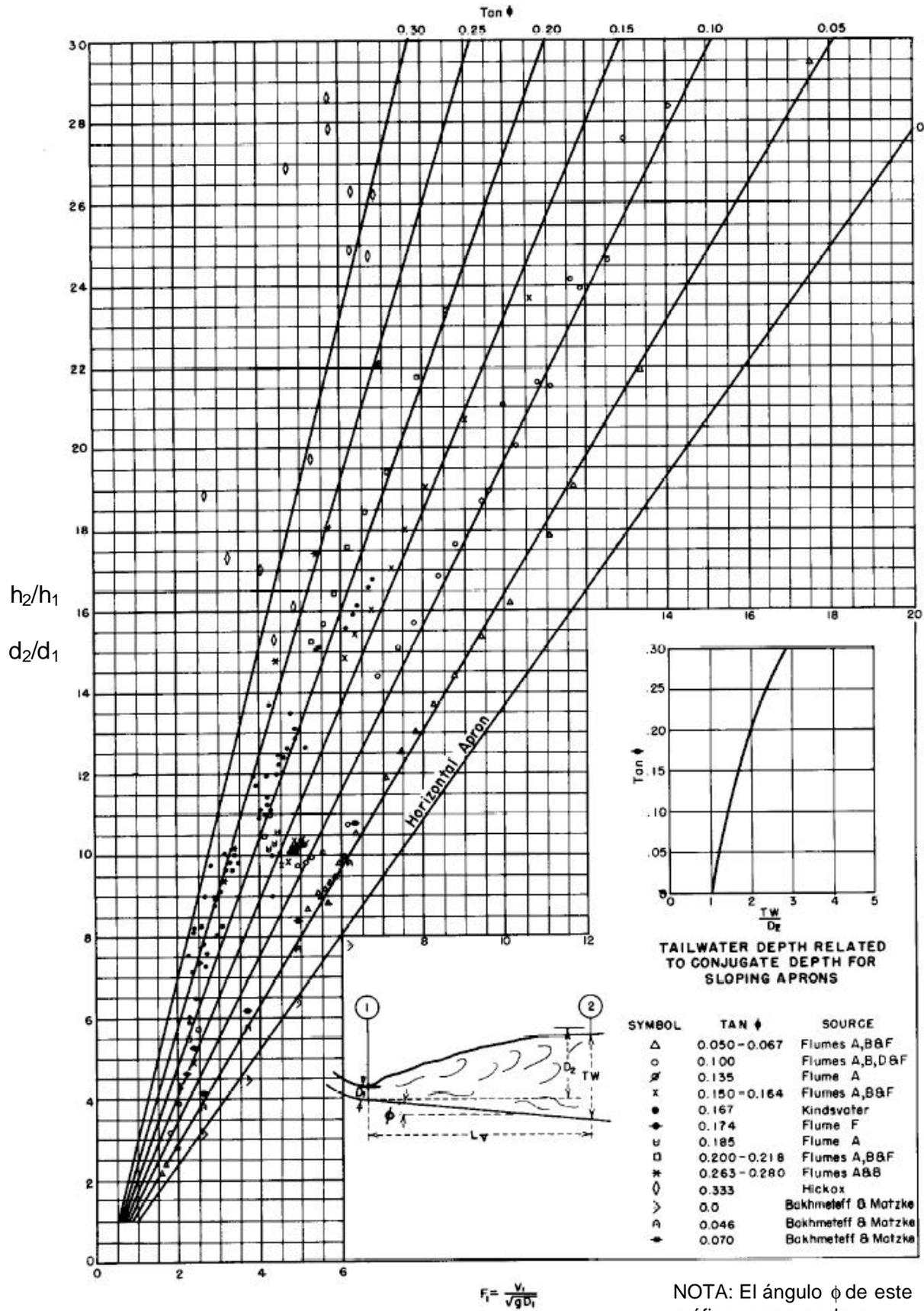
donde $\phi = kK$. Kindsvater y Hickox proponen $\phi = 1,58 - 0,021Fr_1^2$. Posteriormente, a partir de los estudios de Peterka, el USBR determinó que el coeficiente ϕ depende de la pendiente, según la relación gráfica:



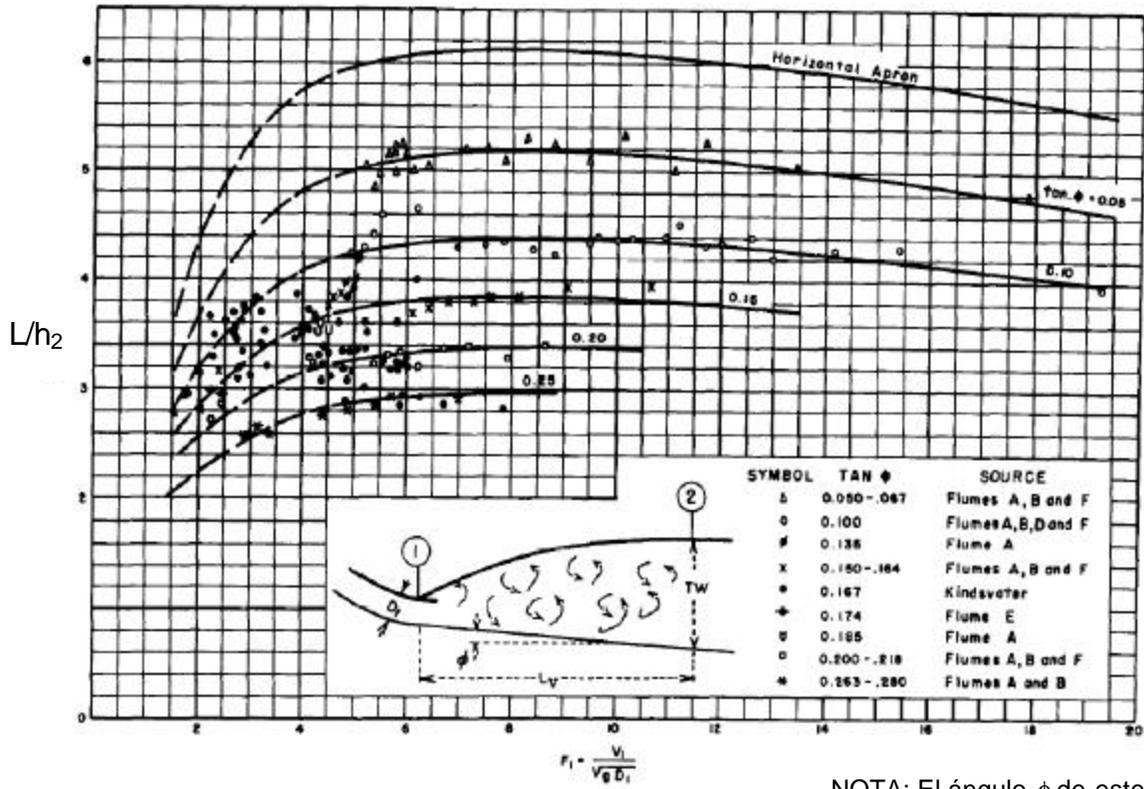
Para el rango $2,9 < Fr_1 < 17,9$, el USBR propone determinar la longitud del resalto de:

$$L = \frac{1,25}{\text{tg}\alpha + 0,182} (h_2 - h_1)$$

Las relaciones gráficas propuesta por el USBR para determinar las alturas conjugadas y la longitud del resalto en lecho inclinado se dan a continuación:



NOTA: El ángulo ϕ de este gráfico corresponde a α .



NOTA: El ángulo ϕ de este gráfico corresponde a α .

RELACIONES DE Don PANCHO J Y SUS MEMORISTAS

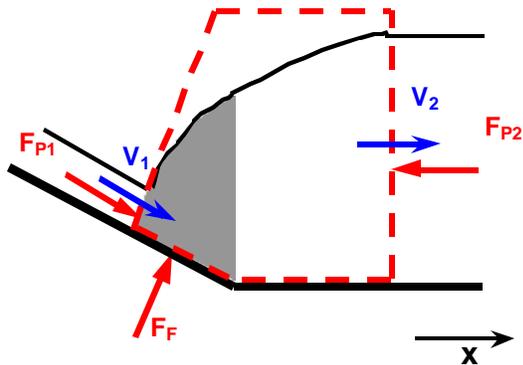
En Chile, Don Pancho J dirigió varias memorias en las que abordó el estudio de los resaltos. Las memorias relacionadas con el resalto en lecho inclinado son las de A. del Río y A. Bambach, y la de A. Álamos y E. Gallardo, quienes dieron su examen de grado en 1956 (obviamente, estudiantes de la U. De Chile). Los resultados los presentan como relaciones gráficas, pero pueden resumirse en las siguientes relaciones:

$$\frac{L}{h_c} = 18(1 - 3i) - 20 \frac{d_1}{h_c}$$

$$\frac{d_2}{d_1} = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2}{X_0^3}} - \frac{1}{2} + (5,74 - 3,21X_0)^3 i^{3/2}$$

Donde L es la longitud del resalto, d_1 es la altura del torrente (medida normal al fondo), d_2 es la del río, i es la pendiente del lecho, h_c la altura crítica y $X_0 = \frac{d_1}{h_c}$.

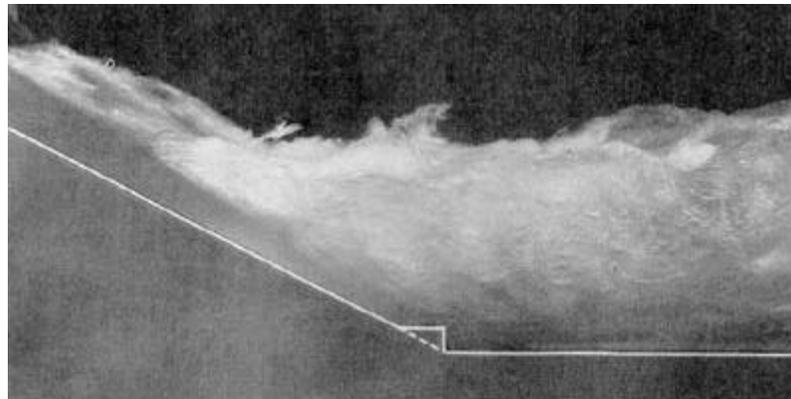
RESALTO EN LECHOS DE PENDIENTE MIXTA



FUERZAS QUE CONTRIBUYEN EN LA DIRECCIÓN X

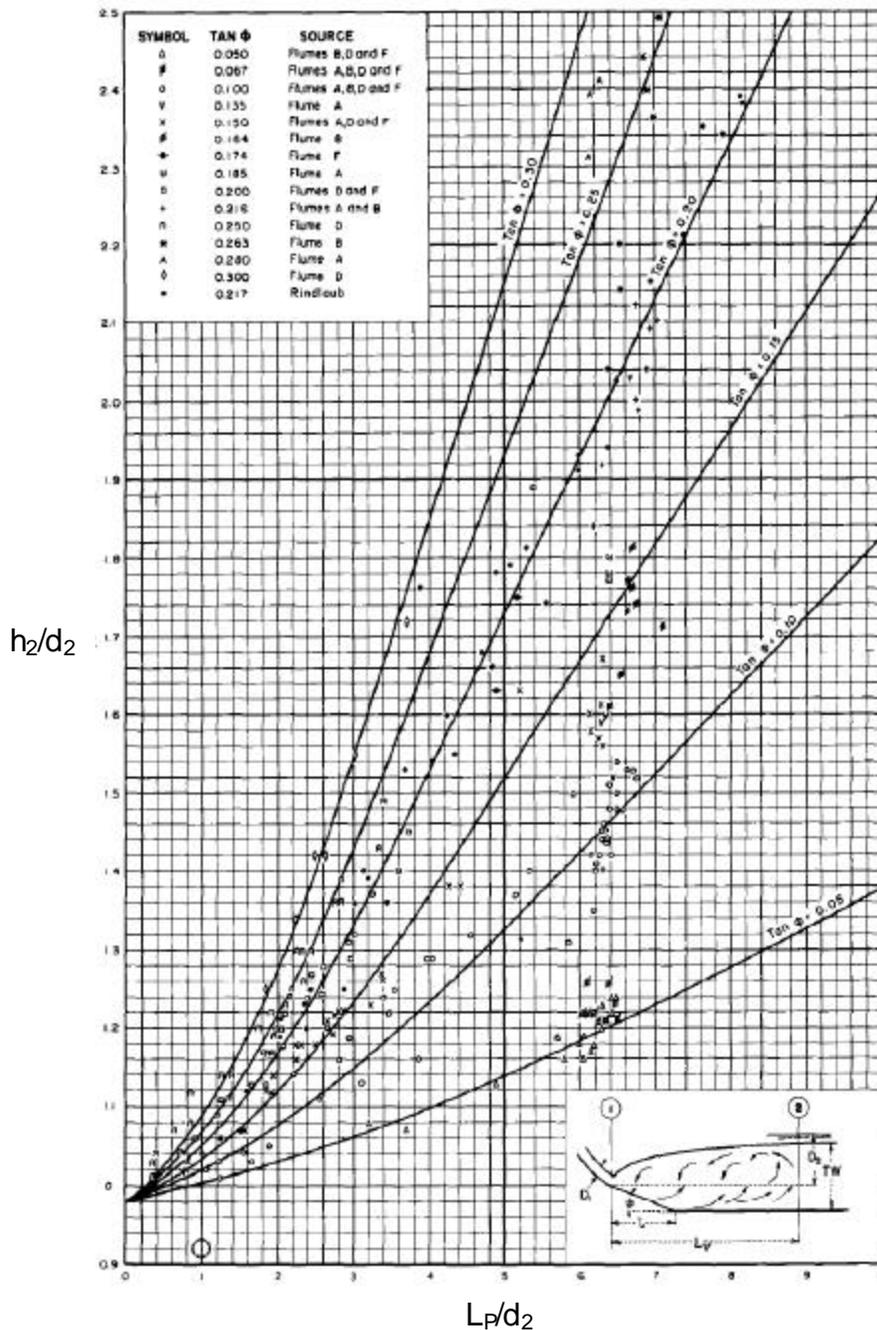
Un rápido de descarga o un canal de gran pendiente generalmente enlaza con otro horizontal o de muy baja pendiente, siendo frecuente que el resalto no se ubique completamente en el tramo horizontal ni completamente en el inclinado, por lo que sólo parte del peso del volumen del agua contribuya en la cantidad de movimiento. El problema es altamente complejo y ha sido resuelto empíricamente por el USBR en Estados Unidos y por Don pancho J y sus alumnos en Chile.

Generalmente, en las situaciones que involucran resaltos en pendiente mixta, las alturas del torrente y del río son conocidas y lo que se quiere determinar es la longitud del resalto y qué parte de él se encuentra en el canal inclinado.



RELACIONES DEL USBR

El USBR recomienda considerar que la longitud del resalto es la que se obtiene de considerar el lecho horizontal, la que se obtiene de la línea "horizontal apron" en la figura para determinar la longitud del resalto en lechos inclinados, dada anteriormente. La longitud del tramo en pendiente se determina de la figura siguiente:



En la figura, d_2 es la altura conjugada de d_1 , considerando resalto en lecho horizontal y L_p es la longitud del resalto que se encuentra en el lecho inclinado.

En la notación del USBR:

TW \rightarrow h_2

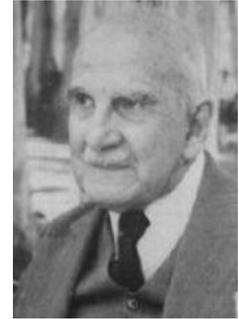
$D_1 \rightarrow d_1$

$D_2 \rightarrow$ altura conjugada de d_1 para un resalto en lecho horizontal

$\tan \phi \rightarrow \tan \alpha$ pendiente del lecho inclinado

RELACIONES DE Don PANCHO J

Las relaciones fueron obtenidas por Don Pancho y sus memoristas de la U. de Chile, C. Bachler y M. Serani, quienes dieron su examen de grado en 1957. Hay que notar que la monografía del USBR, en la que Peterka presentó todas las relaciones antes mencionadas, tanto para resaltos en pendiente como en lechos de pendiente mixta fue impresa por primera vez en Septiembre de 1958.



Las relaciones de los chilenos se traducen en dos gráficos, para cada pendiente, los que permiten determinar la longitud del resalto, L , y la longitud de la fracción en pendiente, L_p . A modo de ejemplo, se muestran las relaciones para una pendiente del lecho inclinado igual a $i = 0,15$. (Debido a la mala calidad de las imágenes no incluyo para otras pendientes. Revisar el libro de Hidráulica de Domínguez).

