



DPTO. INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE
E.T.S.I. CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



FLUJO EN LÁMINA LIBRE. HIDRÁULICA DE CANALES

V. FLUJO RÁPIDAMENTE VARIADO (I) EL RESALTO HIDRÁULICO CONTROLES DE UN CANAL

ÍNDICE:

- ✓ **EL RESALTO HIDRÁULICO**
 - ✓ Análisis, tipologías y caracterización
 - ✓ Localización del R.H.
 - ✓ El R.H. en secciones no rectangulares
 - ✓ El R.H. como dissipador de energía: CUENCOS DISIPADORES
- ✓ **DESAGÜE BAJO COMPUERTA**
 - ✓ Compuerta vertical o de tajadera
 - ✓ Compuerta de segmento o Taintor
- ✓ **VERTEDORES**
 - ✓ Vertederos en pared delgada
 - ✓ Vertederos en pared curva
 - ✓ Vertederos en pared gruesa

INTRODUCCIÓN

DEFINICIÓN DE CONTROL

- Aquella característica o dispositivo del canal que fija una relación entre caudal y calado en sus proximidades.
- Proporciona la c.c necesaria que determina el funcionamiento.
- Todos los controles son transiciones, pero no al contrario.

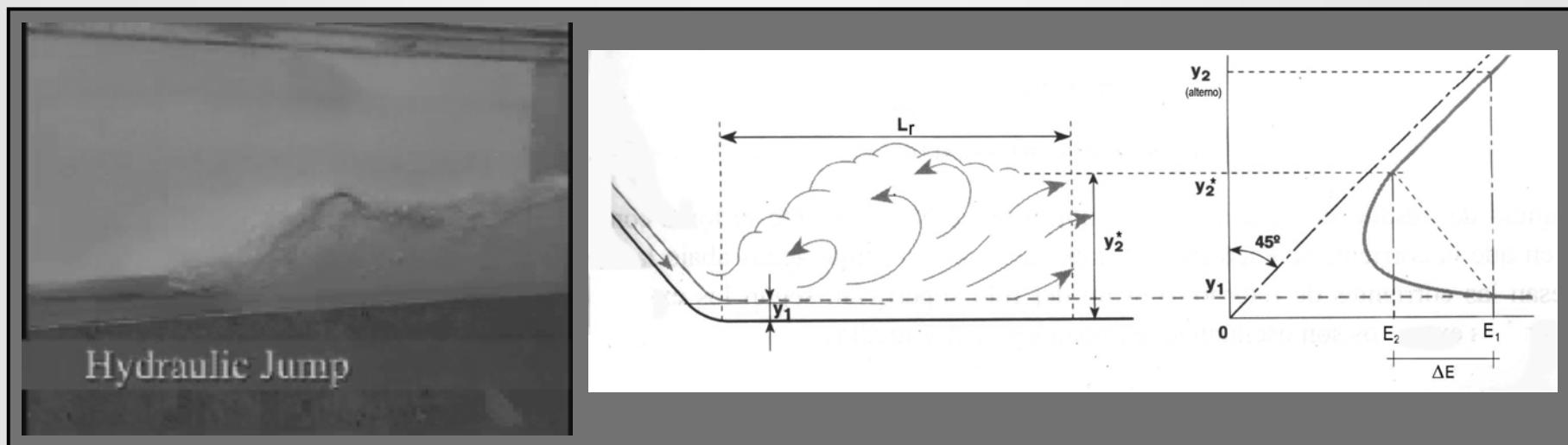
EJEMPLOS

- Secciones Críticas
- El Régimen Uniforme
- Vertederos o vertedores
- Orificios y Desagües bajo Compuertas

RESALTO HIDRÁULICO

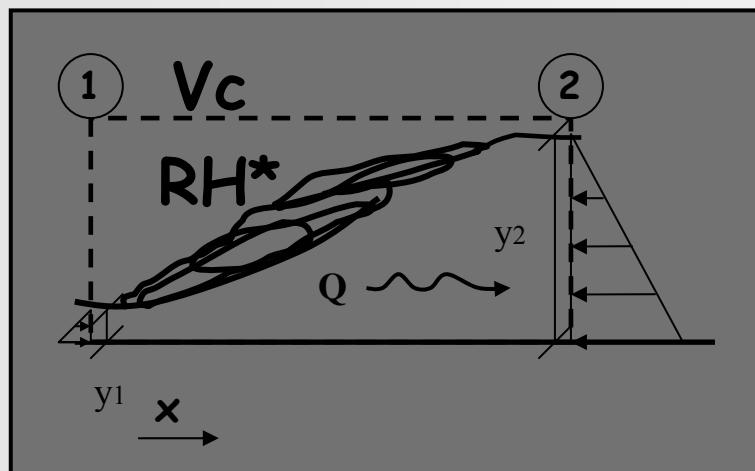
CARACTERÍSTICAS

- Transición local brusca de RR a RL
- Onda de choque estacionaria, si C.C. a. arriba y a. abajo se compatibilizan
- Gran disipación energética
- y_{1R} e y_{2L} se denominan CALADOS CONJUGADOS



ANÁLISIS

- Hipótesis:
 - Velocidad uniforme
 - Distribución hidrostática de P
 - Tensión tangencial en el lecho despreciable
 - Fluctuación turbulenta de velocidad despreciable
 - CANAL RECTANGULAR, sin ningún elemento disipador adicional
RESALTO HIDRÁULICO CLÁSICO (R.H*)
 - PEND. HORIZONTAL \Rightarrow EC. BELANGER (rel. calados conj. en RH*)
- No igualdad Energías



Aplicando Ec. Cantidad Mov. al Vc:

$$\frac{1}{2}\gamma y_1^2 - \frac{1}{2}\gamma y_2^2 = \rho v_2 y_2 (v_2 - v_1)$$

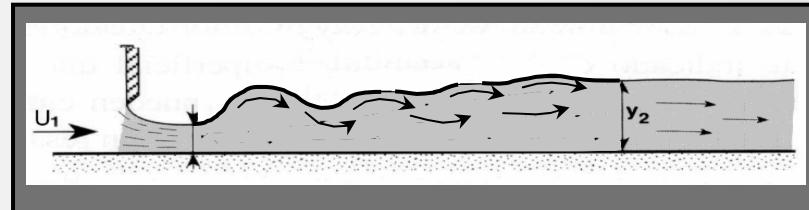
Operando y reordenando:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)$$

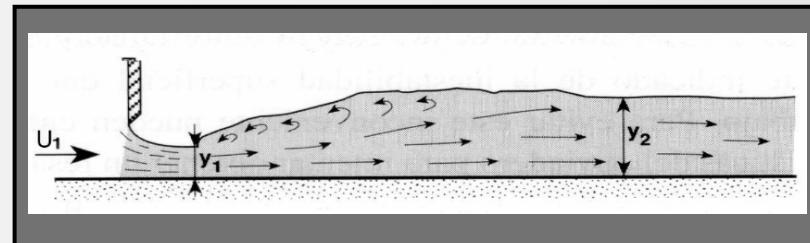
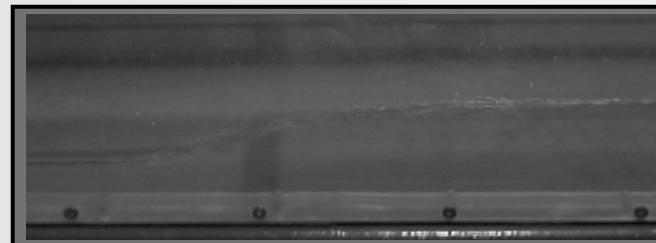
Ec de
BELANGER

Caracterización: TIPOS DE RESALTO

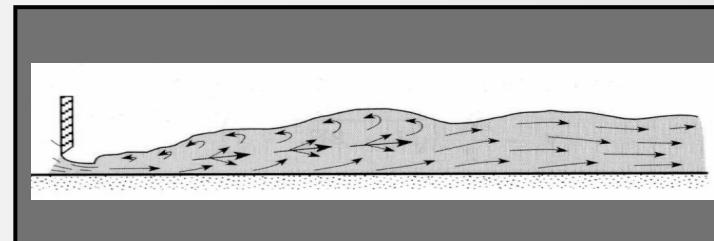
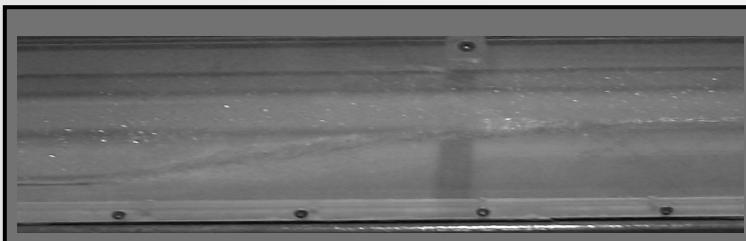
Resalto ondular ($1 < F_1 < 1.7$) La lámina libre presenta ondulaciones. No aceptable en diseño hidráulico.



Resalto débil ($1.7 < F_1 < 2.5$) Se forman pequeños remolinos, pero la superficie aguas abajo permanece lisa. Pérdida de energía escasa.

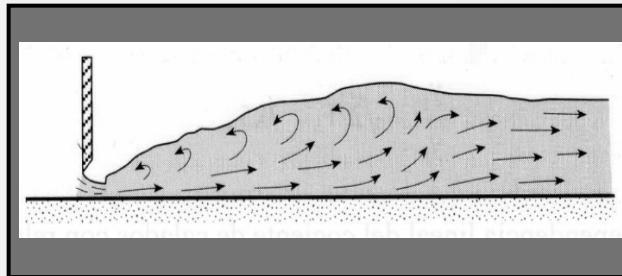
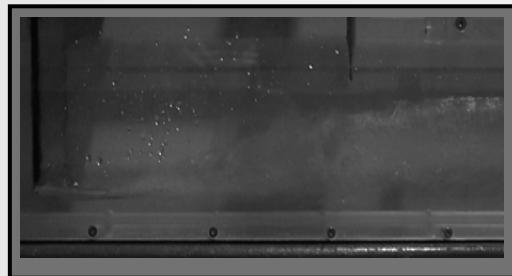


Resalto oscilante ($2.5 < F_1 < 4.5$) Chorro que oscila sumergido; se producen ondas de periodo irregular que pueden viajar varios Km. Debe evitarse.

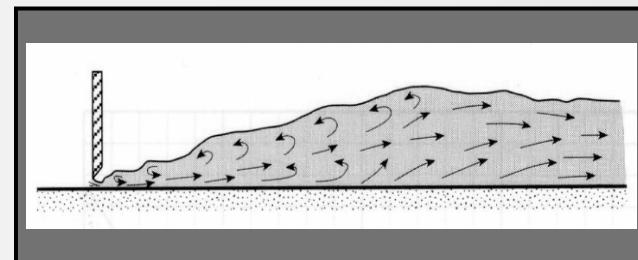
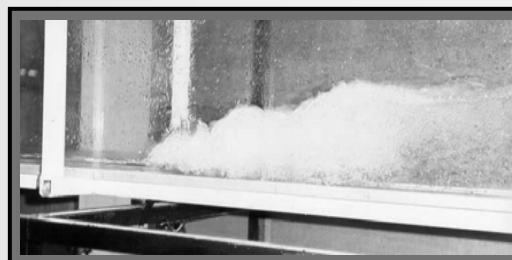


Caracterización: TIPOS DE RESALTO (cont.)

Resalto estacionario ($4.5 < F_1 < 9$) Poco sensible a cambios en Y_2 (posición y longitud). Disipación de energía ~ 45-70%.



Resalto fuerte ($F_1 > 9$) Se genera oleaje. Masas de agua se desprenden del cuerpo del resalto. Disipación energía ~ 85%.



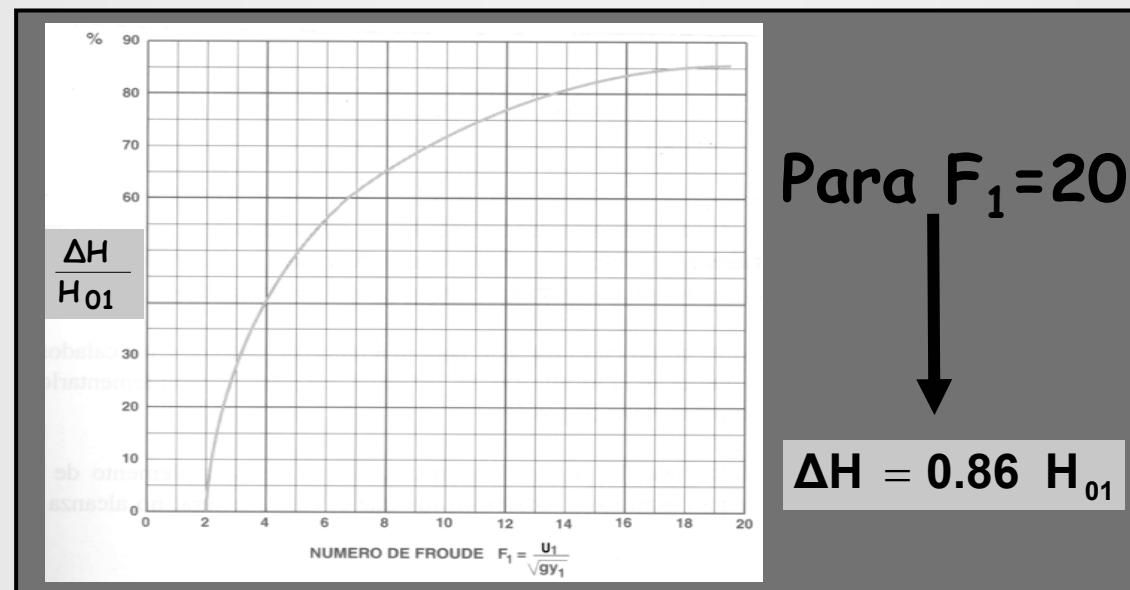
Caracterización: DISIPACIÓN DE ENERGÍA en RH*

En canal rectangular = pérdida de E. Específica:

$$\Delta H = \frac{[y_2 - y_1]^3}{4y_1 y_2}$$

Pérdida de E. Relativa:

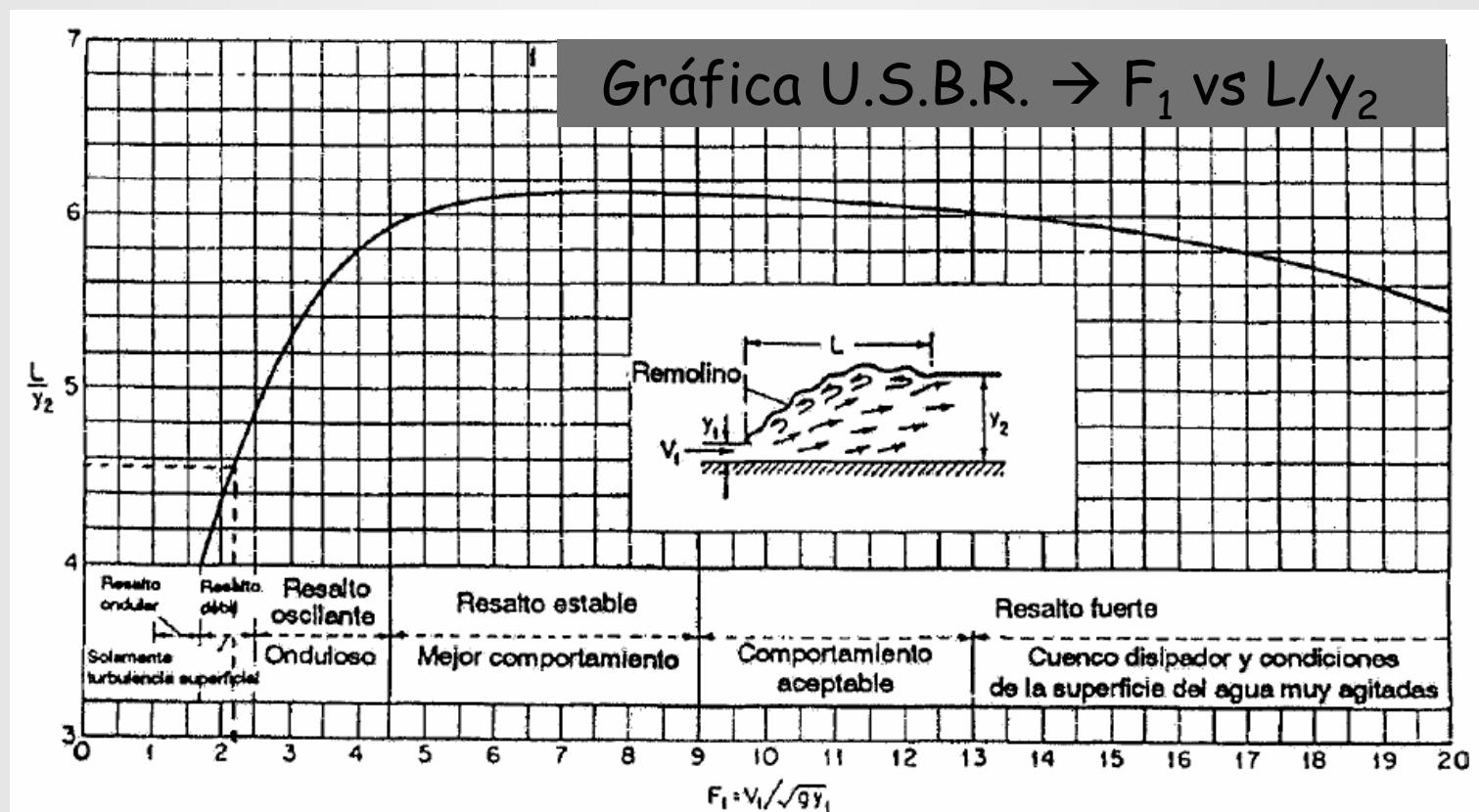
$$\frac{\Delta H}{H_{01}} = \frac{1}{8} \frac{\left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3 \right]^3}{\left(2 + F_1^2 \right) \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)}$$



Caracterización: LONGITUD DEL RESALTO

Distancia desde cara frontal hasta sección inmediata a. abajo del remolino

Diversos resultados experimentales, con resultados dispares



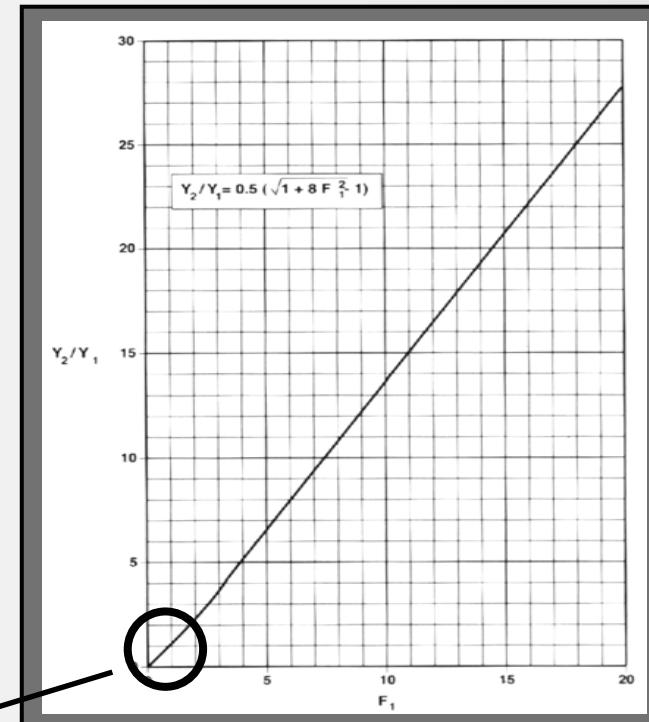
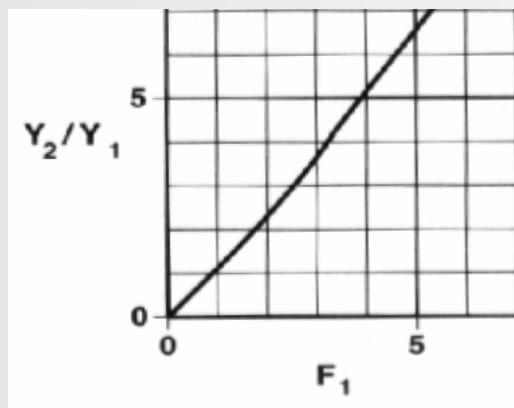
A efectos prácticos, cálculos suponiendo LONG. RESALTO NULA

Caracterización: RELACIÓN DE CALADOS CONJUGADOS

Cuanto $>$ es el N° Froude del flujo supercrítico mayor es su calado conjugado

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

(Ec Belanger)



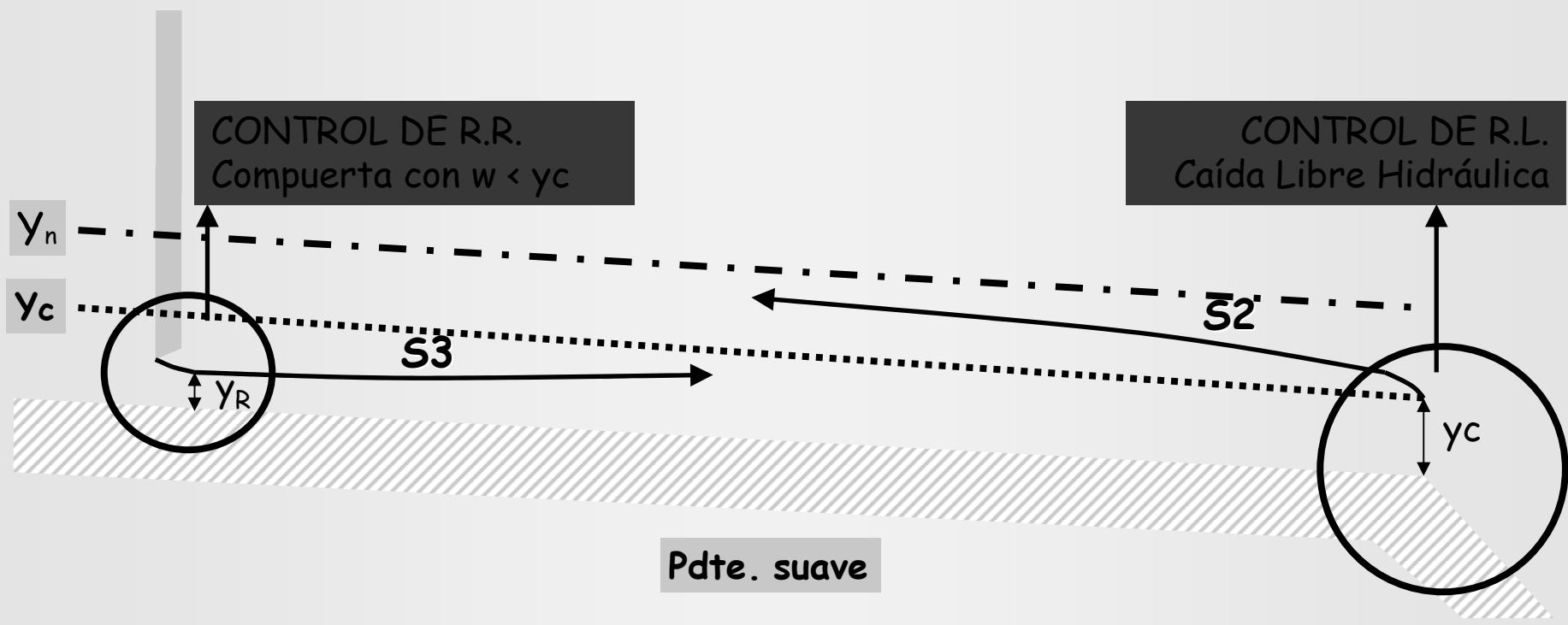
$$F_1 = 1 \Rightarrow y_1 = y_c \Rightarrow y_2 = y_1$$

LOCALIZACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO

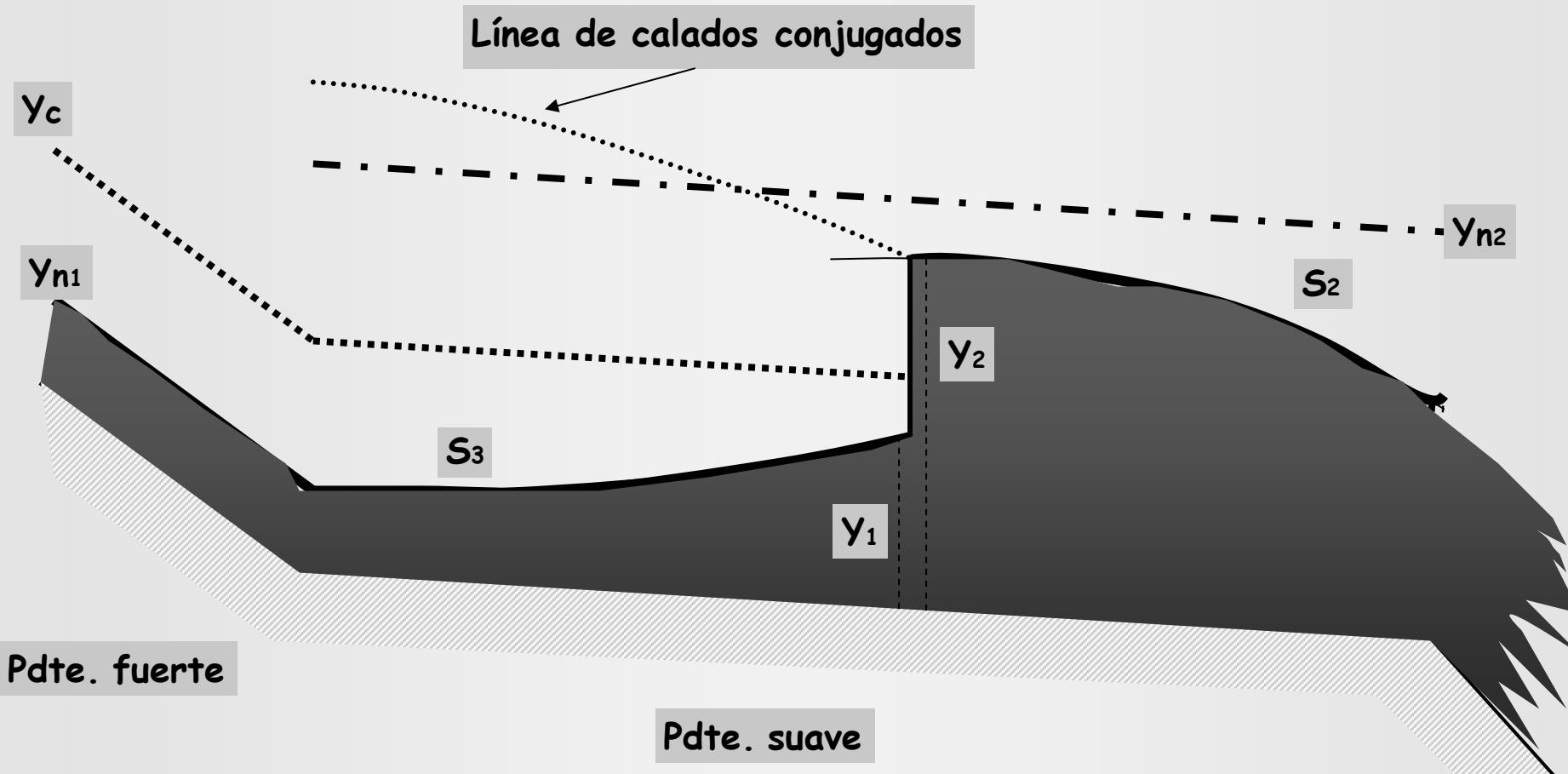
Sección donde se compatibilizan las condiciones

- de el R.R. (impuestas desde a. arriba)
- y de el R.L. (impuestas desde a. abajo)

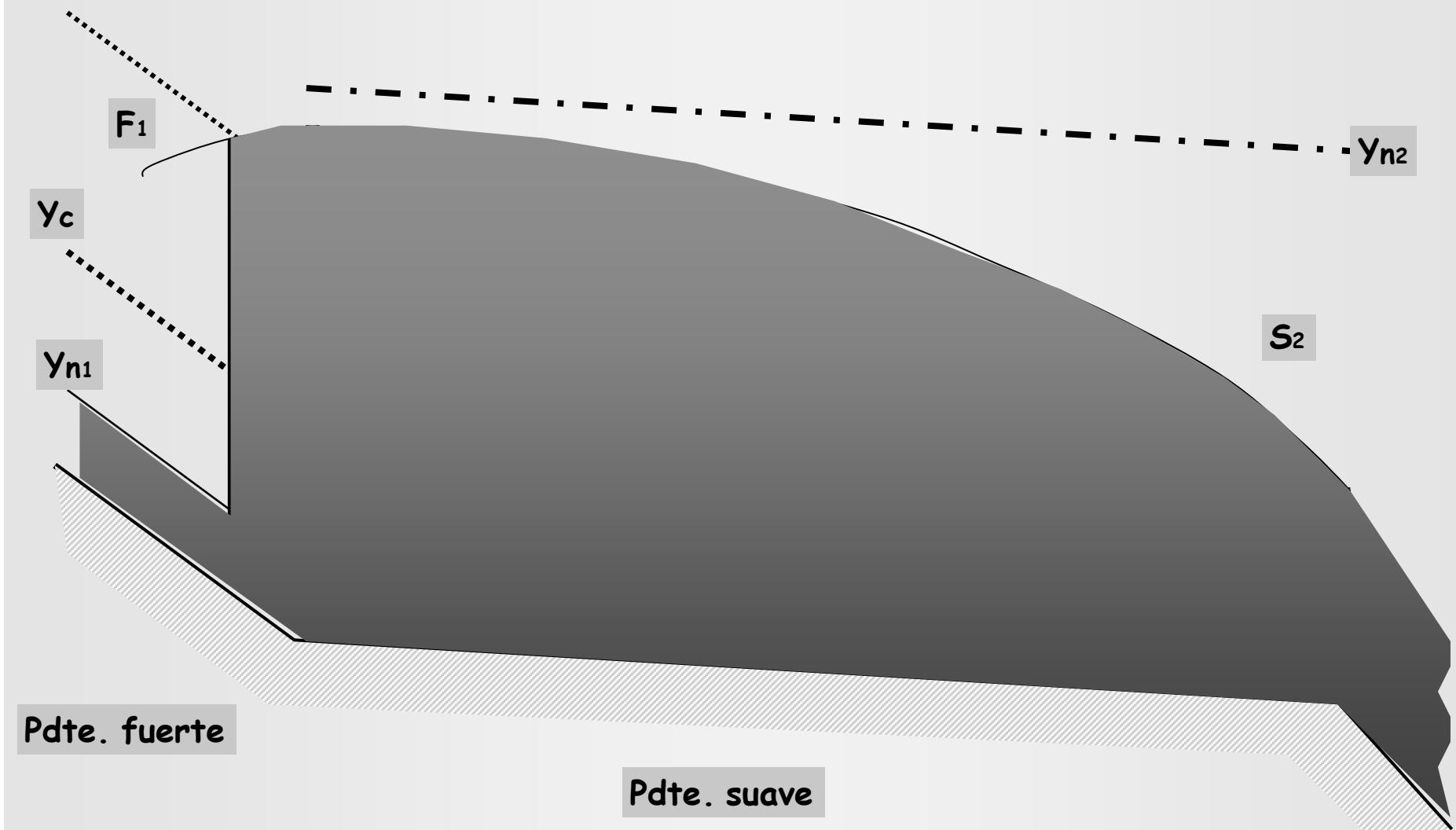
Sección de compatibilización = calado del R.R., calado del R.L. y
nº Froude satisfacen EC. CALADOS CONJUGADOS (Belanger si
secc. rectangular)



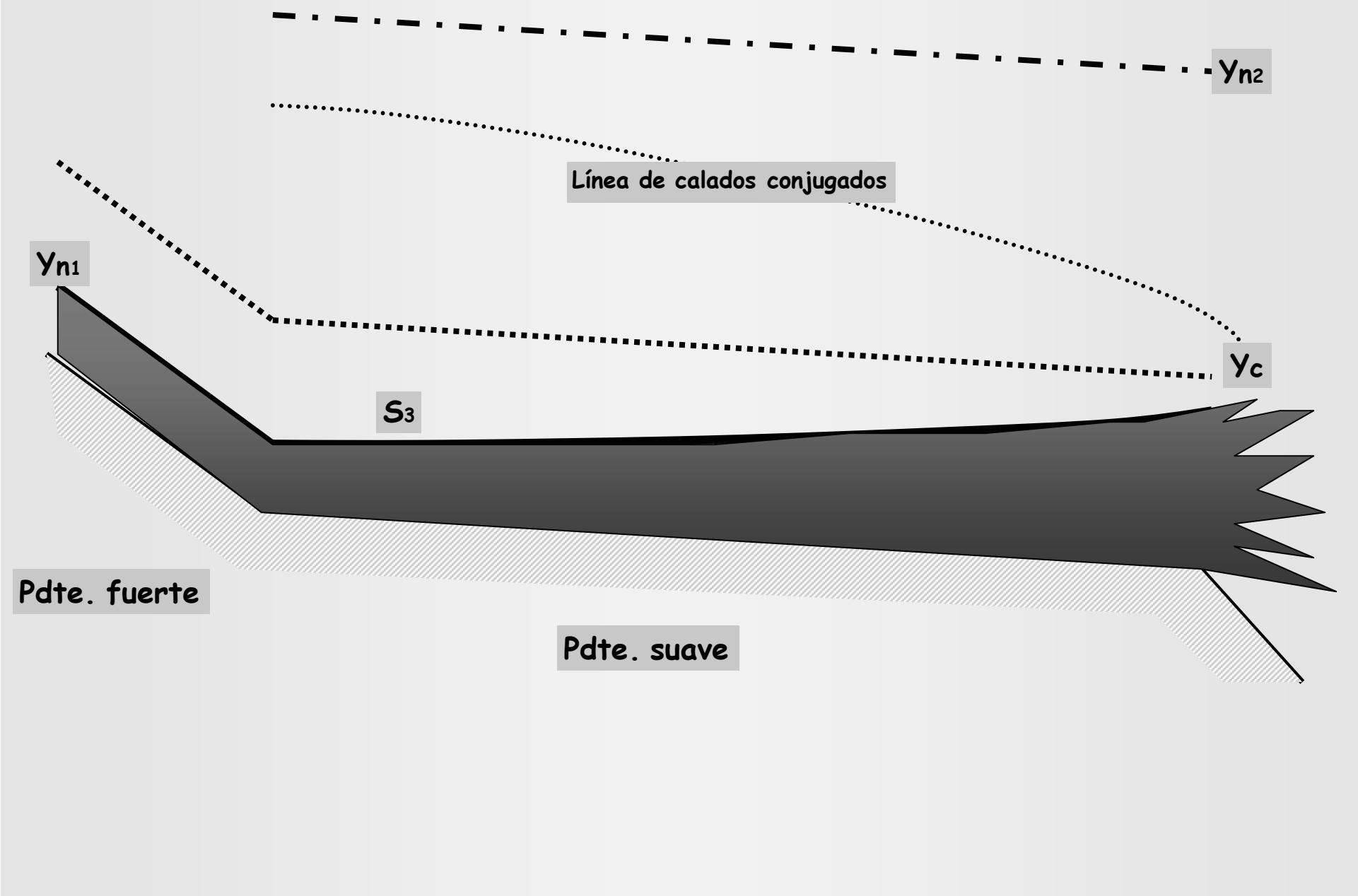
CÁLCULO PRÁCTICO DE LA UBICACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO



CÁLCULO PRÁCTICO DE LA UBICACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO



CÁLCULO PRÁCTICO DE LA UBICACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO



Resalto en secciones NO RECTANGULARES

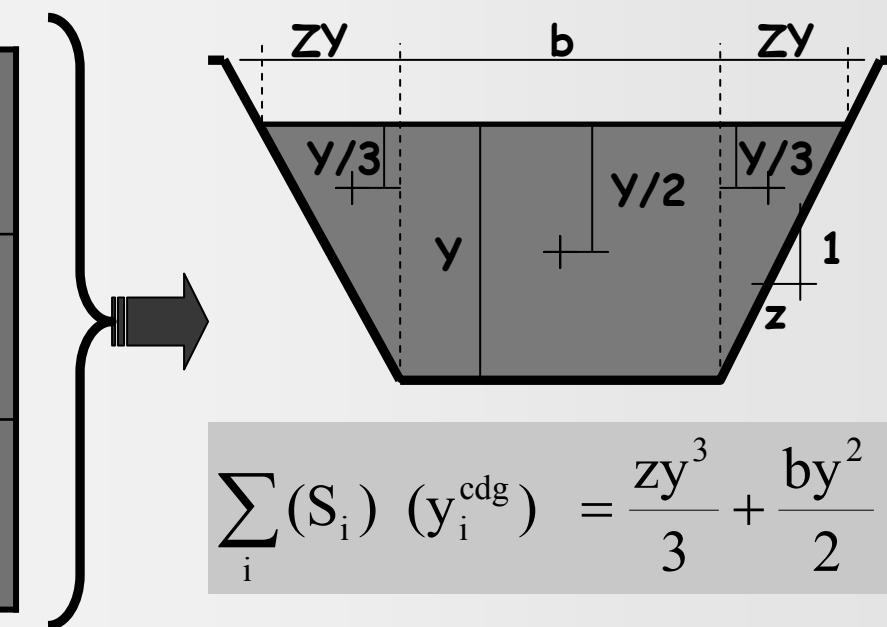
$$\gamma S_1 y_1^{\text{cdg}} - \gamma S_2 y_2^{\text{cdg}} = \rho Q(v_2 - v_1)$$

Concepto: Fuerza Específica Constante

$$\sum_i (S_i)_1 (y_i^{\text{cdg}})_1 + \frac{Q^2}{g \sum_i (S_i)_1} = \sum_i (S_i)_2 (y_i^{\text{cdg}})_2 + \frac{Q^2}{g \sum_i (S_i)_2}$$

Ejemplo: S.T. TRAPEZOIDAL:

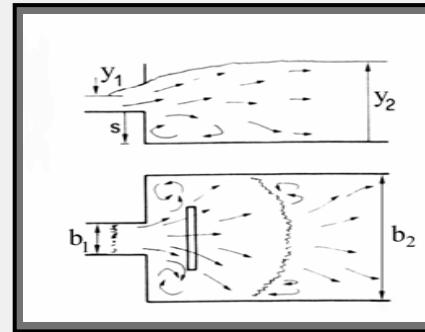
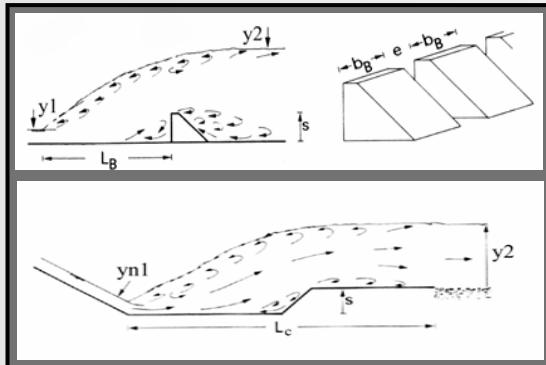
S_i	$\frac{1}{2}(zy^*y)$	by	$\frac{1}{2}(zy^*y)$
$(y^{\text{cdg}})_i$	$y/3$	$y/2$	$y/3$
$S_i (y^{\text{cdg}})_i$	$zy^3/6$	$by^2/2$	$zy^3/6$



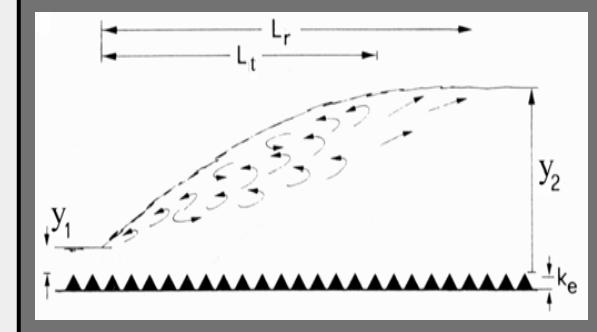
CUENCOS DISIPADORES DE RESALTO

- Tramo diseñado para confinar total o parcialmente el RH
 - Elementos adicionales

Geometría de fondo en alzado y planta



Incremento de la rugosidad



• Cuencos tipificados

USBR TIPO IV: Barranco de las Ovejas (Alicante)

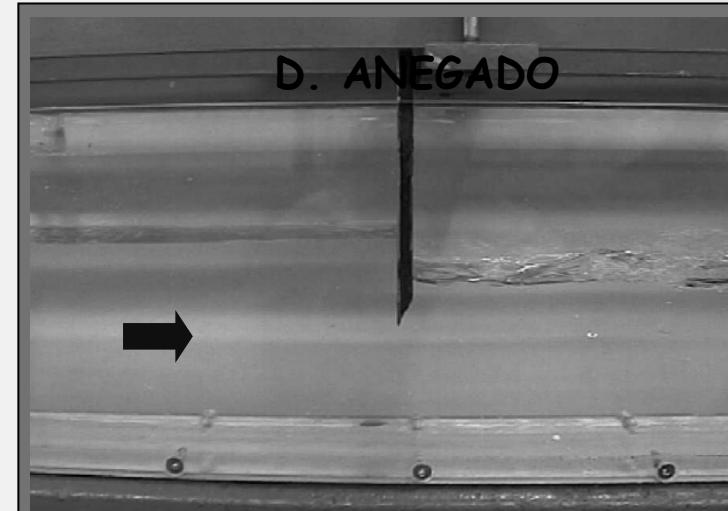
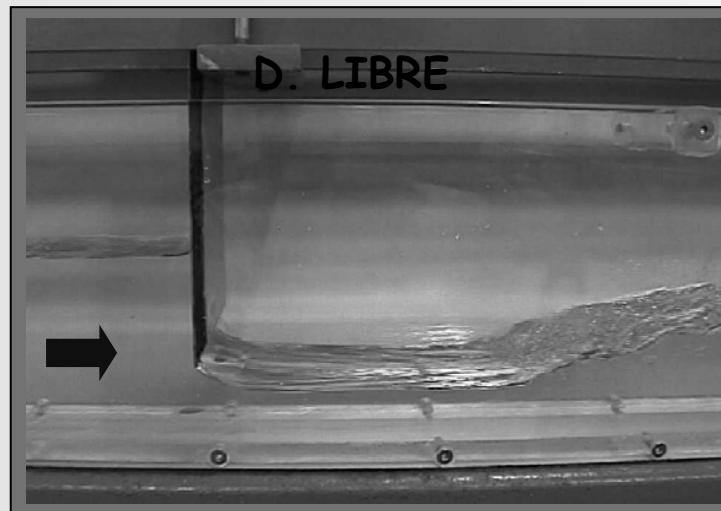


DESAGÜE BAJO COMPUERTA

CARACTERÍSTICAS:

- Sup. libre interrumpida: flujo bajo la acción del peso del agua
- Cara inf. chorro en contacto con contornos: fricción en la salida
- Contracción de la vena fluida
- Flujo suavemente convergente → válida aprox. Igualdad Energía

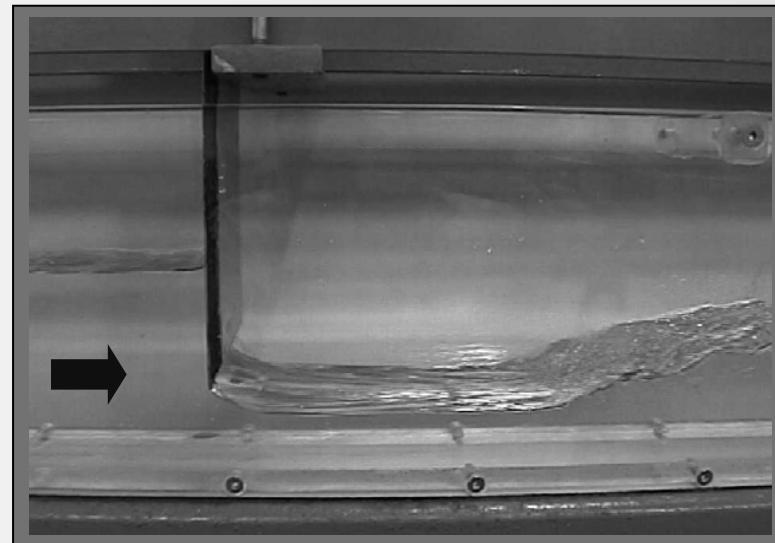
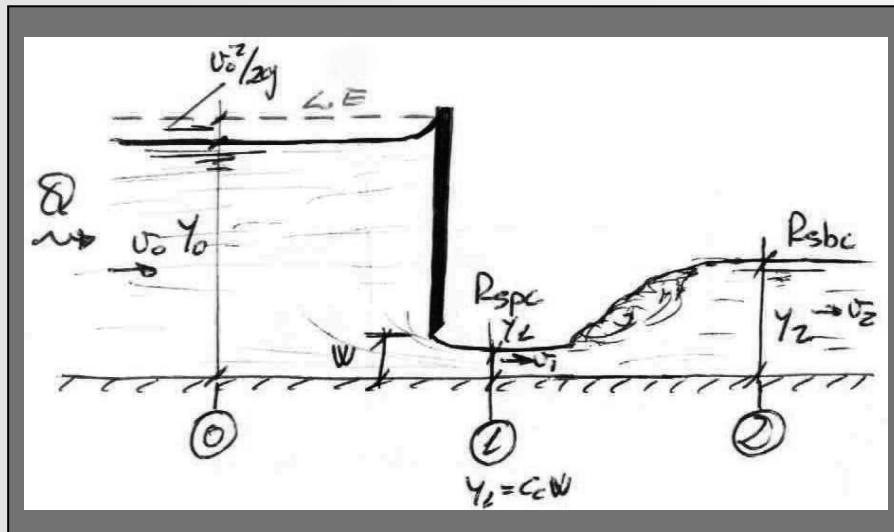
2 TIPOS DE DESAGÜE:



DESAGÜE BAJO COMPUERTA

COMP. VERTICAL O DE TAJADERA: DESAGÜE LIBRE

- D. LIBRE si se produce en Rég. Supercrítico



- Condición de desagüe libre:

$$\overline{y_{IR}} > \overline{y_{IL}} \quad \text{o bien} \quad \overline{y_{IL}} > \overline{y_{IR}} = w \cdot C_C$$

- Tramo ag. arr. compuerta desconectado hidráulicamente del tramo ag. ab. → CONTROL

COMP. DE TAJADERA: DESAGÜE LIBRE

- ANÁLISIS DEL DESAGÜE, si SECC. RECTANGULAR:

- Continuidad entre 0 y 1 (ud. ancho):

$$y_0 V_0 = C_C w V_1$$

- Energía entre 0 y 1 (ud. ancho):

$$y_0 + \frac{q^2}{2gy_0^2} = C_C w + \frac{q^2}{2gC_C^2 w^2}$$

- Operando y reordenando términos:

$$q = C_C w y_0 \sqrt{2g} \frac{1}{\sqrt{y_0 + C_C w}}$$



$$q = C_d w \sqrt{2gy_0}$$

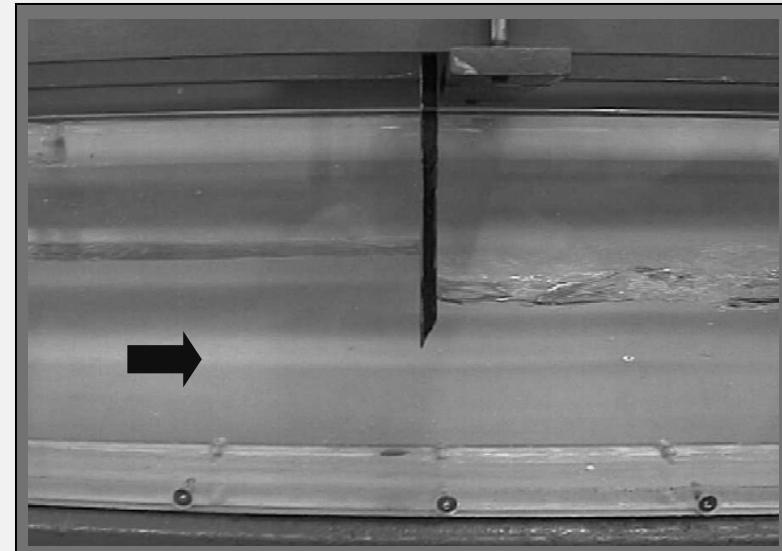
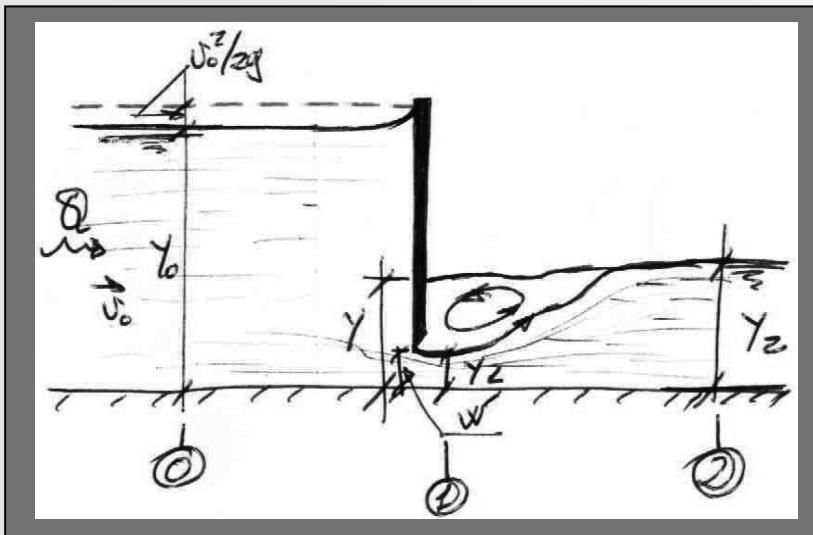
con:

$$C_{d_{teor}} = \frac{C_C}{\sqrt{1 + \frac{C_C w}{y_0}}}$$

Habit. $C_C \in (0.5, 0.7)$
Norm. $C_C \approx 0.6$

COMP. DE TAJADERA: DESAGÜE ANEGADO

- D. ANEGADO si $C_C \cdot w$ da un y_R cuyo conjugado es < que el y_L impuesto por las condiciones de ag. abajo



- Condición de Anegamiento:

$$\overline{y_{IR}} < y_{2L} \quad \text{o bien} \quad \overline{y_{2L}} < y_{IR} = w \cdot C_C$$

inexistencia de calados conj.
ag. abajo de la compuerta

- Tramo ag. arr. comp. conectado hidráulicamente con tramo ag. ab.
- Capacidad de desagüe menor

COMP. DE TAJADERA: DESAGÜE ANEGADO

- ANÁLISIS DEL DESAGÜE:
 - Aproximado como "Flujo Dividido"
 - Pérdida Energía se produce exclusivamente entre 1 y 2

- Energía entre 0 y 1:

$$H_{tot_0} \equiv H_{tot_1} \rightarrow y_0 + \frac{q^2}{2gy_0^2} = y + \frac{q^2}{2gy_1^2}$$

- C. Movimiento entre 1 y 2:

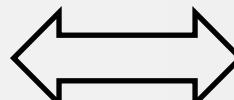
$$M_1 \equiv M_2 \rightarrow q^2 / gy_1 + \frac{y^2}{2} = q^2 / gy_2 + y_2^2 / 2$$

- FÓRMULA PRÁCTICA, a partir de Ec. Energía y asumiendo $y \approx y_2$:

$$q = C_d w \sqrt{2g y_0}$$

$$q = C_d w \sqrt{2g(y_0 - y)}$$

con: $C_d = C_C \frac{\sqrt{1 - y/y_0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{C_C w}{y_0}\right)^2}}$

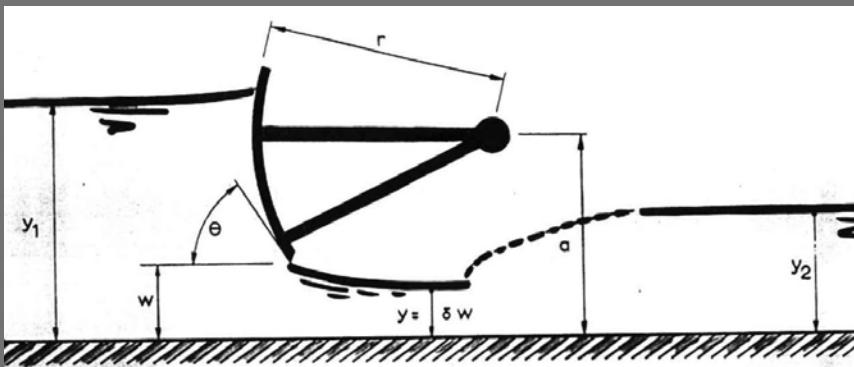


con: $C_d = \frac{C_C}{\sqrt{1 - \left(\frac{C_C w}{y_0}\right)^2}}$

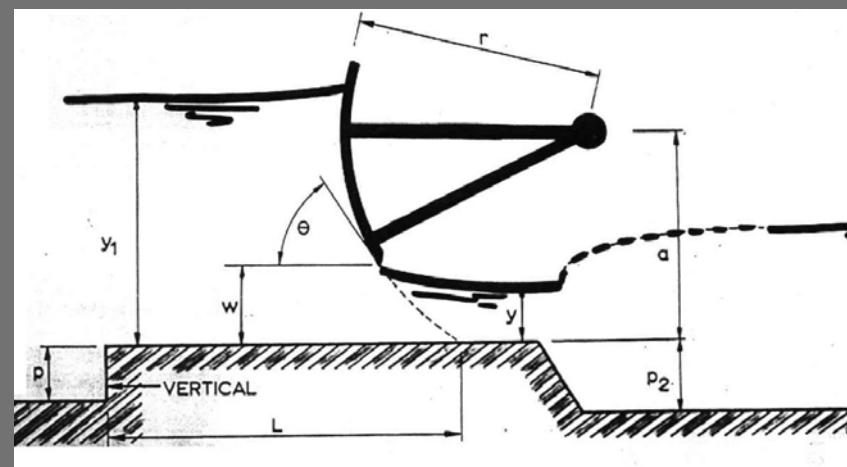
COMPUERTA DE SEGMENTO O TAINTOR

- Conceptualmente similar al desagüe bajo comp. tajadera

COMP. TAINTOR SOBRE SOLERA



COMP. TAINTOR SOBRE UMBRAL

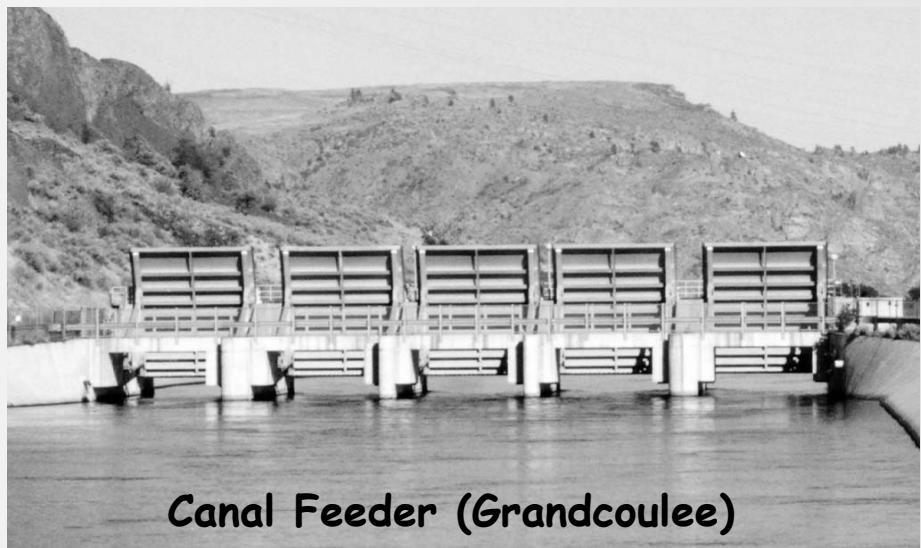


EJ.: COMPUERTA VERTICAL



TRASVASE TAJO-SEGURA. Torrealta (Murcia)

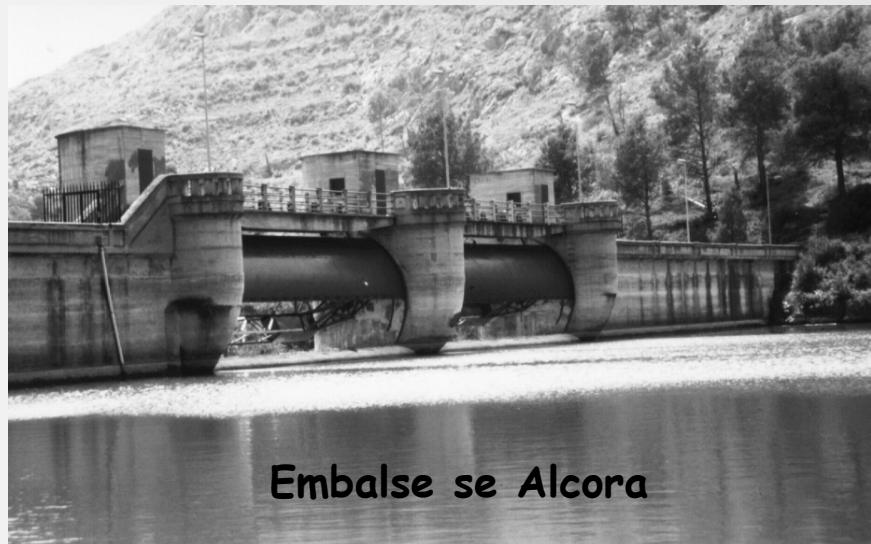
EJ.: COMPUERTA TAINTOR



Canal Feeder (Grandcoulee)



Golas de Puchol, Perelló y Perellonet (Albufera)



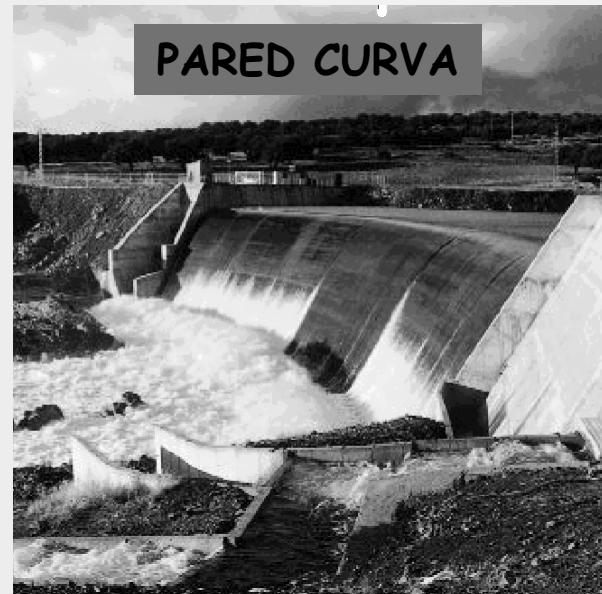
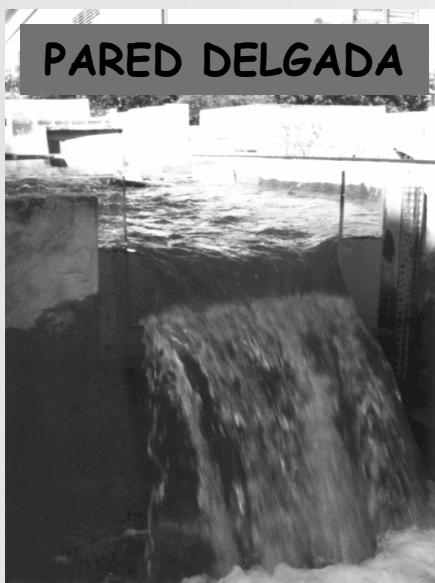
Embalse se Alcora

VERTEDORES

CARACTERÍSTICAS:

- Estructuras que fuerzan al paso del agua por encima
- Utilidad: control del flujo → ec. tipo $Q = f(y)$ → aforadores

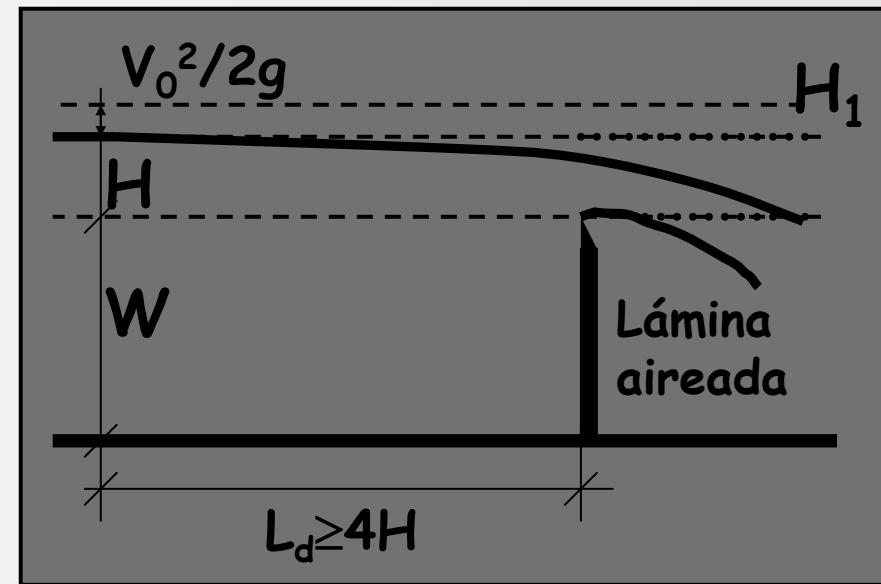
DIVERSOS TIPOS:



VERTEDERO EN PARED DELGADA

- Umbral de pequeño espesor con forma biselada
- Se genera un chorro que pasa a la atmósfera

DEDUCCIÓN TEÓRICA EC.
VERTEDERO RECTANGULAR:



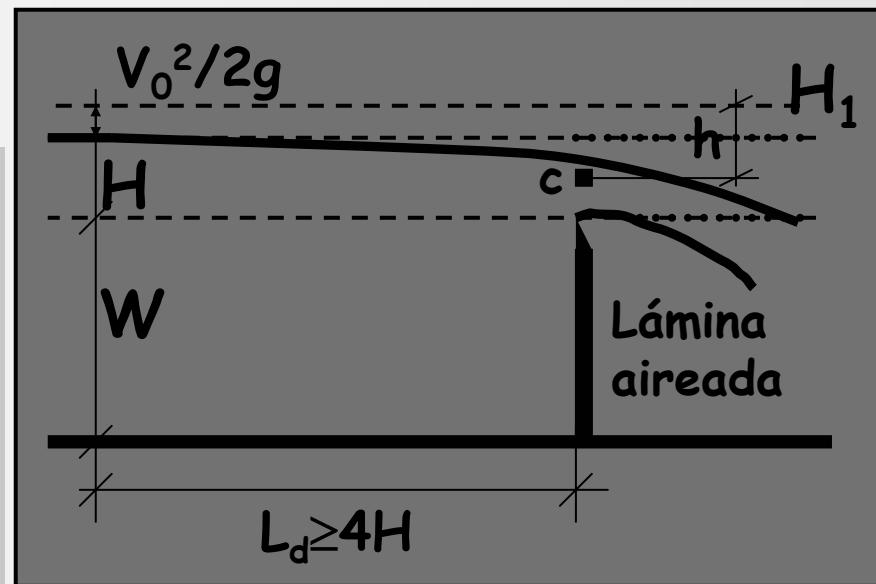
Hipótesis:

- Umbral espesor despreciable
- Sección rectangular
- Flujo bidimensional sin contracción lateral
- Sin contracción vertical
- Presión atmosférica en la salida
- Aireación inferior lámina vertiente adecuada

VERTEDERO EN PARED DELGADA

$$v_c = \sqrt{2gh}$$

$$q_{\text{teórr}} = \int_{\frac{v_0^2}{2g}}^{v_0^2+H} \sqrt{2gh} dh = \frac{2}{3} \sqrt{2g} h^{3/2} \left[\frac{v_0^2}{2g} + H \right] = \\ = \frac{2}{3} \sqrt{2g} H^{3/2} \left[\left(\frac{v_0^2}{2gH} + 1 \right)^{3/2} - \left(\frac{v_0^2}{2gH} \right)^{3/2} \right]$$



• Considerando la contracción vertical (en interior de chorro $P > P_{atm}$)

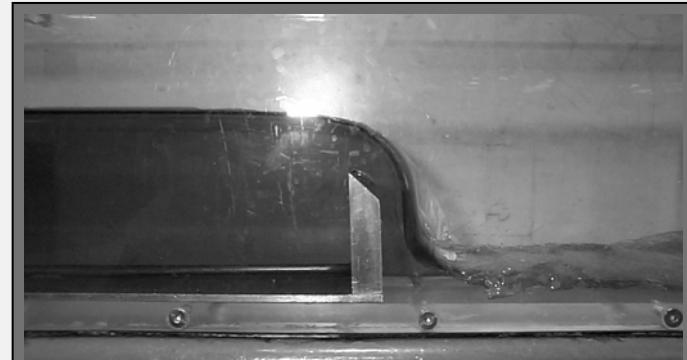
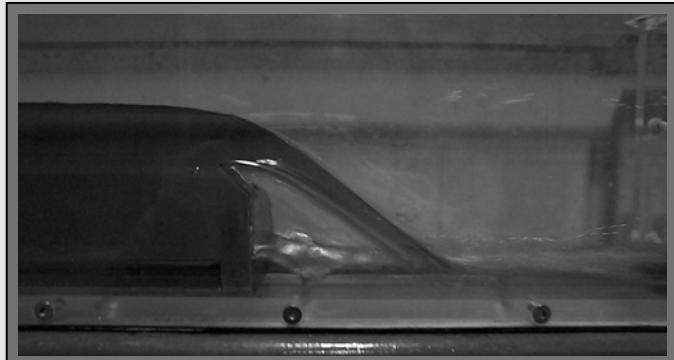
$$q_{\text{real}} = \frac{2}{3} C_c \sqrt{2g} H^{3/2} \left[\left(\frac{v_0^2}{2gH} + 1 \right)^{3/2} - \left(\frac{v_0^2}{2gH} \right)^{3/2} \right] \rightarrow q_{\text{real}} = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} H^{3/2}$$

C_c = coef contracción

C_d = coef desagüe o descarga

EFFECTO DE LA AIREACIÓN

Importante aireación inferior de la lámina vertiente. Si no, efectos indeseables (p.e., ΔQ descarga → no recomendable medición)

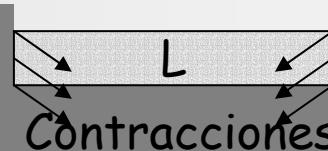


EFFECTO DE LA CONTRACCIÓN

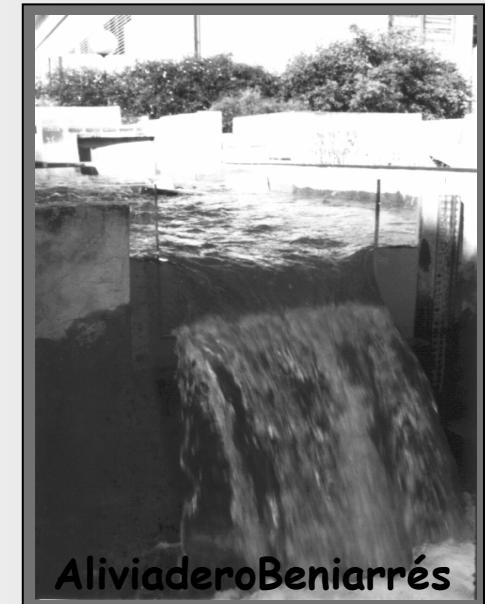
En V. RECTANGULAR, efecto en cada lado = $1/10$ de H (si $L > 3 \cdot H$)

$$Q_{\text{contr}} = C_d (2/3) [2g]^{1/2} (L - 0.1 n H) H^{3/2}$$

$n = 2$



$n = 1$



VERTEDERO EN PARED CURVA

Se utiliza en presas

- Forma de aliviadero acomodada a la lámina vertiente
- P_{at} en napa de caída si fricción no induce cambios

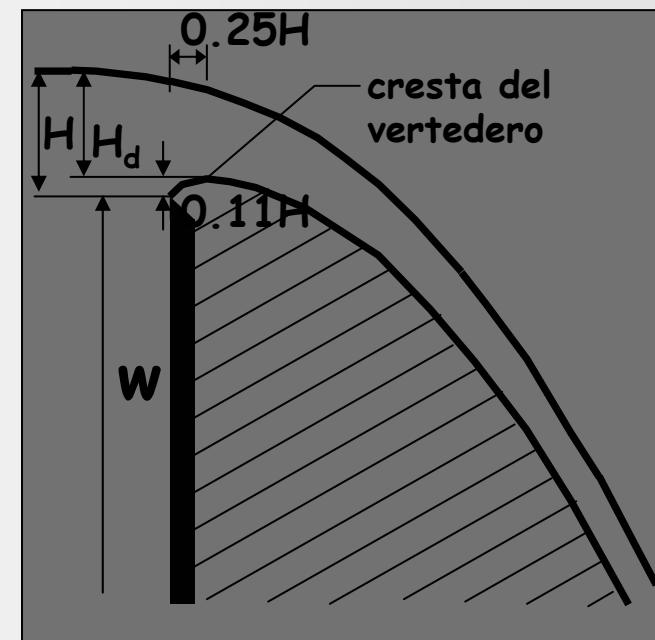


ECUACIÓN DE DESCARGA

Capacidad de descarga es la del vertedero en pared delgada:

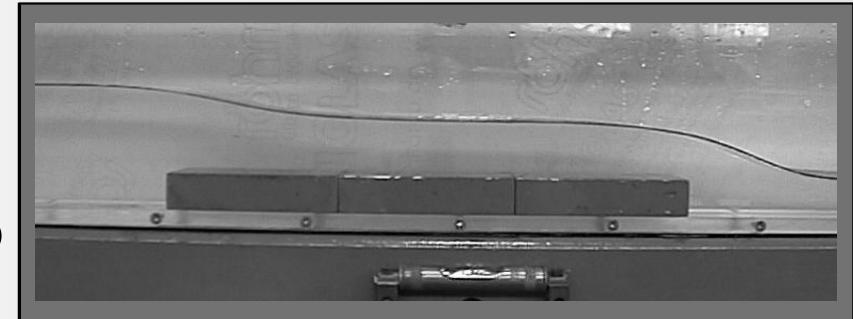
$$Q = \frac{2}{3} C_d B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (H_d)$$

Altura vel. desprec. si $W > 1,33 \cdot H_d$



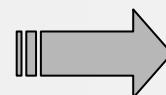
VERTEDERO EN PARED GRUESA

- Umbral de longitud significante
- P_{hidrost} sobre la cresta
- Finalidad: generar R.P.U. Crítico



DEDUCCIÓN TEÓRICA EC. VERTEDERO RECTANGULAR

$$y_c = \frac{2}{3} \cdot H_{o_c}$$



$$H_{o_c} = H_{o_1} - W = H_1$$

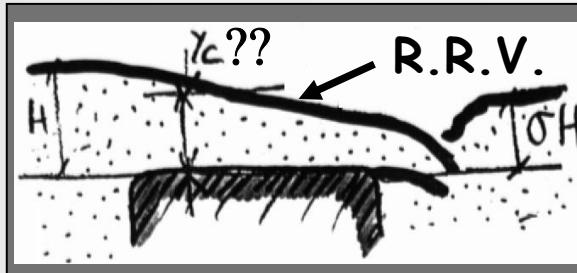
$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} H_1^{3/2} \quad C_d = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

LIMITACIONES DE DISEÑO

Longitud umbral que garantice R.P.U. crítico

$$0.10 \leq \frac{H}{L} \leq 0.50 \quad \forall Q$$

- Vertedero corto ($H/L \geq 0.50$)



- Vertedero largo ($H/L \leq 0.1$)

