



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS



Influencia de la aireación en rápidas y cuencos de resalto **LS-EMULSION** **LINEA D**

David López

Rubén Díaz

Juan José Rebollo

Laboratorio de Hidráulica

Centro de Estudios Hidrográficos (CEH)

(CEDEX)

CEDEX

- ⇩ Presentación de la instalación experimental.
 - Modelo físico
 - Instrumentación
- ⇩ La aireación en las estructuras hidráulicas. Rápidas y cuencos.
- ⇩ La experimentación.
- ⇩ Análisis de los ensayos en rápida aireada.
- ⇩ Análisis de los resultados en el resalto hidráulico.
- ⇩ Conclusiones



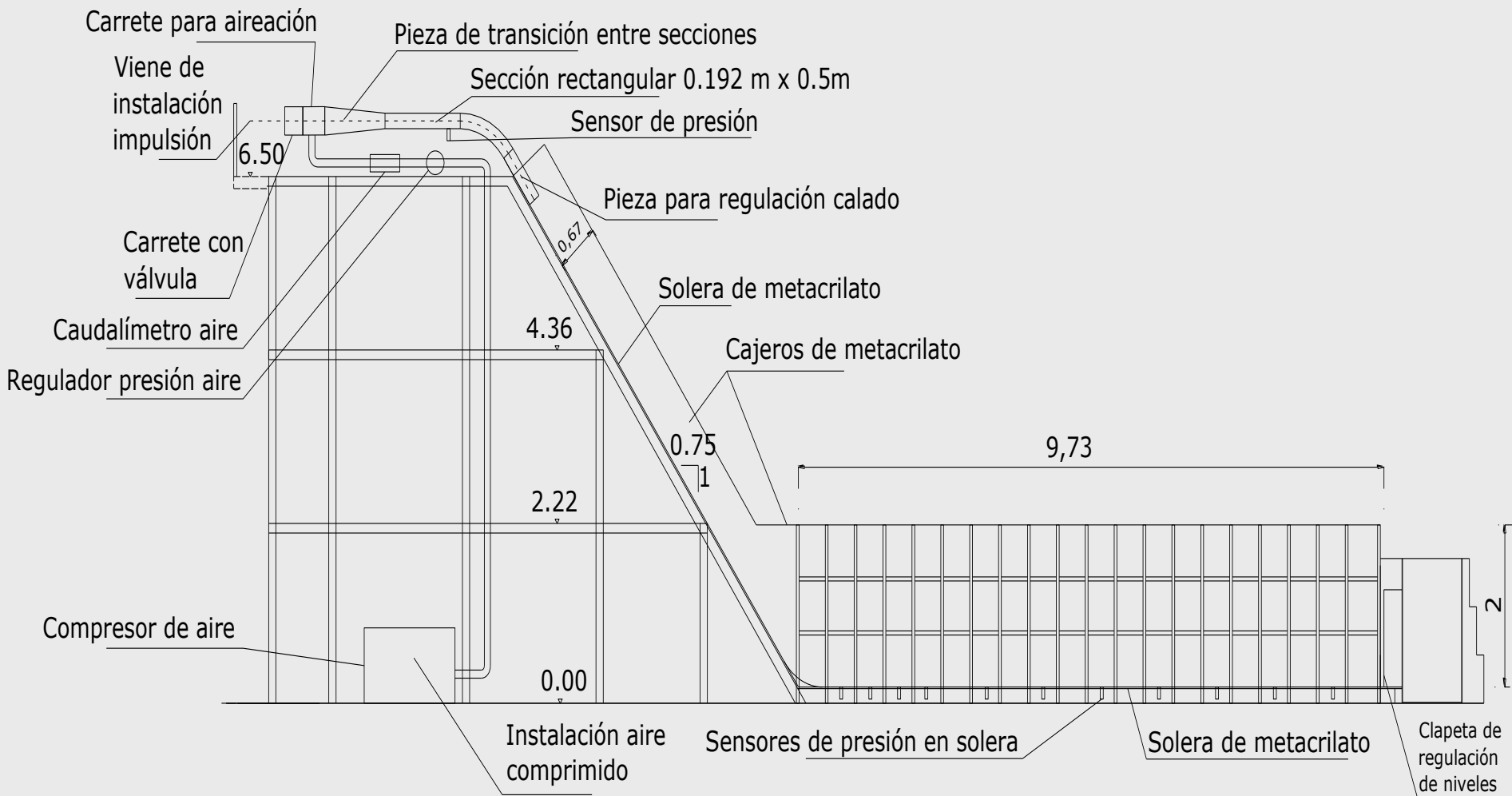
GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

LS-EMULSION. Modelo físico





GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

LS-EMULSION. Modelo físico



CEDEX



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

LS-EMULSION. Modelo físico

Instrumentación

Medidas del flujo de agua y aire de entrada



EMULSIONA (LS-EMULSION) Instrumentación

Medidas de presión y velocidad en el resalto





GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

EMULSIONA (LS-EMULSION) Instrumentación

Medidas de concentración de aire y velocidad en la rápida

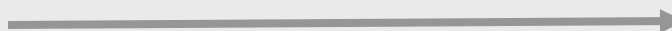
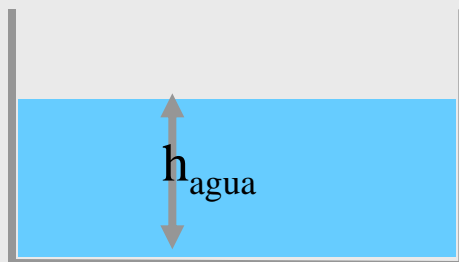


Mecanismos de disipación

- ⇩ Fricción con el contorno
- ⇩ Viscosa turbulenta.
- ⇩ Rotura y reagrupamiento de las burbujas.

Fricción con el contorno

$$I_f = \frac{n^2 Q^2}{S^2 R_h^{4/3}}$$



Manteniendo Q_{agua} y n cte.,
la aireación aumenta el
calado emulsionado

Si aumenta
 R_h y S



Disminuye I_f y por tanto aumenta
la velocidad del medio bifásico

Al aumentar la
velocidad, si $Q_{\text{agua}} = \text{cte.}$,
se reduce algo la h_{agua}

$$\tau_f = \gamma_{\text{agua}} h_{\text{agua}} I_f$$

Disminuye la tensión de
fondo

La aireación reduce la fricción con el
contorno y esto puede acelerar el flujo



Influencia del aire en la turbulencia

- ⇓ De acuerdo con Hinze(1955) la aireación afecta a los mecanismos de disipación viscosa turbulenta.
- ⇓ Hinze propone un fórmula teórica sin base experimental.

División y reagrupamiento de burbujas (Chanson)

- ↓ La diferencia de tensión tangencial entre capas de fluido produce efecto cizalla que divide las burbujas, que se reagrupan en zonas de choques.
- ↓ Este proceso debe vencer la tensión superficial lo que produce una disipación de energía (paso a calor).
- ↓ Cuanto mayor sea la fricción más pequeñas serán las burbujas y mayor será la disipación.

LS-EMULSION.

Ensayos en rápida

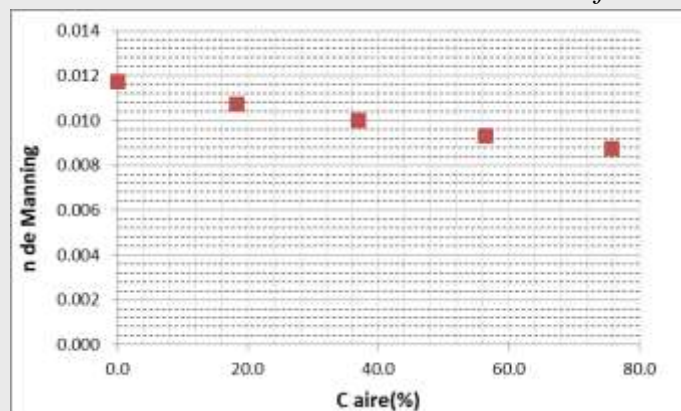
↓ Ensayos:

- Apertura de boquilla: 4, 8 y 12 cm.
- Caudal agua: de 100 a 400 l/s.
- Concentración de aire (0 a 70 %).

↓ Medidas:

- Caudal de agua y aire.
- Presión en conducción.
- Velocidad y Concentración al pie.

↓ Resultados: Δh rápida. $I_f = \frac{\Delta h_{rapida}}{L}$



$$n = \frac{I_f R_h^{2/3}}{V_m}$$





GOBIERNO
DE ESPAÑA

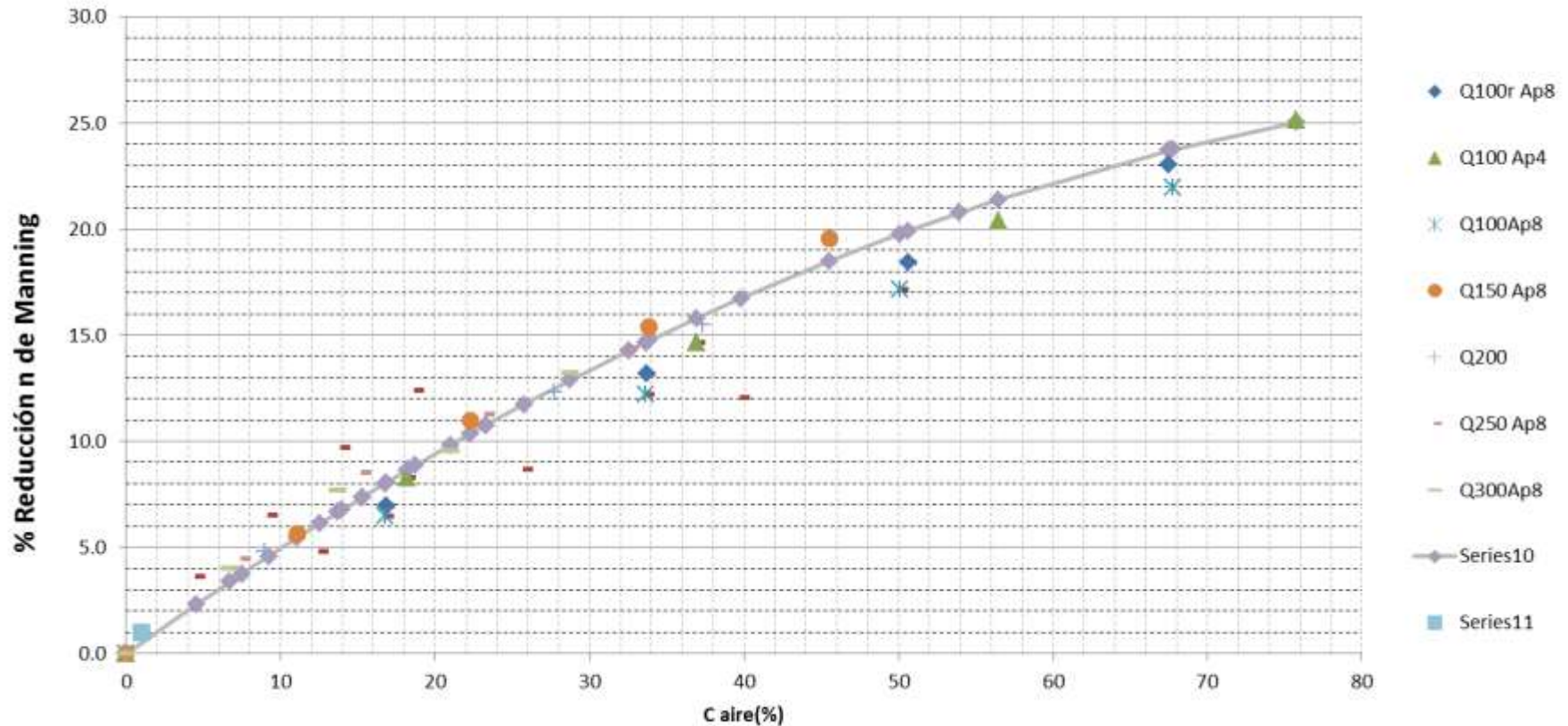
MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

LS-EMULSION.

Influencia de la aireación en la rápida



$$n_{aireado} = n C(\%)(0.52 - 0.0025C(\%))$$



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

LS-EMULSION. Ensayos resalto.

$$Q_{\text{agua}}=300\text{l/s} \quad ; \quad Q_{\text{aire}}=0 \quad ; \quad F_1=13.1$$



CEDEX



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO


MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

LS-EMULSION. Ensayos resalto.

$$Q_{\text{agua}} = 100 \text{ l/s}$$

$F_1 = 11.1 \quad C = 0\%$




$F_1 = 11.6 \quad C = 17\%$



$F_1 = 12.0 \quad C = 33\%$



$F_1 = 12.4 \quad C = 50\%$



$F_1 = 13.0 \quad C = 67\%$





GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS


LS-EMULSION. Ensayos resalto.

$$Q_{\text{agua}}=200 \text{ l/s}$$


$F_1=11.9$ $C=0\%$




$F_1=13.2$ $C=9\%$




$F_1=13.4$ $C=18\%$



$F_1=13.6$ $C=28\%$



$F_1=13.9$ $C=37\%$





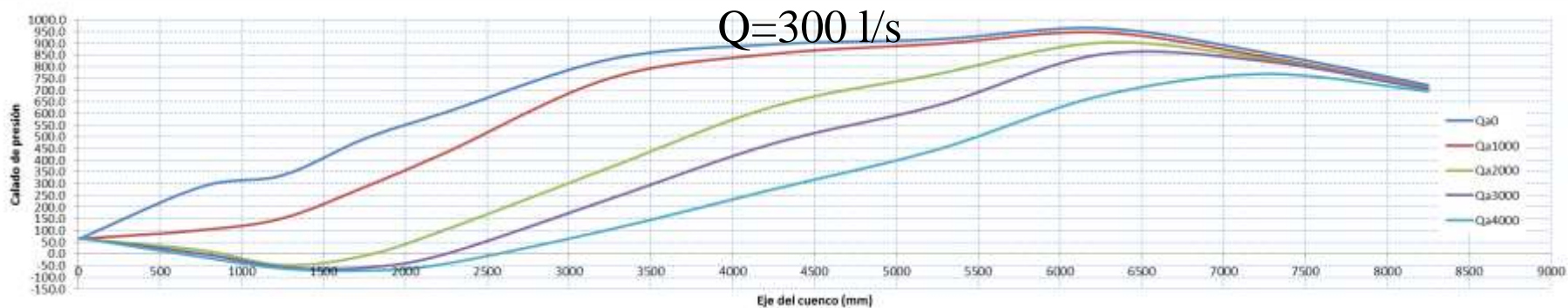
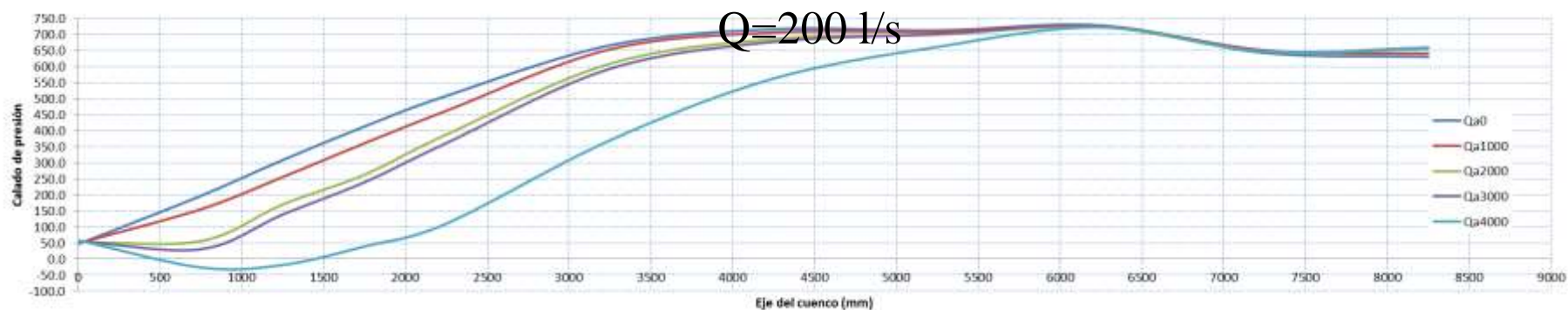
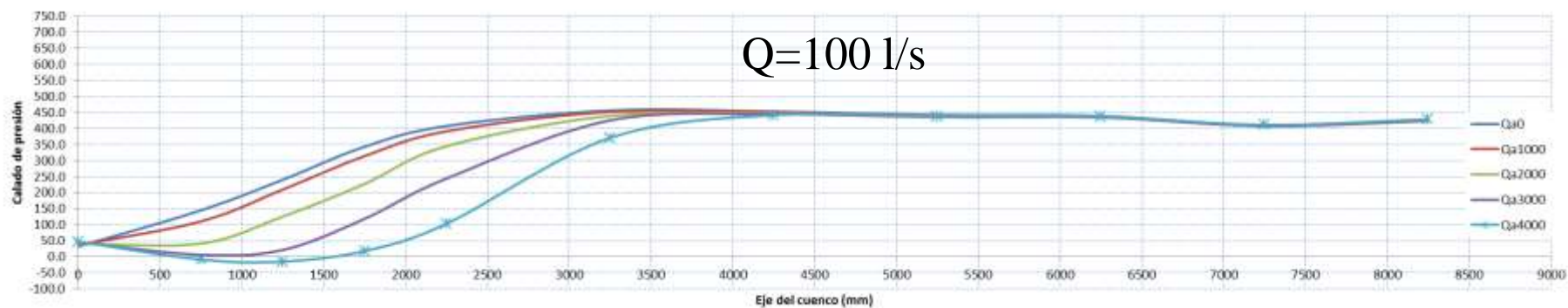
GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

EMULSIONA (LS-EMULSION)





GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA,
ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

LS-EMULSION. Ensayos resalto.

↓ Ensayos:

- Apertura de boquilla: 4, 8 y 12 cm.
- Caudal agua: de 100 a 400 l/s.
- Concentración de aire (0 a 70 %).

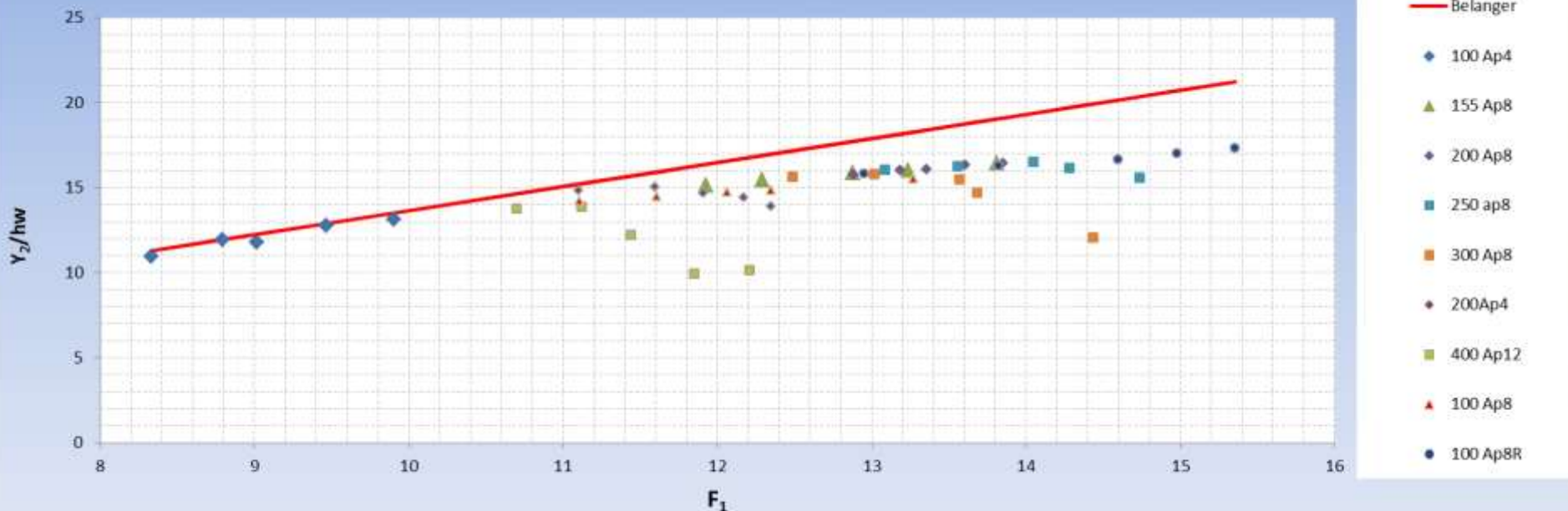
↓ Medidas:

- Caudal de agua y aire.
- Velocidad y Concentración al pie rápida.
- Presiones en solera
- Velocidad residual aguas abajo del resalto

Números adimensionales:

Reynolds: 800,000 a 3,200,000 ; Froude: 8.5 a 15.5 ; Weber: 137 a 1123

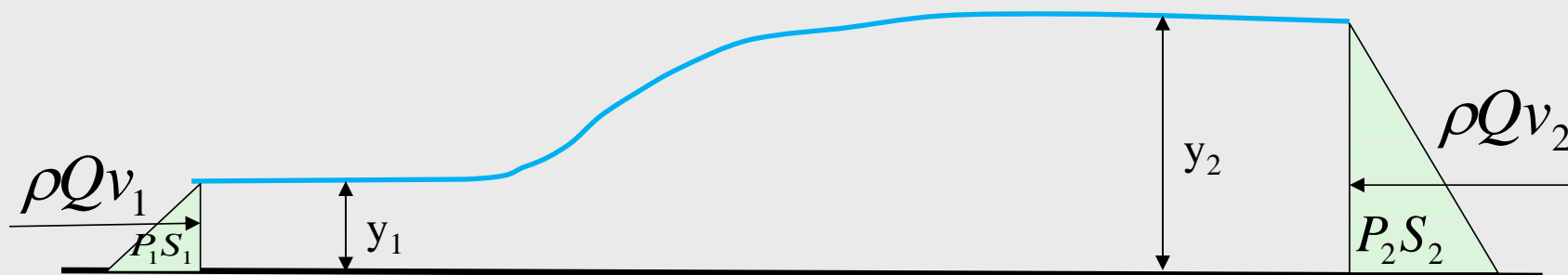
Resultados experimentales



RESALTO HIDRAULICO

Aplicando el principio de cantidad de movimiento, obtenemos la formula de Bélanger para el calado conjugado que para el caso de canal rectangular de sección cte.:

$$\sum Fx = 0$$

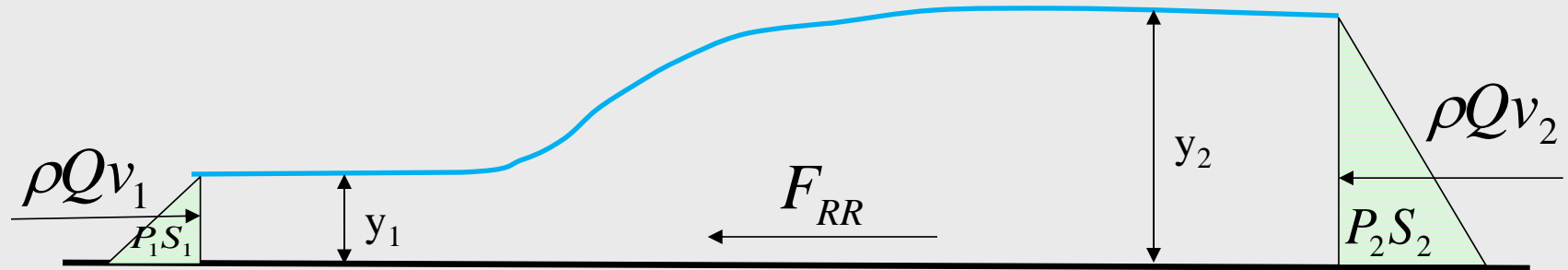


$$P_1 S_1 + \rho Q v_1 = P_2 S_2 + \rho Q v_2$$

$$\frac{1}{2} y_1^3 + \rho y_1 v_1^2 = \frac{1}{2} y_2^3 + \rho y_2 v_2^2$$

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

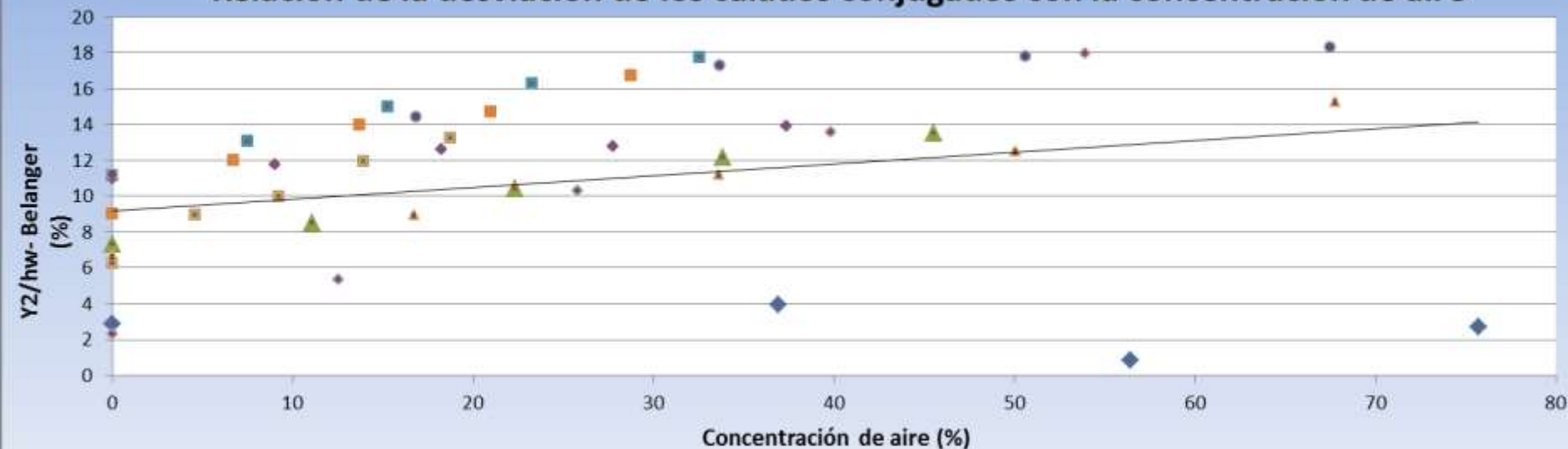
RESALTO HIDRAULICO EXPERIMENTAL



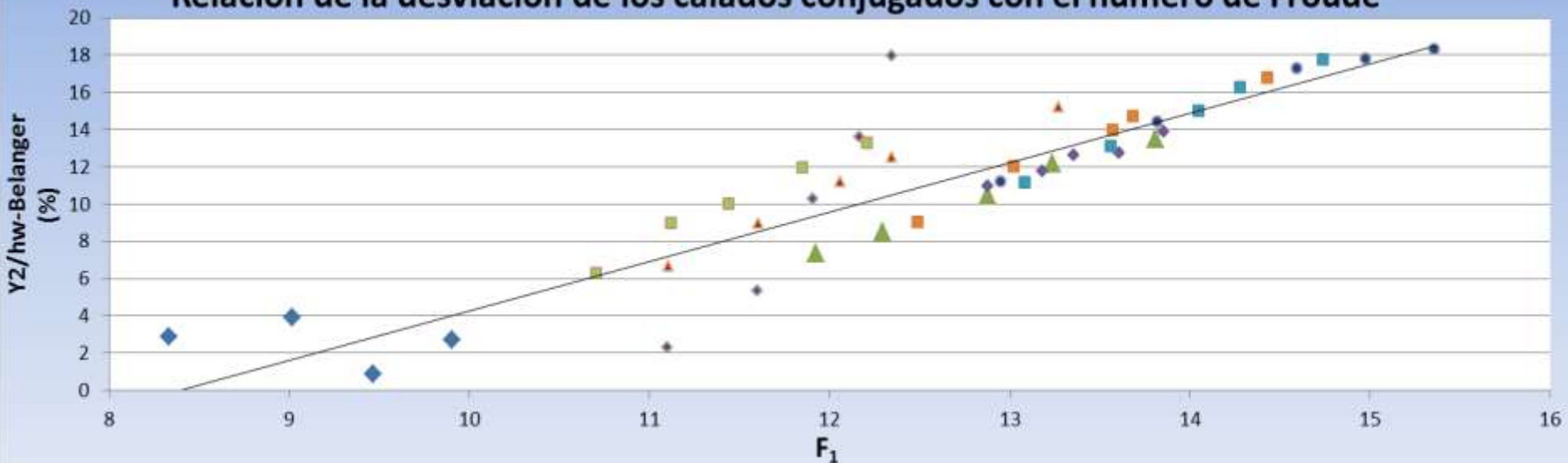
$$P_1 S_1 + \rho Q v_1 = P_2 S_2 + \rho Q v_2 + F_{RR}$$

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + 2 F_1^2 \left(\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^{-1} - 1 \right) - \frac{2 F_{RR}}{\gamma_w y_1^2} - 1 = 0$$

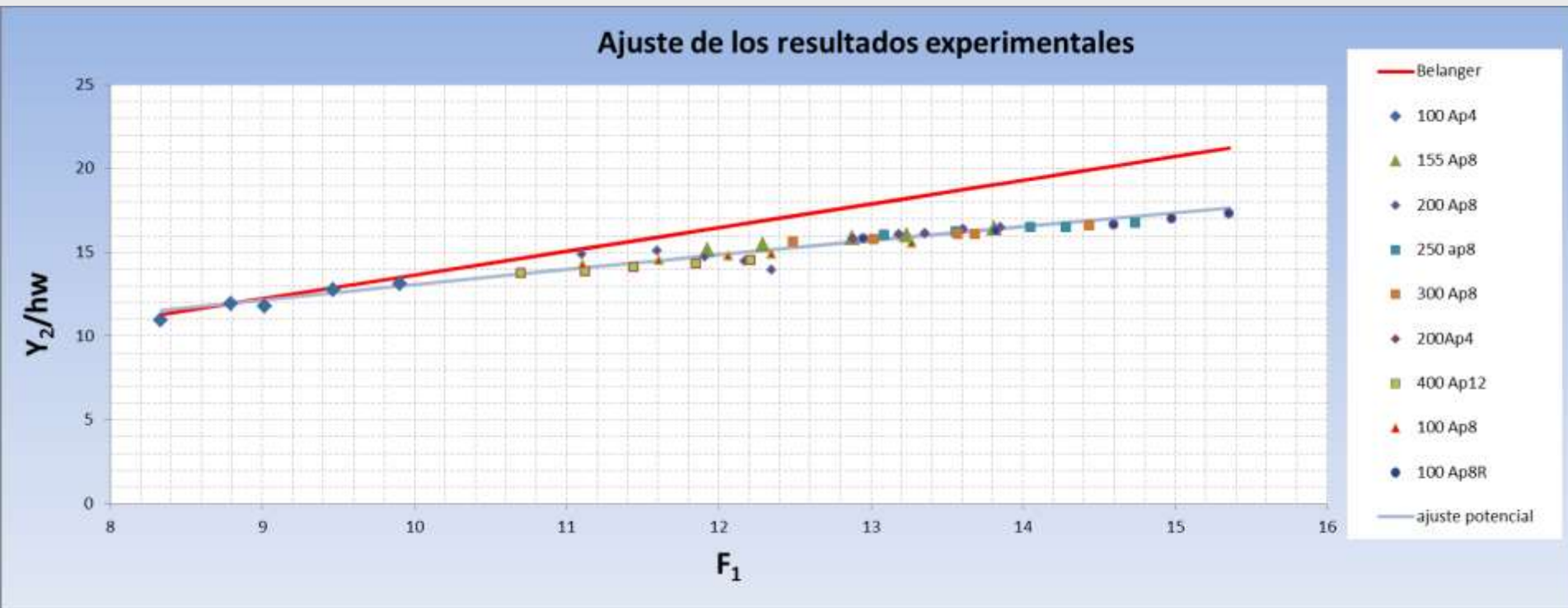
Relación de la desviación de los calados conjugados con la concentración de aire



Relación de la desviación de los calados conjugados con el número de Froude



Ajuste de los resultados experimentales



$$\frac{y_2}{h_w} = 2.65 F_1^{0.7}$$

FUERZA DE REACCIÓN DEL RESALTO

$$F_{RR} = \phi(F_1)$$

$$\frac{y_2}{h_w} = 2.65 F_1^{0.7}$$



$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + 2F_1^2 \left(\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{-1} - 1 \right) - \frac{2F_{RR}}{\gamma_w y_1^2} - 1 = 0$$

Para $F_1 > 9$



$$F_{RR} = \frac{1}{2} y_1^2 \gamma (2F_1 - 7.5F_1^{1.4})$$

Conclusiones

- ↓ La aireación acelera el flujo en la rápida.
- ↓ Se propone una corrección del número de Manning para rápidas aireadas
- ↓ Cuanto mayor es el número de froude del flujo de entrada al resalto mayor es la discrepancia del calado conjugado con Bélanger.
- ↓ Se propone una nueva formulación del calado conjugado para $F_1 > 9$
- ↓ Parece que la aireación contribuye a acortar la longitud del resalto.

Gracias por vuestra atención

Laboratorio de Hidráulica
Centro de Estudios Hidrográficos
(CEDEX)

david.lopez@cedex.es
ruben.diaz@cedex.es
Juan.j.Rebollo@cedex.es