



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTEGENA.**  
E.U. de Ingeniería Técnica Civil



**INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS**  
**ESPECIALIDAD EN HIDROLOGIA**

---

**PROYECTO DE FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE ALGUNOS TIPOS**  
**DE RESALTO HIDRÁULICOS Y CURVAS DE REMANSO**

**TOMO I**

***D. SALVADOR ZAMORA GARCÍA***

Dirigido por:

**D. LUIS G. CASTILLO ELSIDIÉ**

Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P.

Prof. de Obras y Aprov. Hidráulicos

---

CARTAGENA, 2004



# ÍNDICE

## TOMO I

|                                                                   | Página. |
|-------------------------------------------------------------------|---------|
| 0. RESUMEM. -----                                                 | 1       |
| 1. INTRODUCCIÓN.                                                  |         |
| 1.1. Clasificación de flujos.-----                                | 10      |
| 1.2. Labor experimental y descripción del equipo.                 |         |
| 1.2.1. Labor experimental.-----                                   | 12      |
| 1.2.2. Descripción del equipo.-----                               | 12      |
| 2. OBJETIVOS.-----                                                | 14      |
| 3. BASES TEÓRICAS.                                                |         |
| 3.0 Introducción.-----                                            | 15      |
| 3.1 Ecuación de continuidad.-----                                 | 15      |
| 3.2 Ecuación de la energía.                                       |         |
| 3.2.1. Deducción de ecuaciones y parámetros.-----                 | 16      |
| 3.2.2. Distintos aspectos del transporte de flujos.-----          | 22      |
| 3.2.3. Aplicaciones prácticas de los diagramas.-----              | 24      |
| 3.3. Ecuación del impulso                                         |         |
| 3.3.1. Deducción de la ecuación.-----                             | 26      |
| 3.3.2. Aplicación de la ecuación de momentum R.H. clásico---      | 27      |
| 3.3.3. Tipología de resaltos hidráulicos.-----                    | 30      |
| 3.3.4. Evolución del R.H. en función de $M^*_2$ -----             | 33      |
| 3.3.5. Resalto en canales inclinados.-----                        | 36      |
| 3.3.6. Longitud del resalto hidráulico.                           |         |
| - Canales horizontales.-----                                      | 36      |
| - Canales inclinados.-----                                        | 37      |
| 3.3.7. Resalto sumergido.                                         |         |
| 3.3.7.1 Introducción.-----                                        | 37      |
| 3.3.7.2 Método Rajaratnam I.-----                                 | 38      |
| 3.3.7.3 Método Rajaratnam II.-----                                | 40      |
| 3.4. Curvas de remanso.                                           |         |
| 3.4.1. Introducción.-----                                         | 42      |
| 3.4.2. Deducción de la ec. diferencial. del F.G.V. -----          | 43      |
| 3.4.3. Aspectos previos a clasificación de curvas de remanso.--   | 46      |
| 3.4.4. Clasificación de los perfiles de la superficie libre.----- | 50      |
| 3.5. Coeficiente de contracción bajo compuerta plana.-----        | 54      |



#### 4. EQUIPO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Descripción de las campañas de medida.                                     |    |
| 4.1.1. Bases.-----                                                              | 56 |
| 4.1.2. Tabla de campañas a realizar.-----                                       | 58 |
| 4.1.3. Obtención de la velocidad en las campañas.-----                          | 59 |
| 4.2. Descripción de parámetros a medir en cada campaña y tablas que los agrupa. |    |
| 4.2.1. Para resalto clásico.-----                                               | 60 |
| 4.2.1.1. Tablas prácticas de r. clásico-----                                    | 62 |
| 4.2.2. Para resalto sumergido.-----                                             | 64 |
| 4.2.2.1. Tablas prácticas de r. sumergido.-----                                 | 66 |

#### 5. CONCLUSIONES SOBRE EL TRABAJO EXPERIMENTAL.

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 5.0 Introducción. -----                                    | 68 |
| 5.1 Correcciones.                                          |    |
| 5.1.1 Corrección de caudal.-----                           | 69 |
| 5.1.2 Corrección de pendiente.                             |    |
| 5.1.2.1 Introducción.-----                                 | 71 |
| 5.1.2.2 Cálculo de la pendiente inicial.-----              | 72 |
| A) Pendiente fuerte, 8‰ (1 <sup>er</sup> Bloque).-----     | 72 |
| B) Pendiente suave, 4‰ (2 <sup>o</sup> Bloque).- -----     | 73 |
| 5.1.2.3 Cálculo del $\Delta y$ debido a pendiente inicial. |    |
| A) Pendiente fuerte (8‰). -----                            | 74 |
| a) R. no rechazado.                                        |    |
| b) R. rechazado.                                           |    |
| c) R. sumergido.                                           |    |
| B) Pendiente suave (4‰). -----                             | 75 |
| a) R. no rechazado.                                        |    |
| b) R. rechazado.                                           |    |
| c) R. sumergido.                                           |    |
| 5.1.2.4 Tipos de curvas de remanso desarrolladas.          |    |
| A) Curva en pendiente fuerte (+ 8‰).-----                  | 75 |
| B) Curva en pendiente suave (+ 8‰).-----                   | 75 |
| 5.1.2.5 Explicación de las tablas correctoras.             |    |
| A) Para resalto no rechazado.-----                         | 76 |
| B) Para resalto rechazado.-----                            | 76 |
| C) Para resalto sumergido.-----                            | 76 |
| 5.2 Comparación de medidas no corregidas con corregidas.   |    |
| 5.2.1 Introducción. -----                                  | 77 |
| 5.2.2 Resalto no rechazado.-----                           | 77 |
| 5.2.2.1 Pendiente de un 8‰ u horizontal-----               | 77 |
| a) Para $Q_{teo12}$ .                                      |    |
| b) Para $Q_{teo8}$ .                                       |    |
| c) Para $Q_{teo4}$ .                                       |    |
| 5.2.2.2 Pendiente suave + 8‰.-----                         | 78 |
| a) Para $Q_{teo12}$ .                                      |    |
| b) Para $Q_{teo8}$ .                                       |    |



|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.2.2.3 Pendiente fuerte + 8‰.-----              | 79 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.2.3 Resalto rechazado.-----                    | 80 |
| 5.2.3.1 Pendiente de un 8‰ u horizontal-----     | 80 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.2.3.2 Pendiente suave + 8‰.-----               | 81 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.2.3.3 Pendiente fuerte + 8‰.-----              | 82 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.2.4 Resalto sumergido.-----                    | 83 |
| 5.2.4.1 Pendiente de un 8‰ u horizontal-----     | 83 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.2.4.2 Pendiente suave + 8‰.-----               | 84 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.2.4.3 Pendiente fuerte + 8‰.-----              | 85 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.2.5. Comparación en pendiente suave (4‰).----- | 86 |
| 5.2.5.1 Introducción.-----                       | 86 |
| 5.2.5.2 Resalto no rechazado.-----               | 86 |
| 5.2.5.3 Resalto rechazado.-----                  | 86 |
| 5.2.5.4 R. sumergido.-----                       | 86 |
| 5.3 Conclusiones entre mediciones.               |    |
| 5.3.1 Introducción.-----                         | 87 |
| 5.3.2 Resalto no rechazado.-----                 | 87 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |
| 5.3.3 Resalto rechazado.-----                    | 88 |
| a) Para Qteo <sub>12</sub> .                     |    |
| b) Para Qteo <sub>8</sub> .                      |    |
| c) Para Qteo <sub>4</sub> .                      |    |



|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.4 Resalto sumergido-----                                                         | 90  |
| a) Para $Q_{teo12}$ .                                                                |     |
| b) Para $Q_{teo8}$ .                                                                 |     |
| c) Para $Q_{teo4}$ .                                                                 |     |
| 5.3.5 Conclusión para pendiente suave (4%).-----                                     | 91  |
| 5.3.5.1 Introducción.-----                                                           | 91  |
| 5.3.5.2 R. no rechazado.-----                                                        | 91  |
| 5.3.5.3 R. rechazado.-----                                                           | 92  |
| 5.3.5.4 R. sumergido.-----                                                           | 92  |
| <br>5.4 Comparación de medidas corregidas frente a otros trabajos<br>experimentales. |     |
| 5.4.1 Introducción. -----                                                            | 93  |
| 5.4.2 Criba de mediciones válidas.-----                                              | 93  |
| 5.4.3 Comparación de $y_2/y_1$ frente $Fr_1$ .-----                                  | 96  |
| a) Pendiente horizontal.                                                             |     |
| -Fuerte. (8‰)                                                                        |     |
| -Suave. (4‰)                                                                         |     |
| b) Pendiente suave + 8‰.                                                             |     |
| c) Pendiente fuerte + 8‰.                                                            |     |
| d) Conclusión.                                                                       |     |
| -Fuerte. (8‰)                                                                        |     |
| -Suave. (4‰)                                                                         |     |
| 5.4.4 Comparación de $L_R/y_2$ frente ( $Fr_1$ ó $Fr_3$ ).-----                      | 101 |
| a) Pendiente horizontal.                                                             |     |
| -Fuerte. (8‰)                                                                        |     |
| -Suave. (4‰)                                                                         |     |
| b) Pendiente suave + 8‰.                                                             |     |
| c) Pendiente fuerte + 8‰.                                                            |     |
| d) Conclusión.                                                                       |     |
| -Fuerte. (8‰)                                                                        |     |
| -Suave. (4‰)                                                                         |     |
| 5.4.5 Comparación de $C_{c_{teo}}$ frente $C_{c_{práctico}}$ .-----                  | 105 |
| a) Pendiente horizontal.                                                             |     |
| -Fuerte. (8‰)                                                                        |     |
| -Suave. (4‰)                                                                         |     |
| b) Pendiente suave + 8‰.                                                             |     |
| c) Pendiente fuerte + 8‰.                                                            |     |
| d) Conclusión.                                                                       |     |
| -Fuerte. (8‰)                                                                        |     |
| -Suave. (4‰)                                                                         |     |
| 5.5 Modelización de campañas mediante HEC-RAS.                                       |     |
| 5.5.0 Introducción.-----                                                             | 109 |
| 5.5.1 Modelizaciones omitidas.-----                                                  | 109 |
| 5.5.2 Modelizaciones omitidas para el análisis.-----                                 | 109 |
| 5.5.3 Ejemplo resumen de una modelización.-----                                      | 110 |



|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5.4 Análisis de las campañas modelizadas.-----                                                                 | 112 |
| 5.5.4.1 Modelización en p. fuerte (+8%).-----                                                                    | 112 |
| • R. no rechazado (en las distintas pendientes)                                                                  |     |
| • R. rechazado (en las distintas pendientes)                                                                     |     |
| • R. sumergido (en las distintas pendientes)                                                                     |     |
| 5.5.4.2 Modelización en p. suave (+4%).-----                                                                     | 113 |
| • R. no rechazado (en las distintas pendientes)                                                                  |     |
| • R. rechazado (en las distintas pendientes)                                                                     |     |
| • R. sumergido (en las distintas pendientes)                                                                     |     |
| 5.5.4.3 Comparación entre modelizaciones entre<br>modelizaciones en pendiente fuerte (+8%) y<br>suave(+4%).----- | 113 |
| • R. no rechazado (en las distintas pendientes)                                                                  |     |
| • R. rechazado (en las distintas pendientes)                                                                     |     |
| • R. sumergido (en las distintas pendientes)                                                                     |     |
| 6. CONCLUSIONES.                                                                                                 |     |
| 6.1. Correcciones.-----                                                                                          | 115 |
| 6.2. Trabajos experimentales.                                                                                    |     |
| A) Relación $y_2 / y_1$ ó $y_2 / y_3$ frente a $Fr_1$ ó $Fr_3$ .-----                                            | 115 |
| B) Relación L.R. / $y_2$ frente a $Fr_1$ ó $Fr_3$ .-----                                                         | 115 |
| C) Comparación entre $Cc_{Teórico}$ y $Cc_{Práctico}$ .-----                                                     | 116 |
| 6.3. Modelizaciones.-----                                                                                        | 116 |
| 6.4. Trabajo didáctico.-----                                                                                     | 116 |
| 7. REFERENCIAS.-----                                                                                             | 117 |



## TOMO II

### ANEJOS

#### ANEJO A

*TABLAS RESUMEN Y GRÁFICOS PARA LA  
COMPARACIÓN CON TRABAJOS EXPERIMENTALES Y  
LAS MODELIZACIONES.*

- Anejo A.1: PARA TRABAJO EXPERIMENTAL,  $y_2 / y_1$  ó  $y_2 / y_3$  FRENTE  $Fr_1$  ó  $Fr_3$
- Anejo A.2: PARA TRABAJO EXPERIMENTAL,  $L_r / y_2$  FRENTE  $Fr_1$  ó  $Fr_3$
- Anejo A.3: PARA TRABAJO EXPERIMENTAL,  $Cc_{Teórico}$  FRENTE  $Cc_{Práctico}$
- Anejo A.4: MODELIZACIÓN.
  - o Anejo A.4.1 TABLAS RESUMEN.
  - o Anejo A.4.2 PERFILES LONGITUDINALES.

#### ANEJO B

*TABLAS DE TRATAMIENTO DE DATOS PRÁCTICOS  
Y  
TABLAS DE ENTRADA Y SALIDA AL HEC-RAS DE LAS  
CAMPAÑAS MODELIZADAS.*

- Anejo B.0: DEFLEXIONES DEL CANAL.
- Anejo B.1: CAMPAÑAS EN PENDIENTE + 8‰.
  - o Anejo B.1.1: RESALTO NO RECHAZADO.
  - o Anejo B.1.2: RESALTO RECHAZADO.
  - o Anejo B.1.3: RESALTO SUMERGIDO.
- Anejo B.2: CAMPAÑAS EN PENDIENTE + 4‰.
  - o Anejo B.2.1: RESALTO NO RECHAZADO.



- o Anejo B.2.2: RESALTO RECHAZADO.
- o Anejo B.2.3: RESALTO SUMERGIDO.

## ANEJO C

### REPORTAJE FOTOGRÁFICO.





## 0. RESUMEN.

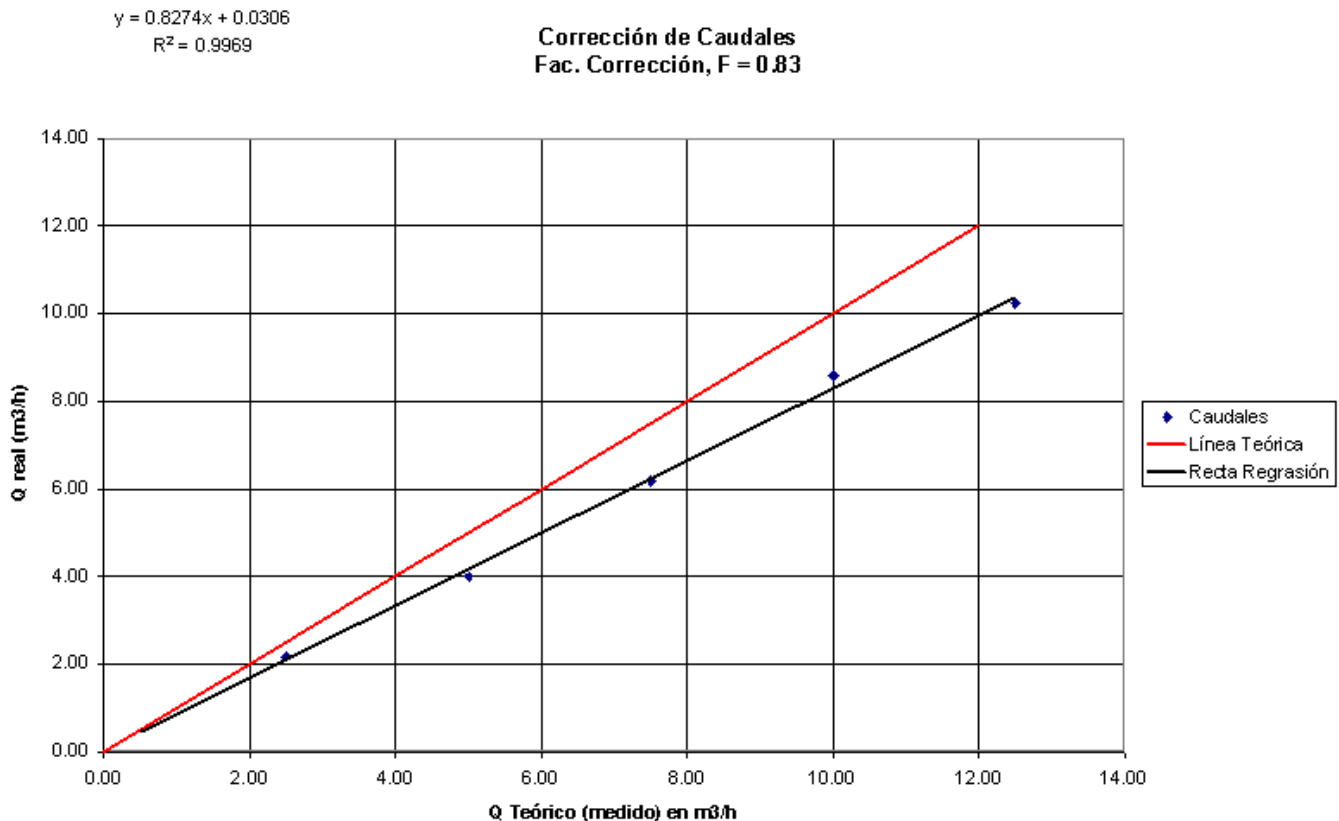
El trabajo realizado en el siguiente proyecto fin de carrera se divide en tres partes:

- Primero: una parte teórica donde se exponen las formulaciones de los temas que tratar el proyecto de fin de carrera.
- Segundo: una parte experimental donde se contrastan los datos obtenidos con trabajos experimentales ya afianzados.
- Tercero: una parte didáctica donde se obtienen fotos y videos para apoyar la labor docente cuando se explican los temas tratados en este proyecto.

En la realización del proyecto fin de carrera, los puntos más importantes han sido los siguientes:

- La puesta a punto del canal:  
En un principio se pensaba que el canal y la instrumentación estaban en perfecto estado, debido a que son de reciente adquisición.  
En primer lugar se compararon los caudales medidos por el caudalímetro con los que realmente circulan por el canal. En el caso de que estos hubiesen sido iguales, la línea de regresión sería de 45°, pero como se puede observar en el gráfico esto no se cumple.  
Por este motivo se tuvo que corregir el caudal, sacando un coeficiente de corrección (F) cuyo valor fue de 0.83, siendo por tanto el valor real del caudal:

$$Q_{real} = F \cdot Q_{medido}$$





En segundo lugar fue necesario cambiar el tubo pitot, ya que con el original no se obtenían mediciones correctas.

Posteriormente, ya realizadas las campañas y tratados algunos datos, se pudo analizar que los calados prácticos distaban de los teóricos. Tras diversos razonamientos se observó que el canal poseía deflexiones importantes, con la consecuente distorsión de los datos de calados medidos. Para solucionar este problema, fue necesario realizar correcciones, para poder comparar la información práctica con la teórica.

Dichas deflexiones se pueden apreciar en la siguiente fotografía del canal.



- Principales resultados obtenidos.

Tras el análisis de los datos y la comparación con los distintos trabajos experimentales, se obtuvieron algunos datos experimentales bastante alejados de la teoría. Esto se puede ver en las dos siguientes figuras que se extraen de la comparación de los datos prácticos con los trabajos experimentales de referencia.

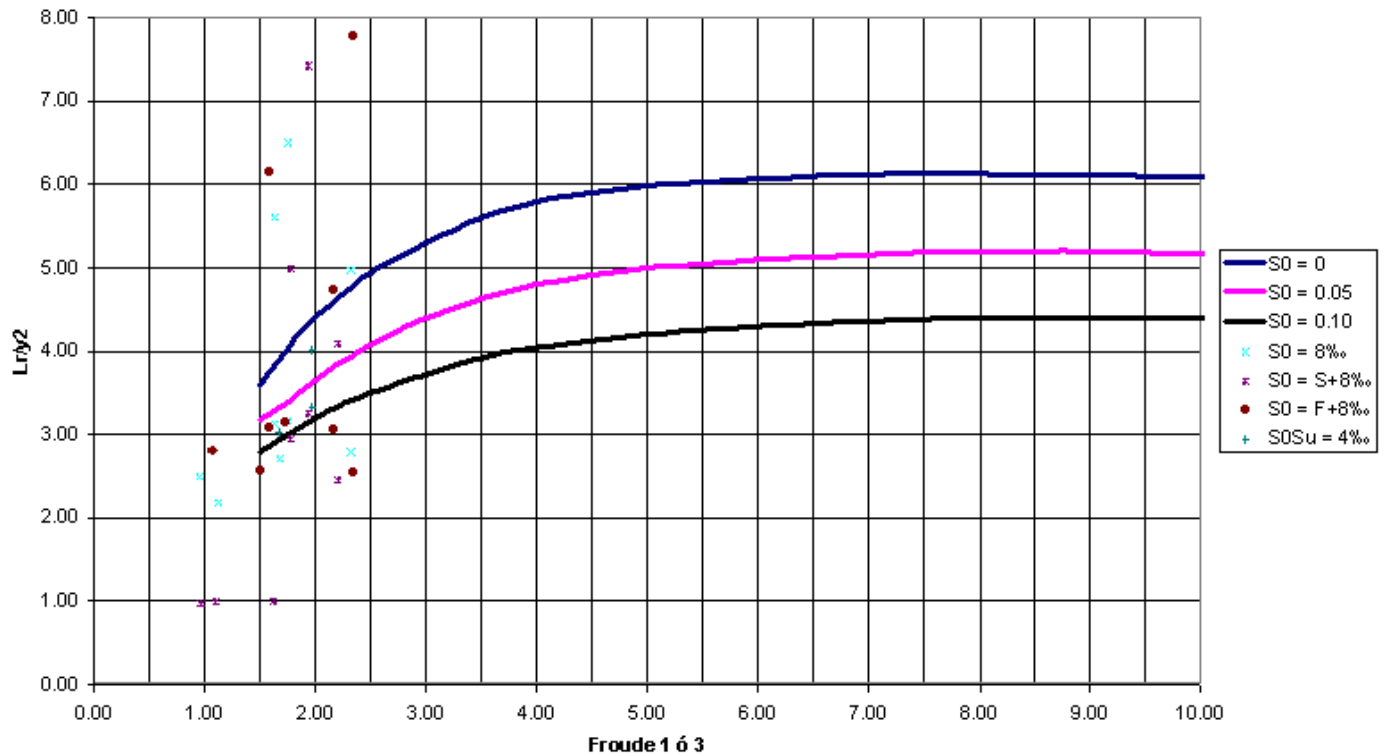
En el primer gráfico se compara la relación adimensional longitud del resalto hidráulico entre el calado conjugado ( $Lr/y_2$ ), con el Número de Froude ( $Fr_1$ ) en la sección de control ( $y_1$ ), y con el Número de Froude ( $Fr_3$ ) en la sección inicial ( $y_3$ ) de un resalto hidráulico rechazado; para diferentes pendientes de solera del canal ( $S_o$ ).

En el segundo gráfico se comparan las relaciones de calados conjugados  $y_2/y_3$  (resalto rechazado) y  $y_2/y_1$  (resalto estable), con los correspondientes Números de Froude  $Fr_1$  y  $Fr_3$ ; para las diferentes pendientes de solera del canal ( $S_o$ ).

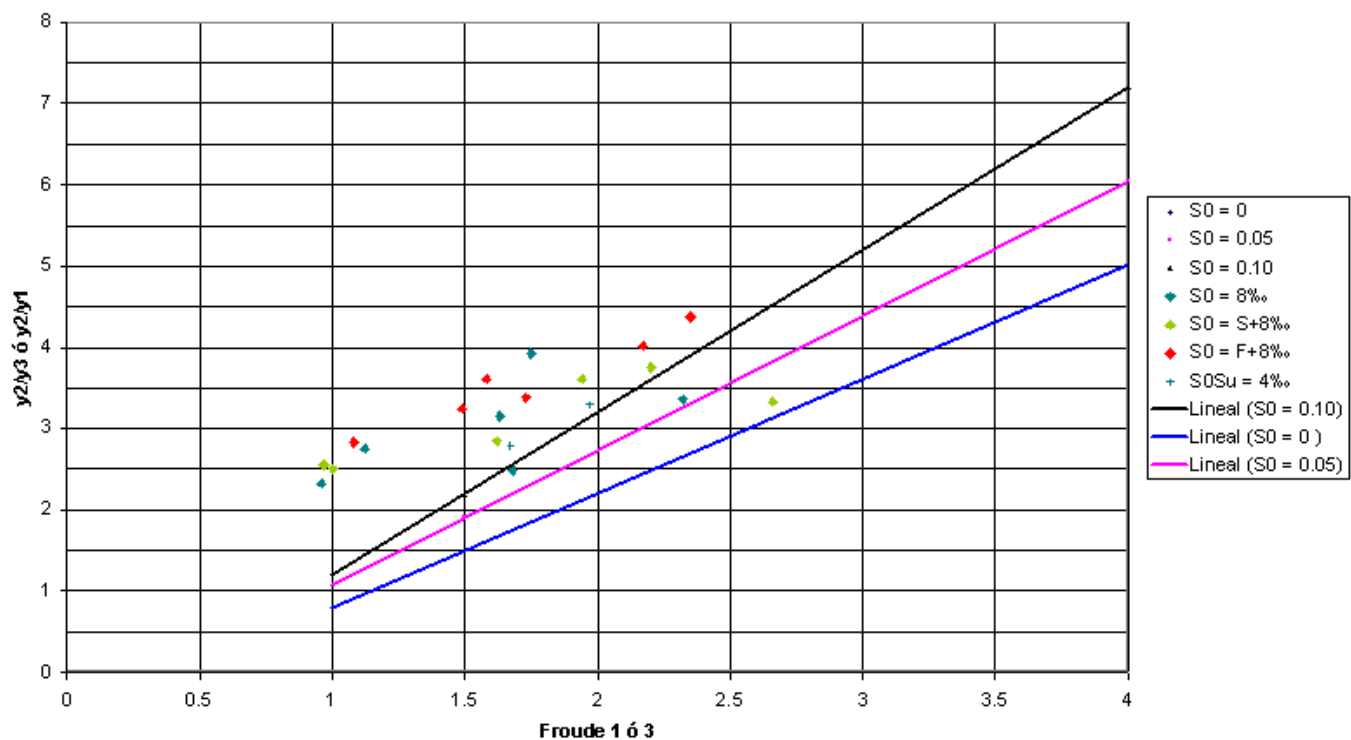


Todos los datos obtenidos a partir de las *treinta campañas realizadas* en el proyecto de fin de carrera, deberían estar alrededor de la línea azul y la rosa correspondientes con las pendientes de nuestras condiciones de trabajo.

Las posibles causas de esta dispersión se discuten en los apartados respectivos.

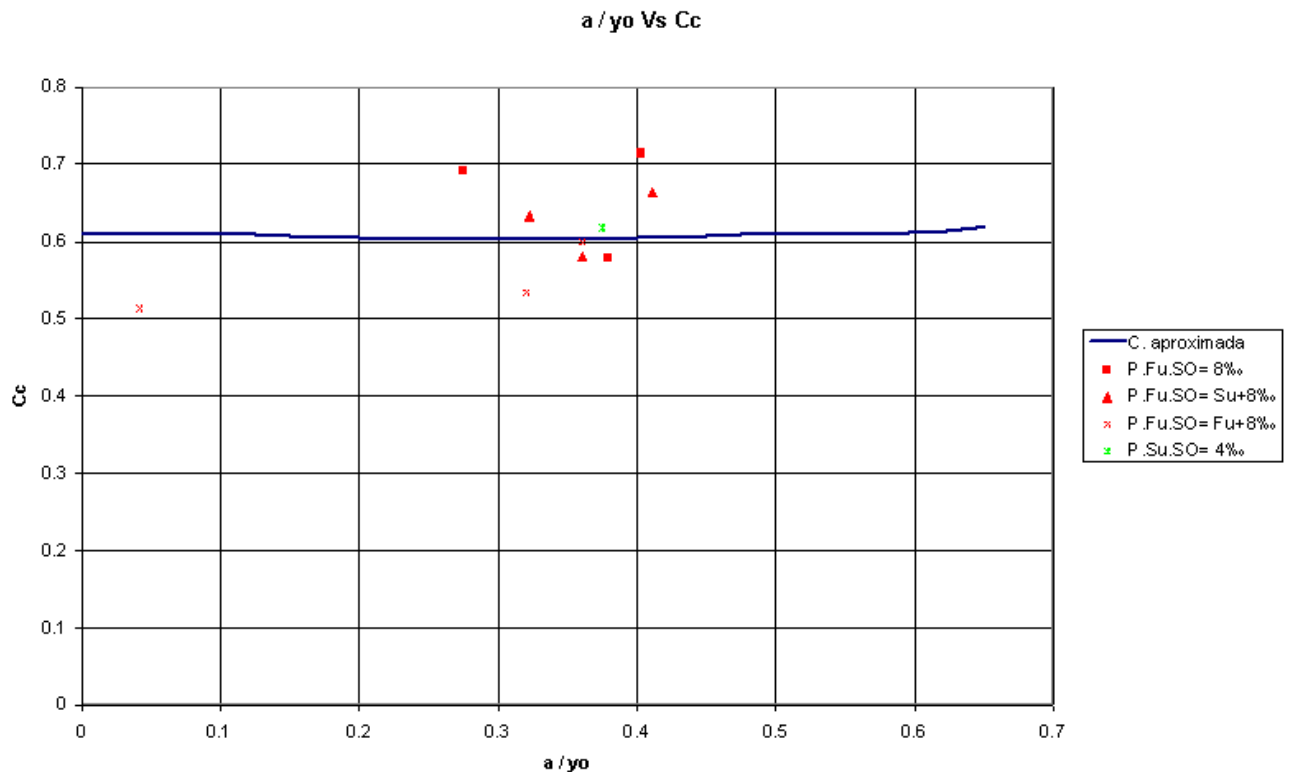
Fr (1 ó 3) Vs  $y_2/y_1$ 

$$y = 1.4074x - 0.6185 \quad R^2 = 1 \quad y = 1.66x - 0.59 \quad R^2 = 1 \quad y = 2x - 0.8 \quad R^2 = 1$$

Fr(1 ó 3) Vs  $y_2/y_1$ 



También se han podido obtener conclusiones y datos que están en buen acuerdo con la teoría, como por ejemplo en los coeficientes de contracción de una compuerta plana, en función de la relación abertura de la compuerta entre el calado aguas arriba de la compuerta ( $a/y_0$ ); para las distintas pendientes de solera del canal ( $S_0$ ).



Estas dos circunstancias han hecho que el esfuerzo de trabajo realizado haya sido mayor y a veces frustrante, para la recompensa que se ha obtenido. Aún así, el trabajo ha servido para afianzar los conocimientos y poder descartar los resultados que no eran válidos con la teoría.

- Finalmente se ha realizado una contrastación de las mediciones, simulando los diferentes tipos de flujos, con el Programa de Cálculo de Flujo Unidimensional Gradualmente Variado “HEC-RAS”, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

También se han realizado fotos y videos de los ensayos más importantes. Seguidamente se muestra para un mismo tipo de resalto los dos puntos anteriormente comentados, que vienen representados por:

- Tres fotos correspondientes a cada tipo de resalto estudiado.
- Un perfil longitudinal para Resalto Hidráulico Rechazado, obtenido mediante la modelización en HEC-RAS.
- Una tabla de valores de salida del programa HEC-RAS, correspondiente a las condiciones del perfil longitudinal anterior.



1ª Fotografía: Resalto hidráulico no rechazado (estable)



El momemtum aguas abajo es exactamente igual al momemtum existente en la sección del calado contraído, formándose el resalto hidráulico al pié de la compuerta (estable).



## 2ª Fotografía: Resalto hidráulico rechazado



El momentum aguas abajo es menor que el existente en la sección del calado contraído. Esto ocasiona que el resalto se desplace aguas abajo, por medio de una curva de remanso M3, perdiendo momentum y energía por este mecanismo. Esto sucede hasta encontrar una nueva sección de equilibrio, en donde los momentum se igualan, produciéndose el resalto hidráulico.

Obsérvese que la longitud del resalto hidráulico rechazado es menor que la longitud del resalto hidráulico no rechazado (estable); puesto que la sección S3 contiene menor energía.

## 3ª Fotografía: Resalto hidráulico sumergido



El momentum aguas abajo es mayor que el existente en el calado contraído (no se puede ver en este caso). Esto ocasiona que el resalto se desplace hacia aguas arriba, sumergiéndose el resalto hidráulico.

La longitud de resalto hidráulico sumergido es mayor que la longitud del resalto no rechazado (estable), debido a la menor disipación de energía y a la presencia de chorros de alta velocidad que se desplazan por el fondo del canal.



Perfil longitudinal de resalto hidráulico rechazado.

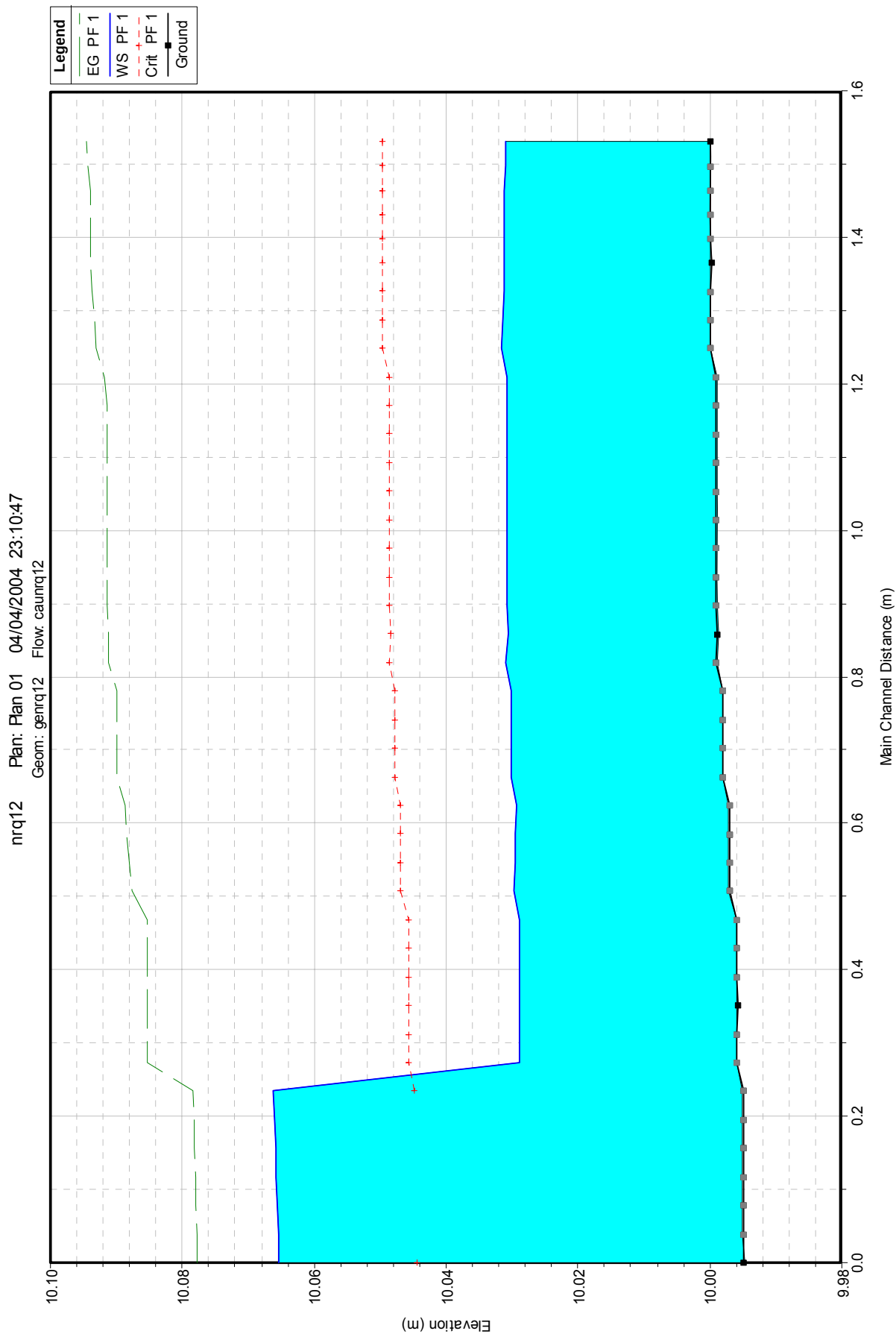






Tabla de valores para resalto hidráulico rechazado.

| 1  | A                                    | B       | C          | D            | E      | F          | G         | H        | I      | J           | K         | L         | M      | N           | O         | P         | Q          | R         | S         | T           |
|----|--------------------------------------|---------|------------|--------------|--------|------------|-----------|----------|--------|-------------|-----------|-----------|--------|-------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-------------|
| 2  | Tabla de datos de salida del HEC-RAS |         |            |              |        |            |           |          |        |             |           |           |        |             |           |           |            |           |           |             |
| 3  | River Sta                            | Profile | Length Chn | T. length no | error  | e. acumula | Pendiente | Q Total  | Area   | Dist.C.D.G. | Min Ch El | W.S. Elev | Calado | Momentum    | Crit W.S. | E.G. Elev | E.G. Slope | Vel Chnl  | Top Width | Froude # Ch |
| 4  | 100                                  | PF1     | 0.03       | 0.03         | 0.002  | 0.002      | 0.06      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.1      | 0.02       | 1.128.784 | 0.08      | 2.05        |
| 5  | 96*                                  | PF1     | 0.03       | 0.07         | 0.002  | 0.000      | 0.06      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.1      | 0.02       | 1.125.341 | 0.08      | 2.04        |
| 6  | 92*                                  | PF1     | 0.03       | 0.10         | 0.002  | 0.001      | 0.09      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.1      | 0.02       | 1.125.341 | 0.08      | 2.04        |
| 7  | 88*                                  | PF1     | 0.03       | 0.13         | 0.002  | 0.001      | 0.12      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.1      | 0.02       | 1.125.341 | 0.08      | 2.04        |
| 8  | 84*                                  | PF1     | 0.03       | 0.16         | 0.002  | 0.001      | 0.16      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.1      | 0.02       | 1.125.341 | 0.08      | 2.04        |
| 9  | 80                                   | PF1     | 0.04       | 0.21         | 0.002  | 0.001      | 0.21      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.125.341 | 0.08      | 2.04        |
| 10 | 76.4615*                             | PF1     | 0.04       | 0.25         | 0.0008 | 0.0008     | 0.25      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 11 | 73.8461*                             | PF1     | 0.04       | 0.29         | 0.0008 | 0.0023     | 0.29      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 12 | 70.7692*                             | PF1     | 0.04       | 0.33         | 0.0008 | 0.0031     | 0.32      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 13 | 68.461*                              | PF1     | 0.04       | 0.37         | 0.0008 | 0.0038     | 0.36      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 14 | 66.1538*                             | PF1     | 0.04       | 0.40         | 0.0008 | 0.0046     | 0.40      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 15 | 63.9230*                             | PF1     | 0.04       | 0.44         | 0.0008 | 0.0054     | 0.44      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 16 | 61.5384*                             | PF1     | 0.04       | 0.48         | 0.0008 | 0.0062     | 0.48      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 17 | 59.2307*                             | PF1     | 0.04       | 0.52         | 0.0008 | 0.0069     | 0.51      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 18 | 56.9230*                             | PF1     | 0.04       | 0.56         | 0.0008 | 0.0077     | 0.55      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 19 | 54.6153*                             | PF1     | 0.04       | 0.60         | 0.0008 | 0.0085     | 0.59      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 20 | 52.3076*                             | PF1     | 0.04       | 0.64         | 0.0008 | 0.0092     | 0.63      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 21 | 50.7692*                             | PF1     | 0.04       | 0.68         | 0.0008 | 0.0100     | 0.67      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 22 | 48.4615*                             | PF1     | 0.04       | 0.72         | 0.0008 | 0.0108     | 0.71      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 23 | 46.1538*                             | PF1     | 0.04       | 0.76         | 0.0008 | 0.0116     | 0.75      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 24 | 43.8461*                             | PF1     | 0.04       | 0.79         | 0.0008 | 0.0124     | 0.78      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 25 | 41.5384*                             | PF1     | 0.04       | 0.83         | 0.0008 | 0.0132     | 0.82      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 26 | 39.2307*                             | PF1     | 0.04       | 0.87         | 0.0008 | 0.0140     | 0.86      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 27 | 36.9230*                             | PF1     | 0.04       | 0.91         | 0.0008 | 0.0148     | 0.90      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 28 | 34.6153*                             | PF1     | 0.04       | 0.95         | 0.0008 | 0.0156     | 0.94      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 29 | 32.3076*                             | PF1     | 0.04       | 0.99         | 0.0008 | 0.0164     | 0.98      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 30 | 30.0000*                             | PF1     | 0.04       | 1.03         | 0.0008 | 0.0172     | 1.02      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 31 | 27.6923*                             | PF1     | 0.04       | 1.07         | 0.0008 | 0.0180     | 1.06      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 32 | 25.3846*                             | PF1     | 0.04       | 1.11         | 0.0008 | 0.0188     | 1.10      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 33 | 23.0769*                             | PF1     | 0.04       | 1.15         | 0.0008 | 0.0196     | 1.14      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 34 | 20.7692*                             | PF1     | 0.04       | 1.19         | 0.0008 | 0.0204     | 1.18      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 35 | 18.4615*                             | PF1     | 0.04       | 1.23         | 0.0008 | 0.0212     | 1.22      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 36 | 16.1538*                             | PF1     | 0.04       | 1.27         | 0.0008 | 0.0220     | 1.26      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 37 | 13.8461*                             | PF1     | 0.04       | 1.31         | 0.0008 | 0.0228     | 1.30      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 38 | 11.5384*                             | PF1     | 0.04       | 1.35         | 0.0008 | 0.0236     | 1.34      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 39 | 9.2307*                              | PF1     | 0.04       | 1.39         | 0.0008 | 0.0244     | 1.38      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 40 | 6.9230*                              | PF1     | 0.04       | 1.43         | 0.0008 | 0.0252     | 1.42      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 41 | 4.6153*                              | PF1     | 0.04       | 1.47         | 0.0008 | 0.0260     | 1.46      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 42 | 2.3076*                              | PF1     | 0.04       | 1.51         | 0.0008 | 0.0268     | 1.50      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 43 | 0.0000*                              | PF1     | 0.04       | 1.55         | 0.0008 | 0.0276     | 1.54      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 44 | 20                                   | PF1     | 0.04       | 1.59         | 0.0008 | 0.0284     | 1.58      | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.09     | 0.02       | 1.122.004 | 0.08      | 2.04        |
| 45 | 45                                   |         |            |              |        |            |           |          |        |             |           |           |        |             |           |           |            |           |           |             |
| 46 | 46                                   |         |            |              |        |            |           |          |        |             |           |           |        |             |           |           |            |           |           |             |
| 47 | 47                                   |         |            |              |        |            |           |          |        |             |           |           |        |             |           |           |            |           |           |             |
| 48 | 48                                   |         |            |              |        |            |           |          |        |             |           |           |        |             |           |           |            |           |           |             |
| 49 | 49                                   |         |            |              |        |            |           |          |        |             |           |           |        |             |           |           |            |           |           |             |
| 50 | 50                                   |         |            |              |        |            |           |          |        |             |           |           |        |             |           |           |            |           |           |             |



## 1 INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Clasificación de flujos.

El siguiente proyecto de fin de carrera trata del estudio del comportamiento del agua a través de un canal rectangular. Para facilitar dicho estudio se procede a clasificar los distintos tipos de flujo en un canal.

Se puede clasificar dos grandes tipos de flujo en función de la  $\partial f / \partial t$ , estos son:

A) Flujo Permanente: Se desarrolla cuando uno de los parámetros del flujo con función  $f$  es constante en el tiempo ( $\partial f / \partial t = 0$ ).

Los distintos tipos de flujos permanentes son:

- FLUJO UNIFORME: Cuando los parámetros de los que depende el flujo de agua (calado, velocidad, etc.) no varían en cada sección del canal.
- FLUJO VARIADO: Donde los parámetros varían en cada sección del canal.

Dentro del flujo variado existen tres grupos, en función de la variación de los parámetros en el espacio.

- o F. GRADUALMENTE VARIADO: Los parámetros de flujo van variando lentamente, en grandes longitudes del canal.
- o F. BRUSCAMENTE VARIADO: En donde dichos parámetros varían rápidamente, en longitudes cortas del canal.
- o FLUJO ESPACIALMENTE VARIADO: Cuando el caudal y por tanto los parámetros del flujo varían a lo largo del canal.

B) Flujo no Permanente o Variable: Se desarrolla cuando la función  $f$  no es constante en el tiempo ( $\partial f / \partial t \neq 0$ ).

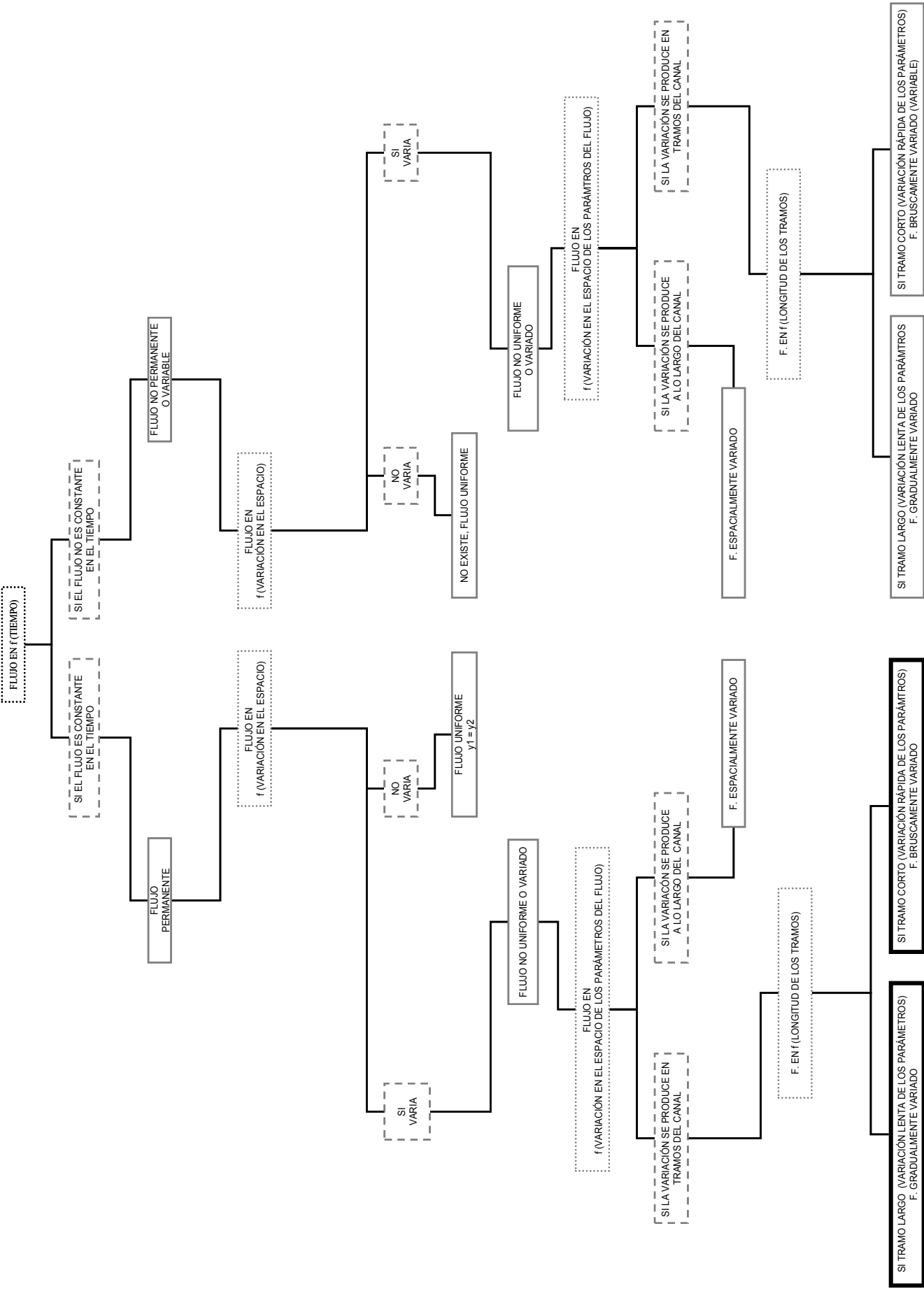
En un flujo variable no puede desarrollarse un flujo uniforme. Los distintos tipos de flujos no permanentes son:

- o F. GRADUALMENTE VARIADO.
- o F. BRUSCAMENTE VARIADO.
- o FLUJO ESPACIALMENTE VARIADO.

El proyecto de fin de carrera se va a centrar en el estudio siguiente:

- *Curvas de remanso* para **flujo permanente gradualmente variado**.
- *Resalto hidráulico* para **flujo permanente bruscamente variado**.

Con la finalidad de aclarar dicha clasificación, se remite al esquema de la página siguiente.





## 1.2. LABOR EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.

### 1.2.1 Labor experimental.

La labor experimental desarrollada en este trabajo fue la comparación teórico-práctica de distintos fenómenos producidos en un canal, didáctico.

El canal dispone de varios sistemas de medida de las magnitudes características del agua a lo largo del mismo, como un limnómetro y un tubo pitot. El canal es de pendiente variable, entre  $-1\%$  y  $3\%$  y posee un circuito cerrado de agua.

También se dispone de diversos elementos de control, como las compuertas planas, y en consecuencia se podrá estudiar el comportamiento del flujo en un canal abierto.

### 1.2.2 Descripción de elementos del equipo.

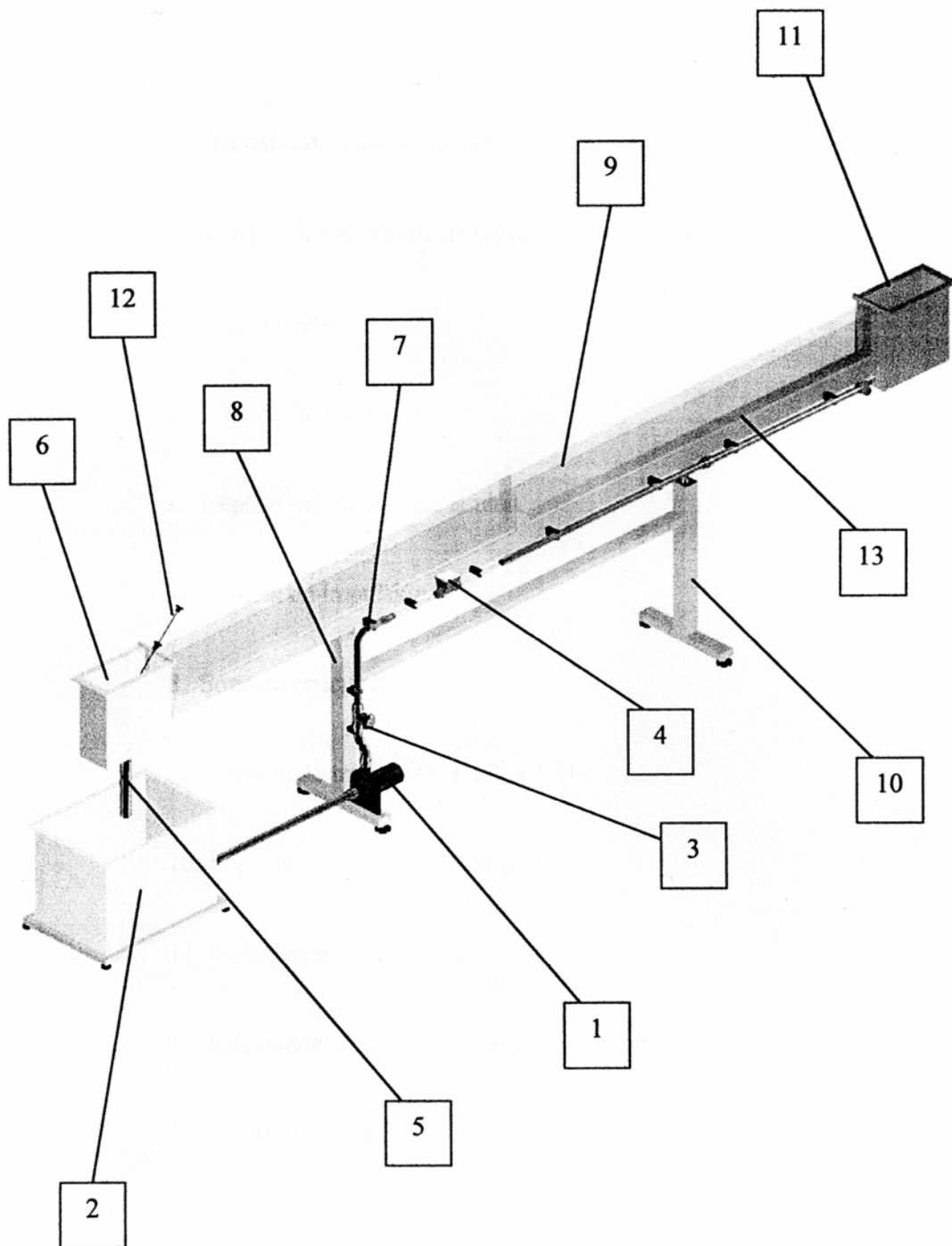
1. Bomba de alimentación.
2. Depósito de almacenamiento.
3. Válvula de membrana de regulación de caudal.
4. Caudalímetro.
5. Tubería de retorno.
6. Depósito regulador de lámina.
7. Tubería de impulsión.
8. Soporte articulado.
9. Sección de trabajo  $80 \times 250 \times 5.000$  mm.
10. Soporte con regulación de altura
11. Depósito tranquilizador.
12. Regulador altura lámina de agua en el canal.
13. Solera del canal.

Nota: La moto-bomba que se ha dispuesto en el equipo posee un caudal máximo teórico  $Q_t = 580 \text{ l/min} = 34,8 \text{ m}^3/\text{h}$ , aunque esto en realidad no se cumple. Siendo el caudal máximo real ( $Q_{mr}$ ) medido en el caudalímetro de unos  $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .

A continuación en la siguiente página se adjunta un esquema del equipo.



# EQUIPO





## 2. OBJETIVOS.

Los objetivos principales del trabajo son dos:

- A) Un objetivo experimental, en el que se busca la comprobación y contrastación teórico-experimental de las variables características (calado, longitudes, velocidades y pérdidas de energía) de diferentes tipos de flujo:
- Bruscamente variado: en la formación de los distintos tipos de resaltos hidráulicos:
    - o No rechazado: En donde teóricamente los momentum en la sección contraída y conjugada son iguales ( $M_1 = M_2$ ).  
Nota: Debido a limitaciones del canal (no se puede poner como condición de aguas abajo el calado exacto que daría este fenómeno y por causas de toma de medidas con los distintos aparatos). El resalto no rechazado se ha concebido como aquel más próximo, a las condiciones ideales, que se puede medir.
    - o Rechazado: Cuando  $M_1 \gg M_2$ .
    - o Sumergido: Donde  $M_1 \ll M_2$ .
  - Gradualmente variado: En la formación de las distintas clases de curvas de remanso, según la pendiente del canal en la que se encuentre (suave, fuerte y horizontal)
- B) Un objetivo didáctico, en el que se obtienen fotos y vídeo digital de las principales mediciones experimentales, para la edición de este material en un ordenador.



### 3. BASES TEÓRICAS.

En este apartado se van a tratar los conocimientos que se deben manejar para el estudio del flujo unidimensional de un canal. Estas bases se van a dividir en cuatro grandes grupos:

#### 3.0. Introducción.

En las aplicaciones prácticas de la hidráulica, se considera la corriente total como un tubo de corriente, con una velocidad promedio  $V$  en cada sección transversal. Las ecuaciones fundamentales que describen el flujo en canales, en su forma más simple, consideran un flujo unidimensional, desarrollándose esta dirección en una eje paralelo a la solera del canal.

#### 3.1. Ecuación de continuidad.

Sea un flujo homogéneo e incompresible ( $\rho = \text{constante}$ ), se puede escribir el principio de conservación de la masa como:

$$dQ = \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot dA = V \cdot A = \text{constante} \quad (1.0)$$

donde:

- $dQ$  es: Diferencial de caudal.
- $\vec{v}$ , es: Vector velocidad en un diferencial de área.
- $\vec{n}$ , es: Vector normal de una superficie diferencial.
- $dA$  es: Diferencial del área transversal.
- $V$  es: Velocidad media del canal.
- $A$  es: Área transversal mojada

Si se integra esta ecuación en un volumen de control, definido entre dos secciones transversales 1 y 2 del tubo de corriente, se obtiene:

$$Q = \int_A \vec{v} \cdot d\vec{A} = V \cdot A = \text{constante} \quad (1.1)$$

o en su lugar

$$Q_1 = Q_2 = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = b \cdot (y_1 \cdot v_1) = b \cdot (y_2 \cdot v_2) = y_1 \cdot v_1 = y_2 \cdot v_2 \quad (1.2)$$

Donde  $A_i = b_i(\text{ancho}) \times y_i(\text{calado}) = \{b_i = \text{cte} = b\}$



### 3.2. Ecuación de la energía o ecuación de Bernoulli.

#### 3.2.1 Deducción de ecuaciones y parámetros.

Partiendo de la ecuación del movimiento según Newton, para un elemento de masa, se tiene que (figura 0):

$$dm = \rho \, ds \, dA \quad (2.0)$$

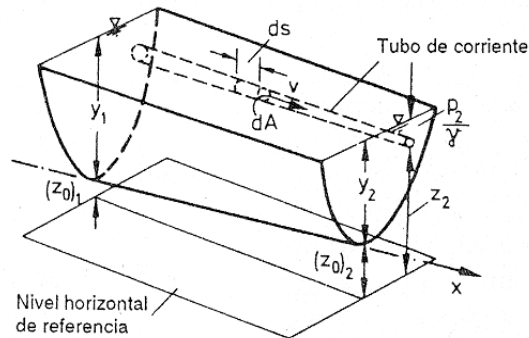


Figura 0 Esquema de flujo en un canal.

Realizando el producto escalar de la fuerza  $dF_s$ , que actúa sobre el elemento de masa en la dirección del flujo ( $s$ ), y el deslizamiento  $ds$ , se tiene en el segundo miembro de la ecuación del movimiento el cambio correspondiente de energía cinética. Trabajando en la hipótesis de flujo estacionario y la presión en cualquier punto no varía en el tiempo, la ecuación de la energía para un  $dm$  es:

$$dF_s \cdot ds = \frac{\rho}{2} \cdot ds \cdot dA \cdot d(v^2) \quad (2.1)$$

Si el estudio de esta ecuación se limita a las siguientes hipótesis:

- Únicamente fuerzas de gravedad y de presión tienen influencia sobre el flujo.
- La fuerza  $dF_s$  se puede expresar en función de la presión  $p$  y de la altura  $z$  del elemento con un peso específico  $\gamma = \rho \, g$ :

$$dF_s = [d(p + z\gamma) / ds] da \, dA \quad (2.2)$$





- No se consideran los efectos de las fuerzas de viscosidad. Así la ecuación solo tendrá validez para pérdidas de energía insignificantes.
- Si se integra la ecuación (2.1), en primer lugar, sobre las secciones transversales 1 y 2, y luego en todo, el tubo de corriente, con la consideración de que; las secciones transversales 1 y 2 están ubicadas en zonas donde la distribución de presiones es hidrostática, se obtiene la ecuación:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 - \frac{p_2}{\gamma} - z_2 = \frac{1}{2gQ} \left( \int_A v^3_2 \cdot dA - \int_A v^3_1 \cdot dA \right) \quad (2.3)$$

- Dividiendo los dos términos de la ecuación entre  $\gamma Q dt$ , sustituyendo  $dQ = v dA$  y considerando el coeficiente de corrección de la carga o coeficiente de Coriolis  $\alpha$ , que tiene la forma siguiente:

$$\alpha = \frac{1}{A} \int_A \frac{v^3}{V^3} \cdot dA$$

El coeficiente de Coriolis es función de la uniformidad de la distribución de velocidades en una sección transversal, siendo  $\alpha$  tanto mayor cuanto menos uniforme sea la distribución de velocidades. Así que para  $v$  constante en una sección transversal  $\alpha = 1$ .

Se obtiene la ecuación de la en la forma:

$$E_1 = E_2 = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.4)$$

La suma de estos tres términos se conoce como carga total de energía,  $H$ :

$$z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g} = H \quad (2.5)$$

Si de acuerdo con la que en las secciones transversales 1 y 2 la distribución de presiones es hidrostática, se tiene que en cada sección  $z + p/\gamma$  es constante, o para un canal abierto:

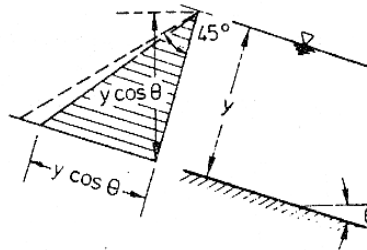
- Para pendiente horizontal:



$$h = z + \frac{p}{\gamma} = z_0 + y$$

(2.6)

➤ Para pendiente inclinada:

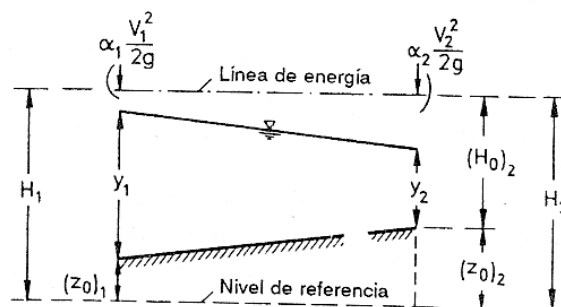


$$h = z + \frac{p}{\gamma} = z_0 + y \cos \theta$$

(2.7)

Por simplificación, se trabajara con la hipótesis de pendiente lo suficientemente pequeña, de tal modo que  $\cos \theta$  es en forma aproximada igual a uno.

Al introducir esta expresión en la ecuación (2.5), se obtiene la ecuación de la energía para canales abiertos, en la forma:





$$z_o + y + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g} = H \quad (2.7)$$

donde H es constante si no se consideran las pérdidas de energía.

Para  $\alpha = 1$  y con fluido viscoso, esta ecuación tiene la forma:

$$E_1 = E_2 = z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2} \quad (2.8)$$

Una magnitud importante en los canales es la denominada energía específica  $H_o$ , la cual a diferencia del valor de H, representa la altura de la línea de energía con respecto al fondo del canal, cuya elevación es a su vez también variable.

$$H_o = H - z_o = y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = \left( v = \frac{Q}{A} \right) = y_1 + \alpha_1 \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} \quad (2.9)$$

Partiendo de esta ecuación (con la hipótesis de  $\alpha = 1$ ) se pueden determinar la velocidad y el calado correspondientes a la energía mínima para que fluya el flujo de agua, en una sección tipo (rectangular) con un caudal dado. Estas dos magnitudes se definen como velocidad crítica ( $v_c$ ) y calado crítico ( $y_c$ ).

Si se representa gráficamente esta ecuación (ver figura 1), se pueden extraer las siguientes ideas:

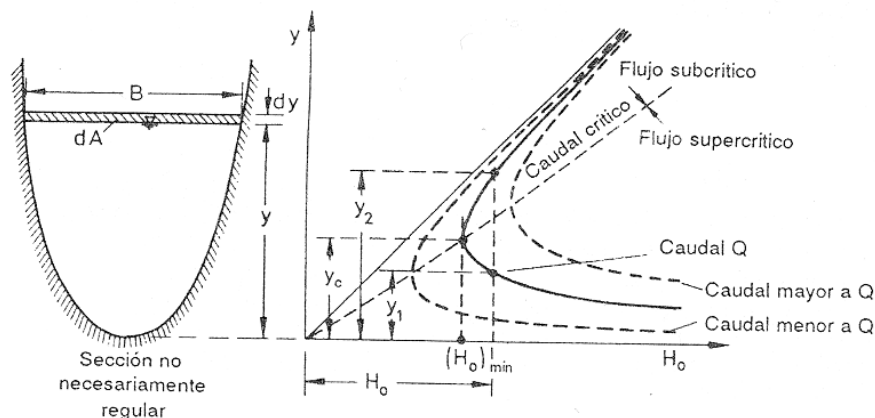


Figura 1. Diagrama de alturas de energía.



- 1). Que para un caudal  $Q$ , la carga de energía específica  $H_o$  debe ser mayor que una carga mínima  $(H_o)_{\min}$ , de tal manera que permita que  $Q$  pueda fluir a través de la sección; y.
- 2). Que para un valor de  $H_o$ , siempre mayor que  $(H_o)_{\min}$ , pueden producirse dos profundidades de agua.

Con estas simplificaciones se puede escribir la ecuación como:

$$H_o = y_1 + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.10)$$

Para obtener las características del flujo crítico correspondiente a la mínima energía específica  $(H_o)_{\min}$ , se debe igualar a cero la derivada de esta última ecuación. Con  $Q$  constante, obteniéndose entonces:

$$\frac{dH_o}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \cdot \frac{dA}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \cdot \frac{dA}{dy} \quad (2.11)$$

Como se observa en la figura 1, puede escribirse la expresión  $dA = B dy$ , de tal modo que la velocidad para el flujo crítico es:

$$v_{\minima} = v_c = \sqrt{g \frac{A}{B}} \quad (2.12.a)$$

Siendo en canal rectangular:

$$v_{\minima} = v_c = \sqrt{g \cdot y_c} \quad (2.12.b)$$

Para obtener el calado crítico se debe que definir el concepto de número de Froude, que es un número adimensional que relaciona las fuerzas de inercia con las de gravedad en un canal:

$$Fr_{\{rectangular\}} = \frac{f. de inercia}{f. de gravedad} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (2.13.a)$$

Siendo el Froude para una energía mínima  $[(H_o)_{\min}]$  en el canal de:

$$Fr_{critica} = \frac{1}{1} = 1 \quad (2.13.b)$$



Introduciéndose el concepto de caudal específico ( $q$ ) en un canal de sección transversal rectangular con  $A = By$ , cuya expresión es  $q = Q / B$ . Si se sustituyen estas dos fórmulas en la ecuación (2.10), se obtiene:

$$H_o = y + \frac{Q^2}{2g \cdot A^2} = y + \frac{q^2}{2g \cdot y^2} \quad (2.14)$$

Por tanto para flujo crítico, se obtiene:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot B^2}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2.15)$$

$$(H_o)_{min} = y_c + \frac{v_c^2}{2g} = \frac{3}{2} y_c$$

ó

$$y_c = \frac{2}{3} (H_o)_{min}$$

(2.16)

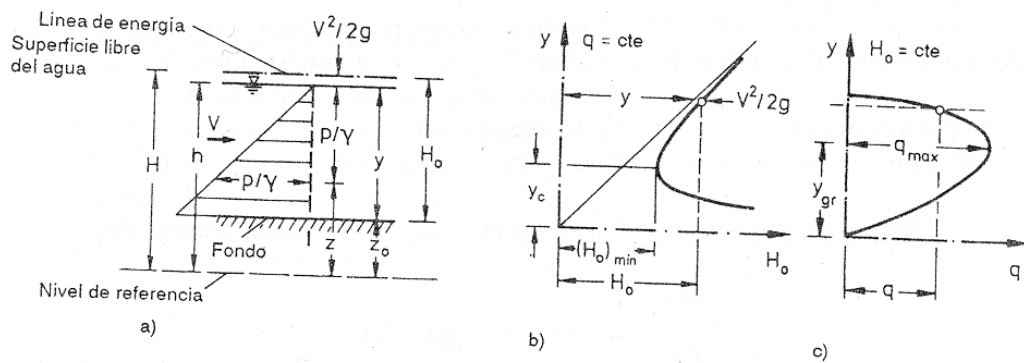


Figura 2 Representación gráfica de la ecuación (2.14)



### 3.2.2 Distintos aspectos del transporte de un flujo.

En la naturaleza un flujo cualquiera, sea cual sea su tipo, raramente va a fluir con su energía mínima, sino que poseerá una energía superior a la mínima y dentro de estas condiciones además podrá pertenecer a tres regímenes distintos de flujo.

Basándose en la figura 2 se ve que independientemente de que  $q$  sea constante y  $H_o$  variable (fig. 2.b) o que  $H_o$  sea constante y  $q$  variable (fig. 2.c). En este último caso, se alcanza con profundidad  $y_c$  el máximo valor posible del caudal unitario:  $q_{max}$ .

Entonces para la resolución del caso general, en el cual varían tanto  $H_o$  (mediante la variación de  $z_o$ ) como  $q$  (a través de la variación de  $B$ ), se requeriría un haz de curvas del tipo de la figura 2.b y 2.c, para la resolución de la ecuación (2.14). En tales casos es muy ventajoso utilizar una representación gráfica adimensionalizada (figura 3) de dicha ecuación, la cual se obtiene dividiendo cada término entre  $y_c$  y con la intervención de la ecuación (2.15), siendo esta expresión válida para canales rectangulares:

$$\frac{H_o}{y_c} = \frac{y}{y_c} + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{y_c}{y} \right)^2 \quad (2.17)$$

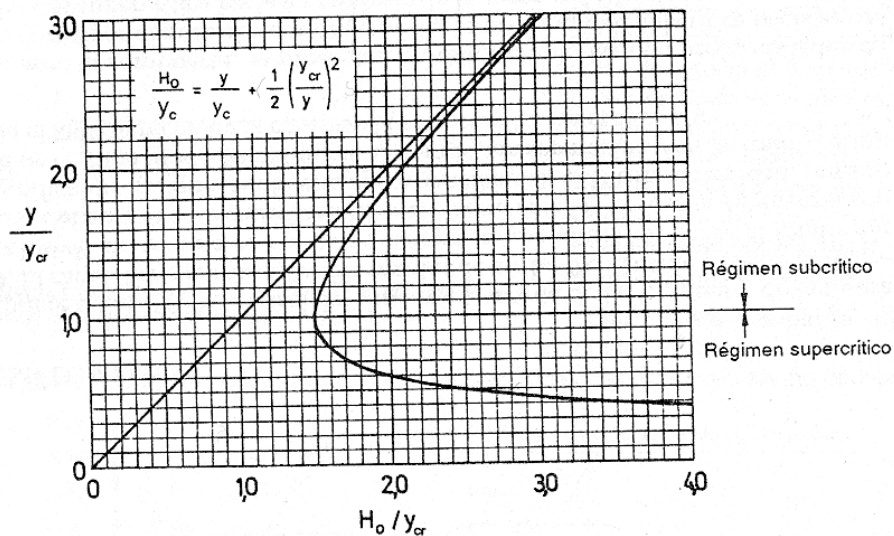


Figura 3. Diagrama adimensional de la energía específica para canales rectangulares.

Conforme se estableció anteriormente, para valores dados de  $Q$  y de  $H_o$  (con excepción del flujo crítico), el flujo en un canal puede ocurrir con dos calados y de agua:



- ⇒ Un calado mayor que la profundidad crítica  $y_c$ . En este caso se dice que el flujo se encuentra en régimen subcrítico.
- ⇒ Un calado menor que la profundidad crítica  $y_c$ . En cuyo caso se dice que el flujo se encuentra en régimen supercrítico.

Se debe notar que la velocidad crítica, es igual a la velocidad de propagación de una onda, con la cual se extienden pequeñas perturbaciones de la superficie libre. Debido a que esta velocidad de propagación debe considerarse en forma relativa a la velocidad del escurrimiento, el flujo supercrítico ( $V > V_c$ ) se caracteriza porque las ondas elementales o perturbaciones pequeñas no pueden propagarse hacia aguas arriba, y por el contrario en el flujo subcrítico como ( $V < V_c$ ) no puede propagarse aguas abajo. Esto se puede observar en la figura 4:

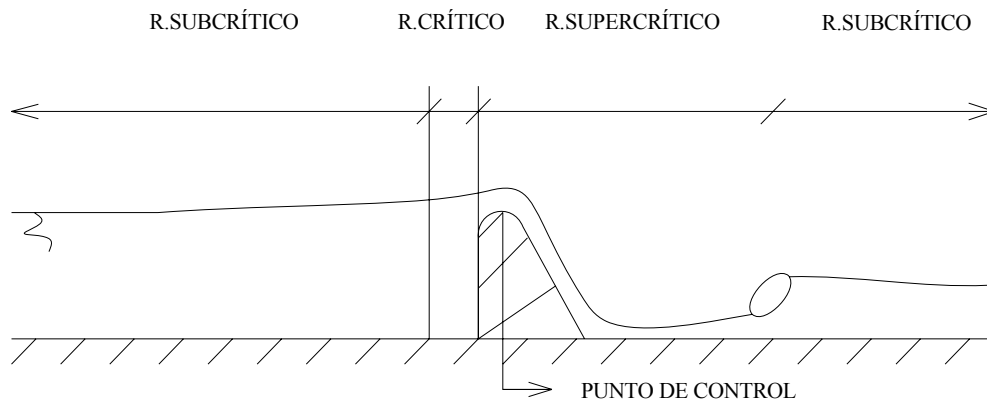


Figura 4. Ejemplo de localización de regímenes.

De aquí se deduce claramente que:

- En régimen supercrítico: Como la inercia es grande, es decir,  $V > V_c \Rightarrow$  las perturbaciones se propagan hacia aguas abajo  $\Rightarrow$  El flujo supercrítico depende en exclusiva de las condiciones de aguas arriba, o lo que es lo mismo, el control se encuentra aguas arriba
- En régimen subcrítico: Como la inercia es pequeña, es decir,  $V < V_c \Rightarrow$  las perturbaciones se propagan hacia aguas arriba  $\Rightarrow$  El flujo subcrítico depende en exclusiva de las condiciones de aguas abajo, es decir, el control se encuentra aguas abajo.
- En régimen crítico: Como la velocidad es igual a la de propagación de la onda ( $v_c$ ), estamos en un equilibrio inestable.



### 3.2.3. Aplicaciones prácticas de los diagramas.

Basándose en la figura 5, se van a describir las aplicaciones de los diagramas 2.b y 2.c o bien, de la figura 3, para el caso de un canal rectangular.

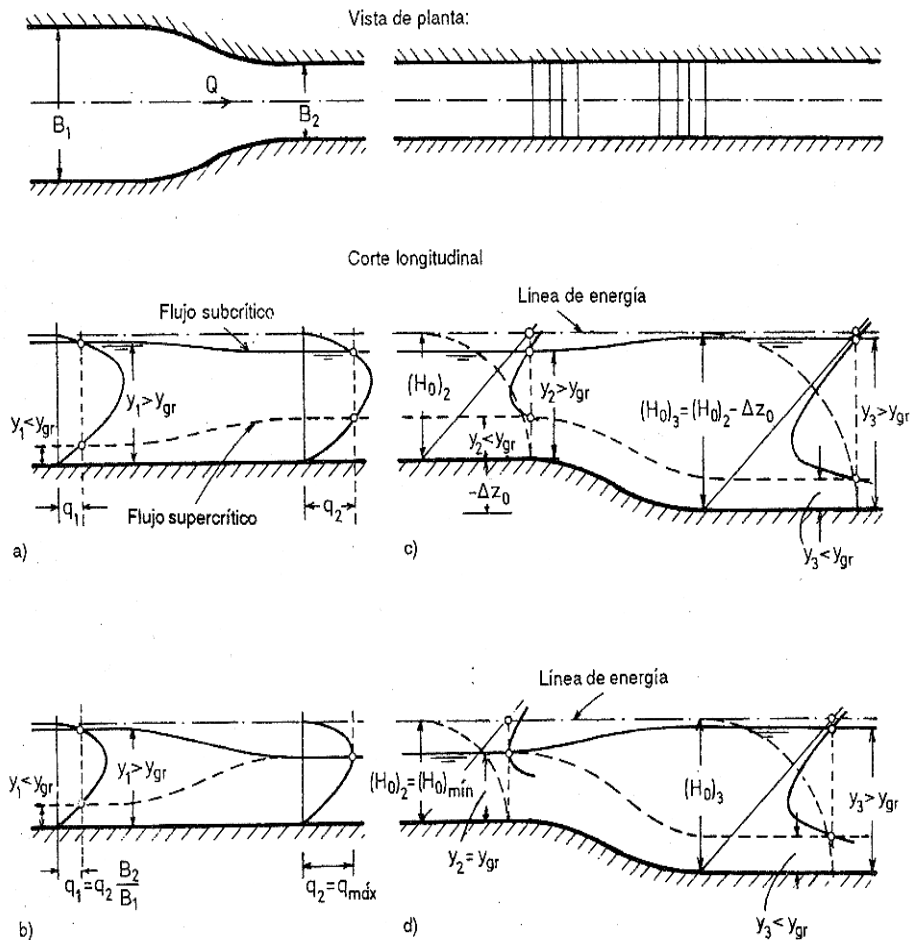


Figura 5. Superficie libre del agua en un canal rectangular.

La ubicación de las superficies libres, correspondientes al nivel indicado de energía, señala con línea continua para el caso del flujo subcrítico y con línea de segmentos para el flujo supercrítico.

Se observa que para un ancho  $B$  decreciente ( $q$  es creciente), la profundidad “ $y$ ” de agua decrece para el flujo subcrítico, mientras que el calado crece para el flujo supercrítico (figura 5.a). Si  $B$  fuese creciente ( $q$  es decreciente), el calado “ $y$ ” de agua crecería para flujo subcrítico y decrecería para supercrítico.

De forma análoga se diferencia entre sí los cambios de profundidad en flujo subcrítico y en supercrítico como consecuencia de las variaciones en el nivel de fondo  $z_0$  (o correspondientemente de la energía específica  $H_0$ ) (figura 5.c). En este caso si se produce un aumento del nivel del fondo  $z_0$ , el calado “ $y$ ” de agua crece para flujo subcrítico, mientras que decrece para flujo supercrítico. En caso de que  $z_0$





disminuyese, la profundidad de agua “y” decrecería para flujo subcrítico, mientras que crecería para flujo supercrítico:

Se puede observar que el agua no se comporta de forma lógica:

- Para variaciones de anchos (B): En una expansión para flujo subcrítico, no parece lógico que el calado en estas condiciones aumente.
- Para variaciones en el nivel del fondo ( $z_0$ ): En un aumento de  $z_0$  para flujo subcrítico, no parecía lógico que el calado aumente en estas condiciones.

Si se disminuye paulatinamente la línea de energía, por ejemplo en el caso de un estrechamiento de un canal, se alcanzará, finalmente, un nivel de energía tal que no puede ser disminuido más sin que se reduzca el caudal Q (figura 5.b,d). La relación entre energía específica y el caudal para la sección transversal más estrecha en este caso extremo, está definida por el régimen crítico. Se debe insistir, si embargo, que como en todo cálculo basado en el análisis unidimensional, el análisis anterior es válido solo si se satisfacen todas las hipótesis requeridas en la derivación de las ecuaciones. Así, por ejemplo, en las zonas de línea de corriente curvas, aguas arriba del estrechamiento o sobre el fondo variable del canal de la figura 5, se puede calcular la ubicación de la superficie libre del agua sólo con ayuda del análisis bidimensional.

Otro ejemplo de que solo se puede calcular la superficie libre del agua cuando las líneas de corriente son paralelas, para flujo unidimensional, es el caso de una compuerta plana (figura 6b). En esta solo se pueden calcular los calados para régimen subcrítico y supercrítico en las zonas donde las líneas de corriente son paralelas a la solera del canal, quedando la transición indeterminada, aunque en este caso esta transición tenga poca importancia, se tendrá que tener en cuenta en otros casos como los de expansiones o contracciones en canales.

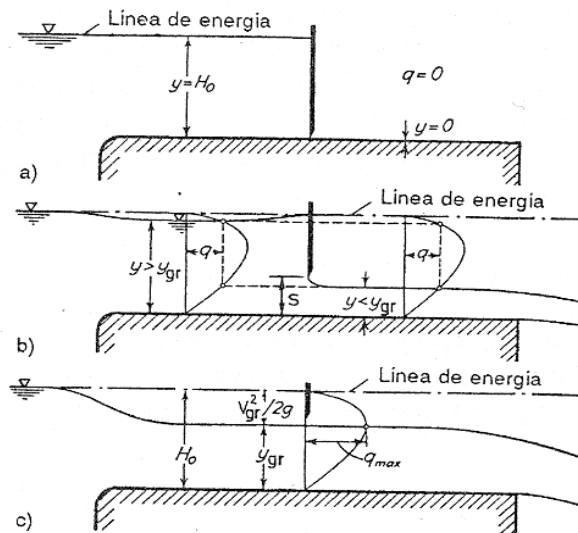


Figura 6. Control de flujo por medio de una compuerta.



### 3.3. Ecuación del impulso o cantidad de movimiento (momentum).

#### 3.3.1 Deducción de la ecuación.

La ecuación del impulso o de la cantidad de movimiento se deriva también de la ecuación del movimiento según Newton, para el elemento de masa (figura 0)  $dm = \rho \, ds \, dA$ . En este caso se expresa la ecuación del movimiento en forma vectorial. Se obtiene, entonces, tomando en cuenta que el líquido es homogéneo e incompresible ( $\rho = \text{constante}$ ):

$$d\vec{F} \cdot dt = \rho \cdot ds \cdot dA \cdot d(\vec{v}) \quad (3.1)$$

donde el diferencial de fuerza, es la fuerza exterior resultante sobre el elemento de volumen considerado. El impulso que actúa sobre este elemento (término a la izquierda) se iguala con el cambio correspondiente de la cantidad de movimiento (derecha). Si se supone que el flujo es estacionario y se integra la ecuación en todo el volumen de control contenido entre dos secciones 1 y 2 (figura 0), dividiéndose entre  $dt$  y considerando la relaciones  $ds = v \, dt$  y  $dQ = v \, dA$ , se obtiene la expresión:

$$\vec{F} = \rho \cdot Q \cdot (\beta_2 \cdot \vec{v}_2 - \beta_1 \cdot \vec{v}_1) \quad (3.2)$$

donde:

- El vector fuerza, representa la fuerza resultante que actúa desde el exterior sobre el volumen de control considerado.
- $\beta$  es el coeficiente de corrección (denominado también de Boussinesq), el cual se obtiene por medio de la integración en la sección transversal (en forma similar a  $\alpha$  en la ecuación de la energía):

$$\beta = \frac{1}{A} \cdot \int_A \frac{v^2}{V^2} \cdot dA \quad (3.3)$$

También el coeficiente  $\beta$  se acerca más a la unidad, cuanto más uniforme sea la distribución de velocidades. Si la distribución de velocidades no es uniforme en las secciones 1 y 2 no se puede asignar a  $\beta$  un valor igual al de  $\alpha$  ni tampoco eliminarlo, salvo cuando sea suficiente con una aproximación.

Como toda ecuación vectorial, la ecuación (3.2) puede también descomponerse en tres ecuaciones según las tres componentes. Entonces resulta para una dirección cualquiera, por ejemplo, para la dirección en sentido de movimiento en  $x$  (flujo unidimensional):

$$F_x = \rho \cdot Q \cdot [\beta_2 (V_x)_2 - \beta_1 (V_x)_1] \quad (3.4)$$

Donde  $F_x$  y  $V_x$  son las componentes en  $x$  de la fuerza resultante sobre el volumen de control y de la velocidad promedio, respectivamente.

Para aplicar esta ecuación se deben suponer además las dos siguientes hipótesis:

- El flujo es estacionario y la presión en cualquier punto no varía en el tiempo.
- Únicamente fuerzas de gravedad y de presión tienen influencia sobre el flujo.



### 3.3.2. Aplicación de la ecuación de momentum, o impulso salto hidráulico clásico.

La aplicación de esta ecuación es el estudio del comportamiento de un fenómeno hidráulico llamado resalto hidráulico (RH) o salto hidráulico. El RH se define como el fenómeno natural por el cual se pasa de régimen supercrítico a subcrítico. Para tener una idea intuitiva del funcionamiento de este fenómeno, se analizará desde el punto de vista de la velocidad de propagación de las ondas superficiales elementales, que para canales rectangulares es:

$$v_c = \sqrt{g \cdot y} \quad (3.4.1)$$

A partir de aquí se establecen dos ideas:

- Las ondas superficiales, se propagan únicamente hacia aguas arriba cuando  $V < V_c$  en el canal, es decir, cuando el flujo es subcrítico.
- La velocidad de propagación de las ondas es una función de su amplitud (calado “y”). Cuanto mayor sea la amplitud de la onda, mayor será la velocidad de propagación, de tal manera que ondas de mayor altura (calado “y”) pueden desplazarse hacia aguas arriba, incluso para flujo supercrítico.

De aquí se deduce que si a partir del embalse de la figura 6b, se embalsa el flujo en el canal hasta alcanzar una profundidad determinada en la zona de aguas abajo, entonces comienza a desplazarse una onda hacia aguas arriba (denominada también onda de sumersión).

En el caso de que la velocidad del flujo supercrítico es exactamente igual a la velocidad de propagación de esta onda, entonces la velocidad resultante de la onda es nula, es decir, la onda de sumersión permanece en su sitio. Esta onda de sumersión de este tipo se puede observar en la figura 7.b.

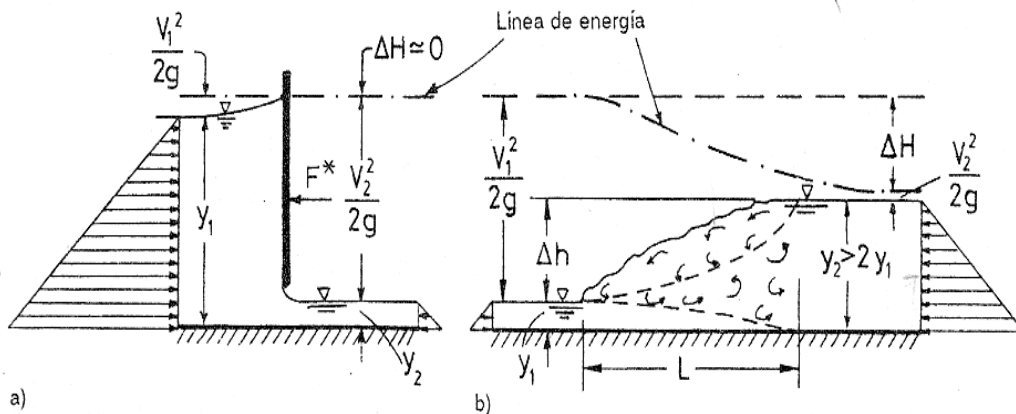


Figura 7 Cambio de régimen a) de subcrítico a supercrítico, b) de supercrítico a subcrítico (resalto hidráulico)

Se observa en esta figura que para el caso de cambio de régimen de flujo subcrítico a supercrítico (figura 7.a) ocurre por efecto de una compuerta (es decir, debido a la acción de la fuerza  $F^*$  sobre el volumen de control), el cambio de flujo supercrítico a subcrítico en el salto hidráulico (figura 7.b), se caracteriza por lo contrario, porque con excepción de las fuerzas de corte y el peso del agua, intervienen en él



únicamente fuerzas internas. Estas fuerzas son fuerzas de viscosidad que ocasionan por lo regular remolinos y vórtices turbulentos con gran disipación de energía.

Por ello en el caso 7.a las pérdidas de energía pueden ignorarse ( $\Delta H \approx 0$ ), mientras que en el caso 7.b deben tomarse en cuenta sin excepción.

Por otro lado las profundidades de agua  $y_1$  y  $y_2$ , que están relacionadas entre sí son, por esta razón, totalmente diferentes en los dos casos:

- En el caso 7.a, la relación entre las profundidades resulta de la ecuación de la energía con  $\Delta H \approx 0$  como se indica en la figura 1. Las profundidades correspondientes tienen la misma energía específica  $H_o$  y se denominan profundidades alternas.

- En el caso 7.b, se relacionan por medio de la ecuación del impulso.

Por lo que  $F^* = 0$ , o lo que es lo mismo  $M_1 = M_2$ , siendo  $M$  el momentum en la sección transversal que es igual a:

$$M = \frac{Q^2}{g \cdot A} + \bar{y} \cdot A$$

Donde:

$\bar{y}$  (m): Distancia al centro de gravedad de la sección desde la superficie libre del agua.

$Q$  (m<sup>3</sup>/s): Caudal

$A$  (m<sup>2</sup>): El área de la sección

Las profundidades que poseen la misma fuerza específica  $S_o$ , se las denominan profundidades conjugadas.

Para la demostración de lo anterior, y en consecuencia para hallar una ecuación que nos defina este tipo de fenómeno, se parte de la ecuación del impulso (3.4) aplicada al salto hidráulico de la figura 7.b, bajo la condición de un canal prismático (rectangular, en este caso) ligeramente inclinado, que se expresa:

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot Q (\beta_2 \cdot V_2 - \beta_1 \cdot V_1)$$

o bien

$$P_1 + \rho \cdot Q \cdot \beta_1 \cdot V_1 = P_2 + \rho \cdot Q \cdot \beta_2 \cdot V_2$$

(3.5)

Donde:

- $P_1$  y  $P_2$  son las fuerzas de presión que actúan en las secciones transversales 1 y 2 del volumen de control
- A la suma de la fuerza de presión y la cantidad de movimiento se denomina fuerza específica  $S_o$ :

$$S_o = P + \rho \cdot Q \cdot \beta \cdot V$$

(3.6)

Así que la ecuación (3.5) puede escribirse también como:

$$(S_o)_1 = (S_o)_2$$

(3.7)

La fuerza de presión  $P$  para un canal con sección transversal cualquiera (figura 8) y con distribución hidrostática de presiones es igual a:

$$P = \gamma \cdot \bar{y} \cdot A$$



(3.8)

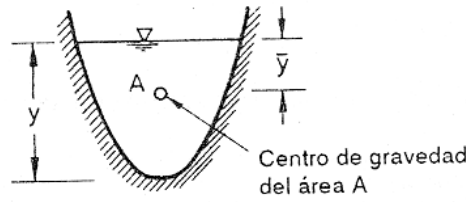


Figura 8. Esquema de definición.

Donde:

- $\bar{y}$  es la distancia desde la superficie libre al centro de gravedad del área A.

Las profundidades conjugadas  $y_1$  y  $y_2$  pueden obtenerse, luego de la sustitución de  $V = Q / A$ , a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{y}_1 \cdot A_1 + \beta_1 \cdot \frac{Q^2}{g \cdot A_1} = \bar{y}_2 \cdot A_2 + \beta_2 \cdot \frac{Q^2}{g \cdot A_2} \quad (3.9)$$

Conociéndose la relación entre " $\bar{y}$ " e  $y$  que depende de la geometría de la sección transversal (figura 8). Siendo para un canal con sección rectangular se tiene  $\bar{y} = y / 2$ ,  $A = By$ , entonces, de la ecuación (3.9), bajo el supuesto de que  $\beta_1 \approx \beta_2 \approx 1$  se deriva:

$$v_1 = \sqrt{g \cdot y_1} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot \left( \frac{y_2}{y_1} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

De aquí se deduce que la velocidad de flujo correspondiente a la velocidad de propagación de la onda de sumersión es realmente mayor que la velocidad de una onda elemental (3.4.1) y que el factor de incremento depende de la amplitud de la onda  $\Delta h = y_2 - y_1$ . Para el caso de que  $\Delta h$  se aproxime a cero se obtiene de esta ecuación que la velocidad de propagación de una onda elemental  $V_1$  tiende al valor de la ecuación (3.4.1).

La ecuación (3.10), se puede escribir de la forma:



$$\text{como } Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$$

$$Fr_1 = \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot \left( \frac{y_2}{y_1} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

reorganizando

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1} - 1 \right)$$

(3.11)

Siendo esta ecuación (3.11) la ecuación de Bélanger.

Teniéndose ya la ecuación que nos liga los elementos de régimen lento con los de régimen rápido ( $y_2$  e  $y_1$  respectivamente) en un resalto hidráulico, que está en función de la sección transversal del canal y del número de Froude.

### 3.3.3. Tipología de resaltos hidráulicos.

Se pueden calcular las pérdidas de energía  $\Delta H$  en un resalto hidráulico (figura 7.b) a partir de la ecuación de la energía, suponiendo que  $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$ , esto es:

$$\frac{q^2}{2 \cdot g \cdot y_1^2} + y_1 = \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot y_2^2} + y_2 + \Delta H$$

(3.12)

obteniéndose:

$$\frac{\Delta H}{y_1} = \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4 \cdot \left( \frac{y_2}{y_1} \right)}$$

(3.13)

En la figura 9.a se muestra la pérdida de energía originada en el salto hidráulico  $\Delta H$ , en relación con la altura de energía específica en la sección de entrada  $(H_0)_1$ , y se compara con los resultados experimentales del U.S Bureau of Reclamation (1964).

Como se observa la pérdida de energía aumenta en forma considerable con el número de Froude y alcanza valores altísimos. Por ejemplo para un  $Fr_1 = 5$  se disipa el 50% de la energía específica original.

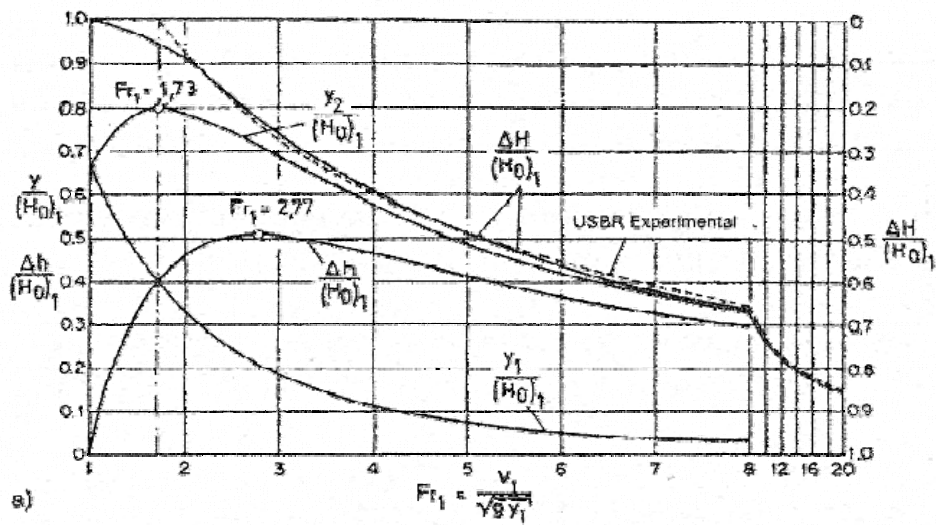


Figura 9. Pérdidas de energía en resalto hidráulico (arriba) y tipos de resaltos (abajo).

Este comportamiento explica la razón por la cual el salto hidráulico se utiliza con frecuencia para disipar el exceso de energía dentro de estructuras de control en el canal.



Esta relación entre el número de Froude y las pérdidas de energía, induce a pensar que los distintos tipos de resaltos hidráulicos, están en función del número de Froude, como se observa en la figura 9.

Se tiene que destacar que desde el punto de vista práctico es muy importante la observación de que en el intervalo  $1 < Fr_1 < 1.7$ , el salto hidráulico se produce en forma ondulada, según se indica en la figura 10.c, y se disipa una insignificante cantidad de energía cinética. Además las ondas permanentes, se extienden un buen tramo hacia aguas abajo. Por esta razón se debe evitar este intervalo.

La zona más favorable para una mayor pérdida de energía, está comprendida entre los números de Froude 4,5 a 9, según los estudios del U.S.B.R. como se puede observar en la figura 10.a y 10.b.

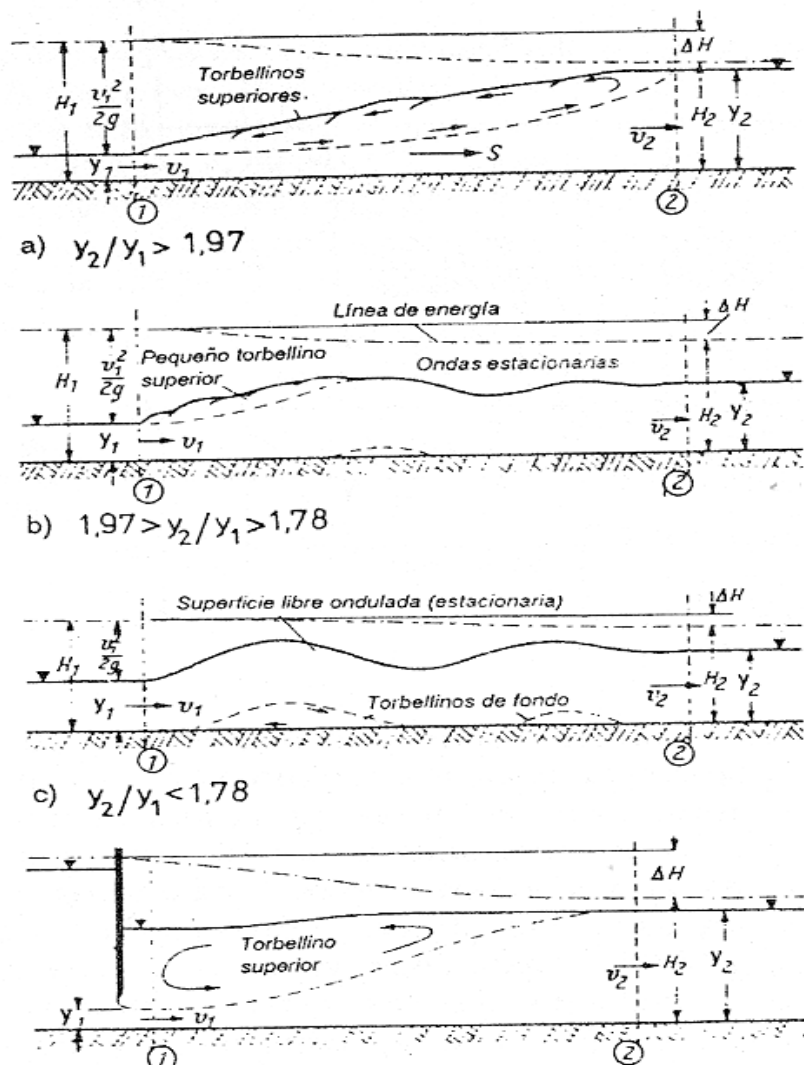


Figura 10. Formas del resalto hidráulico según Schröder.

Se puede observar que para la parte inferior de este intervalo el resalto hidráulico oscila, si es que no se logra estabilizar con medidas adecuadas y para mayores números, particularmente  $Fr \approx 13$ , las condiciones del flujo aguas abajo son





totalmente turbulentas y las medidas necesarias para proteger el fondo del canal resultan más costosas.

Se debe destacar que la condición de flujo indicada en la figura 10.d, que se presenta aguas abajo de una compuerta con creciente sumersión ( originándose cuando  $M_2 \gg M_1$ ), se denomina salto hidráulico sumergido, aunque en realidad, se asemeja más a un chorro sumergido cuando se incrementa la profundidad de aguas abajo. El comportamiento de este tipo de resalto no queda definido con la ecuación de Bèlanger, por ello se verá más adelante su funcionamiento.

### 3.3.4. Evolución del resalto hidráulico, en función de $M_2^*$

Teniendo en cuenta este último apartado, se extrae que para cada uno de estos tipos de resaltos hidráulicos clásicos, se puede dar en tres lugares diferentes aguas abajo de la obra hidráulica.

Estos tres lugares, están en función del calado aguas abajo que exista en el canal. Saber el lugar donde va a caer es muy importante económicamente, ya que el resguardo de la zona donde se produce el resalto tiene un alto porcentaje del costo total.

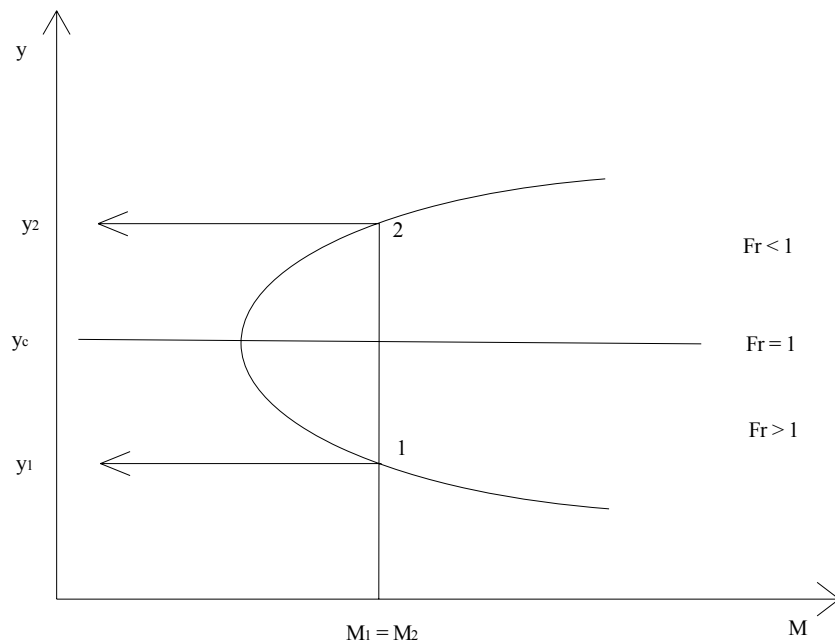
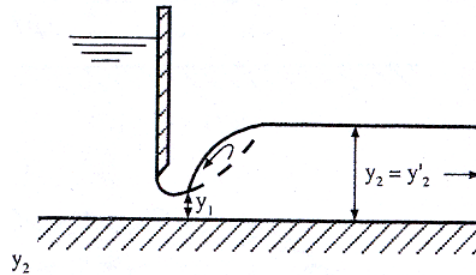


Figura 11 . Curva de calados frente a momentum .

Los tres lugares son: (nota:  $y_2^*$  = calado real aguas abajo,  $y_1^*$  = calado real aguas arriba,  $y_2$  = calado teórico que le corresponde al R.H. aguas abajo,  $y_1$  = calado teórico que le corresponde al R.H. aguas arriba)



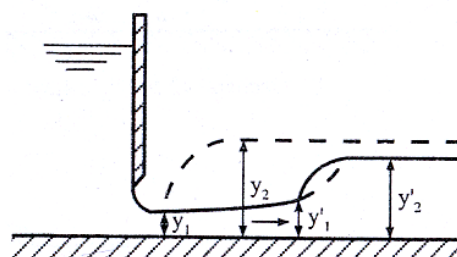
1. Si el flujo en régimen supercrítico entra en un canal, donde en el pie de una rápida (o calado contraído aguas debajo de una compuerta) se da un calado  $y_2^*$  real, exactamente igual al teórico  $y_2$  se tiene que en este punto  $M_1 = M_2$ , es decir, se produce el resalto, desarrollándose cerca del pie, de la rápida así que se protegerá solamente una zona igual a la longitud del resalto. Siendo este el lugar aconsejable.



2. Si el flujo en régimen supercrítico entra en un canal, donde se da un calado  $y_2^*$  real menor que el teórico  $y_2$  ( $y_2^* < y_2$ ).  
En esta situación el momentum generado por  $y_2^*$  ( $M_2^*$ ), es menor, que el momentum que debería existir para que se produjese el resalto en esa zona (momentum correspondiente al calado  $y_2$ ,  $M_2$ ).

Esto nos indica que no se produce el resalto, porque el impulso que genera  $M_2^*$  es menor que el impulso que genera  $M_1$ .

De esta forma el resalto se desplaza hacia aguas abajo, hasta que el  $M_1$  vaya disminuyendo, ya que, varían los componentes que son función del momentum de forma negativa (disminuye la velocidad, en cierta cantidad y aumenta el calado, en cierta cantidad. Llegando a un global menor que en la anterior situación [ver curva M-y, régimen supercrítico, figura 11]) y desarrollándose un nuevo  $M_1'$ , con su correspondiente  $y_1'$ , el cual se iguala al  $M_2^*$  que existe aguas abajo. Llegando así al estado donde se genera el resalto hidráulico  $M_2^* = M_1'$ . En este caso hay que proteger una zona extensa que va desde el pie de la rápida hasta que se genera el resalto, lo que incrementaría mucho los costes; Siendo este caso una situación a evitar.

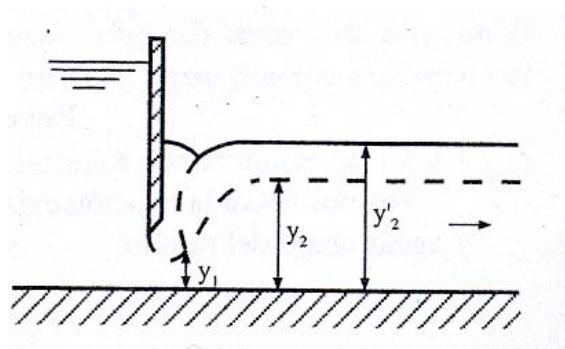




3. Si el flujo en régimen supercrítico entra en un canal, se da un calado  $y_2^*$  real mayor que el teórico  $y_2$  ( $y_2^* > y_2$ ) y entonces el momentum generado por  $y_2^*$  ( $M_2^*$ ), es mayor, que el momentum que debería existir para que se produjese el resalto en esa zona (momentum correspondiente al calado  $y_2$ ,  $M_2$ ).

Y dado que  $M_2^* > M_1$ , el resalto se desplaza hacia aguas arriba, hasta que el  $M_2^*$  vaya disminuyendo, ya que, varían los componentes que son función del momentum de forma negativa (aumenta la velocidad, en cierta cantidad y disminuye el calado, en cierta cantidad. Llegando a un global menor que en la anterior situación [ver curva M-y, régimen subcrítico, figura 11]) y encontrándose con un nuevo  $M_2'$  (igual al  $M_2$  teórico), con su correspondiente  $y_2'$ , el cual se iguala al  $M_1$  que existe aguas arriba. Llegando así al estado donde se genera el resalto hidráulico  $M_1 = M_2'$ .

Si la sección no es muy grande, la zona a proteger en principio es inferior a las dos anteriores, ya que, el resalto hidráulico, se desarrolla en la propia obra hidráulica, con lo que conlleva a que se origine en una zona ya protegida, lo que abarata costes; siendo este el lugar adecuado.



Nota: En los puntos dos y tres la evolución del resalto en el canal, origina una adaptación del perfil del agua sobre el R.H., a esta adaptación se la denomina curva de remanso (C.R.).

Esquema resumen:

| Estado | Comparación de momentum iniciales | Movimiento del resalto hidráulico | Momentum finales        |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1      | $M_1 = M_2$                       | No existe                         | Igual que los iniciales |
| 2      | $M_1 > M_2^*$                     | Aguas abajo                       | $M_1' = M_2^*$          |
| 3      | $M_2^* > M_1$                     | Aguas arriba                      | $M_2' = M_2 = M_1$      |



### 3.3.5 Resalto en canales inclinados.

En el trabajo experimental que se va a desarrollar, el canal va a tener una ligera pendiente. Como consecuencia de ello, se tendrían que dar unas nociones sobre resalto en canales inclinados (tema tratado en Ven Te Chow, páginas 415-420).

Para tener las condiciones de resalto en canales inclinados, la pendiente debe estar entre un 5% y un 30%, que es bastante más elevada de la que va a poseer dicho canal (la pendiente máxima que se va a desarrollar en el trabajo experimental es  $6.3\text{‰} + 8\text{‰}$ , es decir, un  $14.3\text{‰}$ ). Esta condición, unida a que el objetivo de este trabajo es contrastar la ecuación de Bélanger (pendiente horizontal), conlleva a que no se analice en detalle este tema.

Aún así para tener en cuenta la inclinación del canal, se va a usar en el trabajo experimental la gráfica que relaciona  $y_2/y_1$  (horizontal) ó  $d_2/d_1$  (inclinada) con el Froude en la sección 1

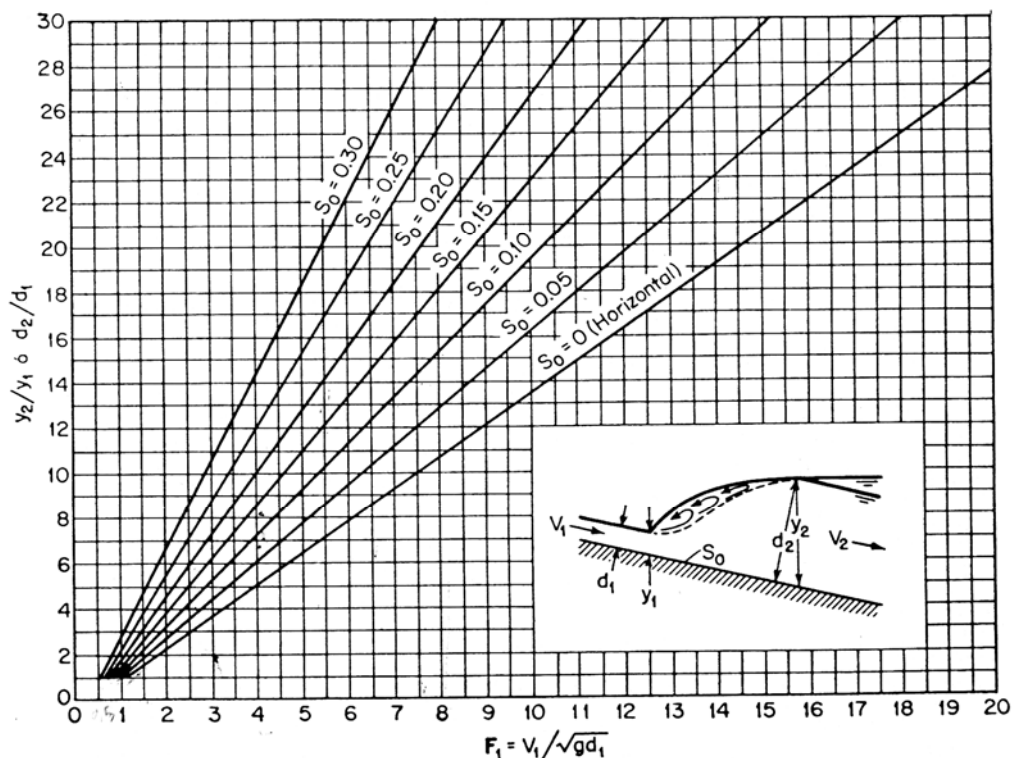


Figura 12 Relaciones experimentales entre  $Fr_1$  e  $y_2/y_1$  ó  $d_2/d_1$  para resalto en canales inclinados.

### 3.3.6 Longitud del resalto hidráulico.

#### 3.3.6.1 Canales horizontales.

Otro parámetro importante es la longitud de desarrollo del resalto. Una ecuación de tipo experimental obtenida por el Bureau of Reclamation es:

$$L.R. \approx 5.9 \cdot (y_2 - y_1) \quad (3.14)$$



### 3.3.6.2 Canales inclinados.

De igual forma que en el apartado 3.3.5, solo se va a tener en cuenta la inclinación del canal para usarlo en el trabajo experimental.

La influencia de la pendiente en la longitud del resalto está en función de la relación  $L.R./y_2$  frente al Froude en la sección 1. Dicha relación se expresa en la siguiente gráfica.

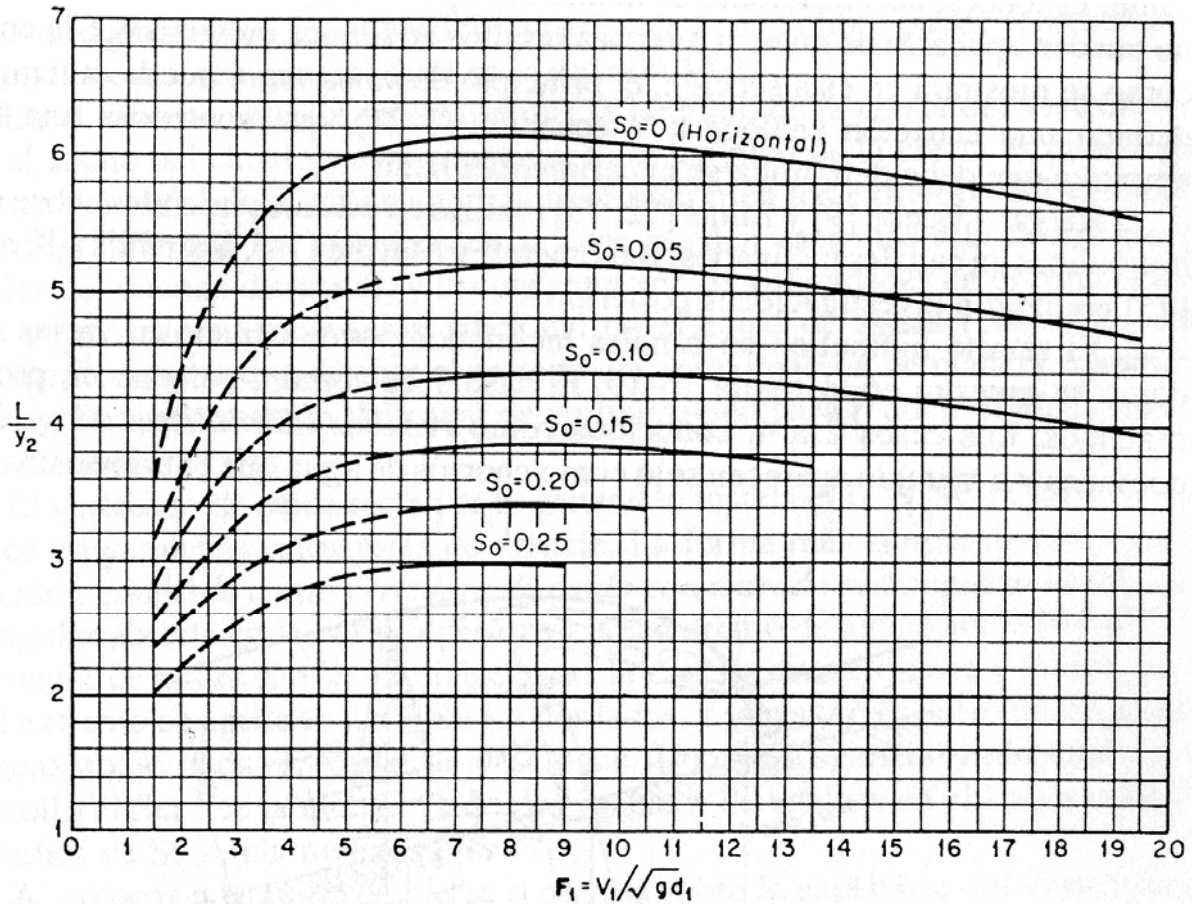


Figura 13. Longitud en términos de la profundidad secante de resaltos en canales inclinados. (U.S. Bureau of Reclamation [34]).

### 3.3.7 Resalto sumergido.

#### 3.3.7.1 Introducción:

Este resalto es una variante del estado 3 del resalto clásico, en el que el calado aguas abajo real es mayor que el teórico, y por diversas circunstancias el resalto se sumerge.



Aquí, el comportamiento es distinto que en los anteriores, ya que, el flujo supercrítico actúa como un chorro a gran velocidad que fluye por la solera del canal, originando grandes desperfectos en esta.

Como se puede intuir este resalto posee una longitud mayor que la de los otros, ya que el chorro tarda más en disiparse, por la gran velocidad que posee.

Las variables de las que depende dicho resalto son:

- $y_1$  e  $y_2$  calados aguas arriba y abajo respectivamente, correspondientes al resalto clásico.
- $y_3$  e  $y_2'$  calados aguas arriba (o calado sumergido al inicio del resalto, asociado al calado en la zona de reintegro) y abajo respectivamente, correspondientes al resalto sumergido.
- $y_0$  calado aguas arriba de la compuerta.

El análisis de esta tipología de resalto se va a llevar a cabo por dos formulaciones:

- La expuesta por Rajaratnam (1967) y consultada en Canales (2000). Dicha formulación se denominará por temas de simplificación como "Rajaratnam I".
- La propuesta por Rajaratnam y Subramanya (1967) y consultada en Ranga Raju (1968). Dicha formulación se denominará "Rajaratnam II".

### 3.3.7.2 Rajaratnam I.

Este método posee como esquema general el representado en la siguiente figura:

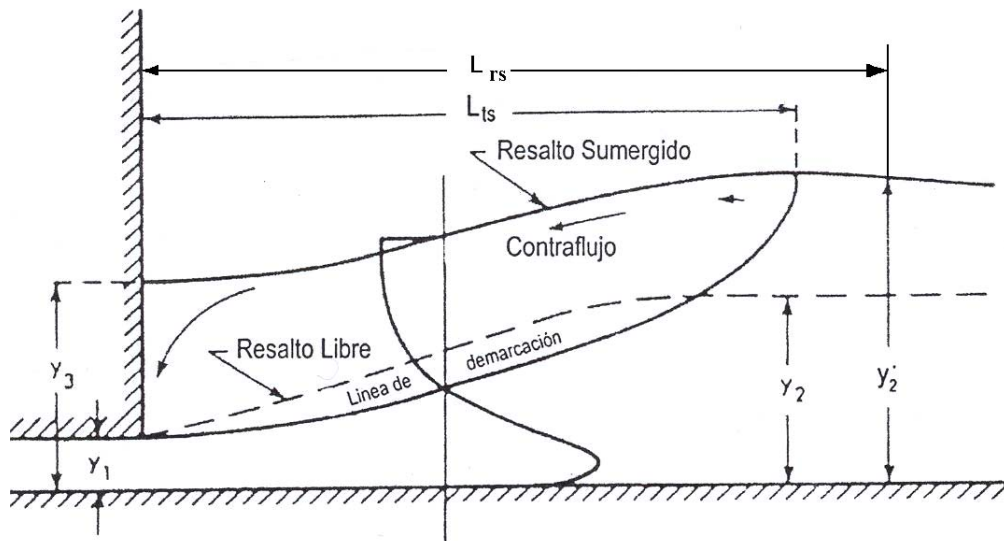


Figura 14. Resalto sumergido, variables usadas para definirlo.

El resalto sumergido queda especificado por  $Fr_1$  y se define como factor de sumergencia  $S$  a:

$$S = \frac{y_2' - y_2}{y_2} \quad (3.15)$$



Este resalto tiene asociado un calado inicial distinto de  $y_1$  denominado  $y_3$ . El cociente de ambos es  $\psi$ . Aplicando la ecuación de cantidad de movimiento entre las secciones inicial y final, se ha encontrado que  $\psi$  es función de  $S$  y  $Fr_1$ :

$$\Psi = \frac{y_3}{y_1} = \left[ \frac{(1+S)^2}{4} \cdot \left( \sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right)^2 - 2Fr_1^2 + \frac{4Fr_1^2}{(1+S) \cdot \left( \sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

Las longitudes características de este fenómeno (resalto y turbulencia) están dadas por las siguientes ecuaciones empíricas (Rajaratnam, 1967):

- $y_c$  = calado crítico.
- $L_{rs}$  = Longitud de resalto sumergido.
- $L_{ts}$  = Longitud de turbulencia asociada al resalto sumergido.

$$\frac{L_{rs}}{y_2} = 4.9S + 6.1 \quad (3.17)$$

$$\frac{L_{ts}}{y_c} = \frac{3.31}{\left[ \frac{(y_2' - y_3)}{y_3} \cdot \frac{1}{Fr_1} \right]^{0.885}} ; \quad S \leq 2 ; \quad Fr_1 \leq 8 \quad (3.18)$$

La disminución de la velocidad en el fondo y del esfuerzo cortante se retardan de forma proporcional a la sumergencia. Así, estos resaltos disipan menos energía que el resalto clásico y por lo mismo hay mayor riesgo de erosión aguas abajo de los mismos.

La eficiencia de este resalto está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta_s = \frac{(H_o)_1 - (H_o)_2}{(H_o)_1} = \frac{\left( \psi - \frac{1+S}{2} \cdot \left( \sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right) \right) + \frac{Fr_1^2}{2} \cdot \left( 1 - \frac{4}{(1+S)^2 \cdot \left( \sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right)^2} \right)}{\psi + \frac{Fr_1^2}{2}} \quad (3.19)$$



Según estudios hechos por Govinda y Rajaratnam (Rajaratnam, 1967), bajo las mismas condiciones hidráulicas, la eficiencia de este resalto puede ser mayor que la del resalto clásico (para la condición de sumergencia óptima,  $\eta_s = 1.10\eta$ , si  $(6 < Fr_1 < 10)$ ).

$\eta$  = eficiencia del resalto clásico.

### 3.3.7.3 Rajaratnam II.

El esquema general del método es el siguiente:

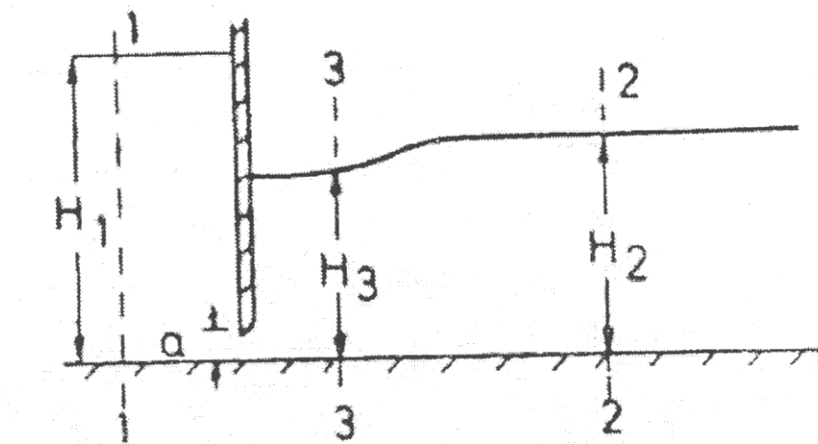


Figura 15. Flujo sumergido en compuerta plana

Donde los parámetros son:

$$- H_1 = y_0; H_3 = y_3; H_2 = y_2$$

La formula expuesta por Rajaratnam y Subramanya es la siguiente:

$$\frac{y_3}{a \cdot c_d} = 2 \cdot \left( 1 - \frac{a \cdot c_d}{y_2'} \right) + \sqrt{4 \cdot \left( 1 - \frac{a \cdot c_d}{y_2'} \right)^2 + \left( \frac{y_2'}{a \cdot c_d} \right)^2} - 4 \cdot \left( \frac{y_0}{a \cdot c_d} - \frac{y_0}{y_2} \right)$$

Donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga, este posee la siguiente expresión:

a partir de:

$$q = C_d \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot y_0}$$





se obtiene:

$$Cd = \frac{Cc}{\sqrt{1 + \frac{Cc \cdot a}{y_0}}}$$

Con la finalidad de no estar utilizando formulaciones para hallar el  $C_d$  que se necesite, se va a recurrir a la siguiente gráfica:

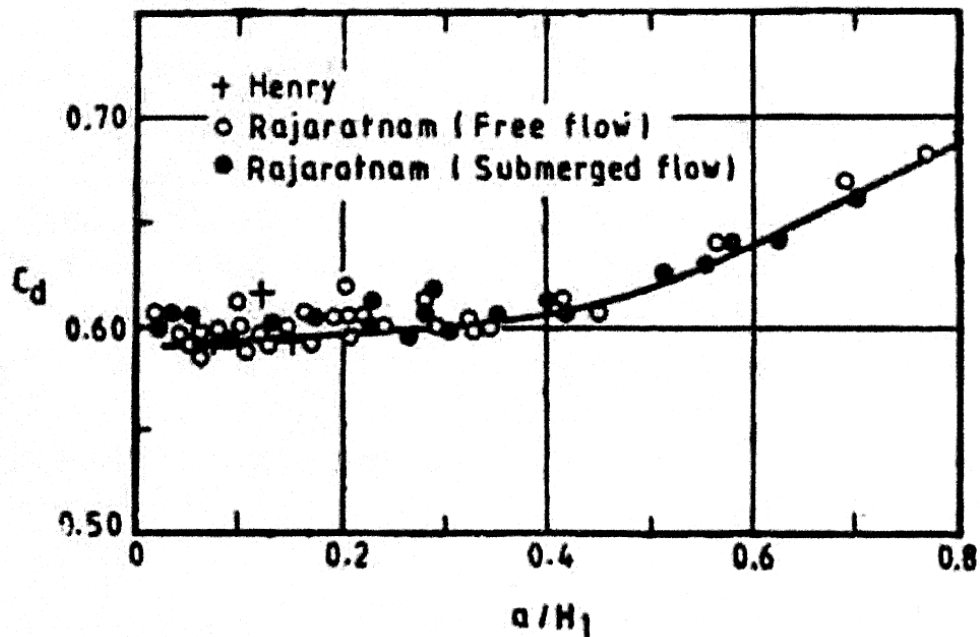


Figura 16. Coeficiente de descarga ( $C_d$ ) bajo compuerta plana

En esta gráfica se pone de manifiesto la dependencia de  $C_d$  con la relación entre la abertura de la compuerta ( $a$ ) y el calado aguas arriba de la compuerta ( $y_0$ ).

Nota: Para la obtención del calado  $y_3$  se va a simplificar la ecuación en función de distintos parámetros, los cuales, son los valores correspondientes a los distintos paréntesis de los que está compuesta dicha ecuación.

$$\frac{y_3}{a \cdot C_d} = 2 \cdot A + \sqrt{4 \cdot B + C - 4 \cdot D}$$



### 3.4. CURVAS DE REMANSO.

#### 3.4.1 Introducción.

En la figura 13 se puede ver que cuando aparece alguna singularidad en el canal, el flujo de agua altera su movimiento uniforme. Como consecuencia de esto se extrae que la influencia de la singularidad se hace notar en un tramo más o menos largo del canal.

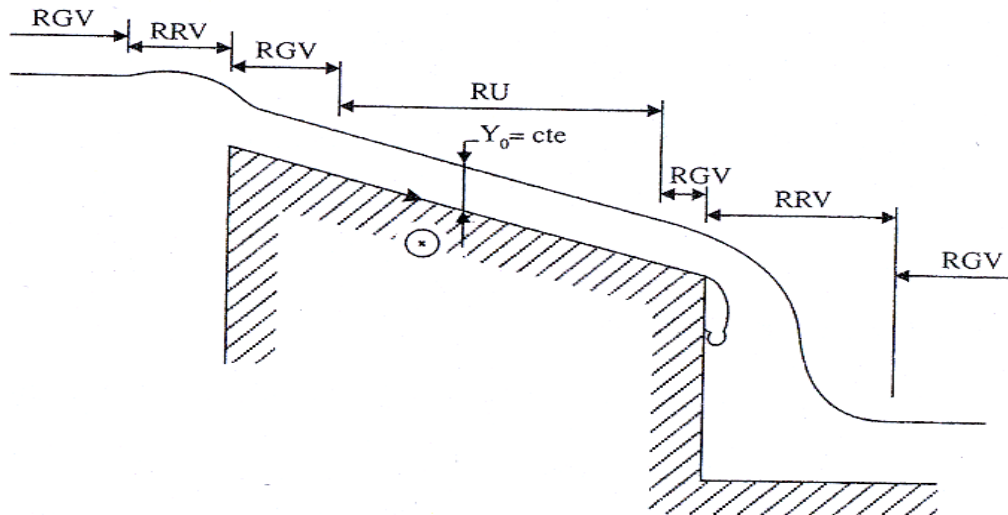


Figura 17 Ejemplo de regímenes variados

En estas condiciones, es cuando surge el flujo variado (no uniforme), que se caracteriza porque la sección mojada y la velocidad varían de un punto a otro, conservándose constante el caudal, esta variación tiene lugar a lo largo de una evolución espacial, no temporal.

Como se comentó este tipo de movimiento se podía dar en un tramo más o menos largo del canal, pues bien esto tiene sentido por que a raíz de ello se pueden clasificar los dos tipos de flujo variado que son:

- (a) El flujo gradualmente variado (F.G.V.), cuando el calado y la velocidad varían lentamente a lo largo de un tramo de canal.
- (b) El flujo rápidamente variado (F.R.V) o bruscamente variado (F.B.V.), cuando se produce la variación en un tramo corto del canal.

Como conclusión se tiene que en los canales de sección variable, en las transiciones lentas de la sección transversal y en los cambios de pendiente, en definitiva cuando se produce un flujo variado (no uniforme), la superficie del agua adopta diversas formas, llamadas “curvas de remanso” (C.R.).

Como se ha visto las C.R. se dan en un flujo variado, pero por simplificar cálculos, se trabajará solo para la condición de F.G.V. de aquí que se consideren las siguientes hipótesis, además de las señaladas anteriormente para este flujo:



- Régimen permanente ( $t = 0$ ).
- Caudal constante dentro de cada tramo.
- La pérdida de carga en una sección se supone igual a la que tendría con el mismo calado en régimen uniforme.

Teniendo esto en cuenta, se puede decir que la base para el estudio de los probables perfiles de superficies que describe el flujo gradualmente variado (C.R.) es la ecuación diferencial (e.d.) del F.G.V. para canales rectangulares:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{I_o - I_e}{1 - Fr^2}$$

### 3.4.2 Deducción de la e.d. del flujo gradualmente, en canales rectangulares.

Para poder utilizar la fórmula de Manning en flujos gradualmente variados, se requiere partir de una hipótesis, que es:

- Los cambios en la profundidad de agua “y” y la velocidad media del flujo “V” son tan graduales a lo largo del canal, que en el cálculo de la pendiente de la línea de energía  $I_e$  se puede utilizar la ecuación de Manning.

Esta aproximación es tanto mejor cuanto más gradual sea la variación de “y” y de “V”, y cuanto menor sea la longitud del intervalo  $\Delta x$  seleccionado a lo largo del canal. La ecuación de Manning considerándose esta hipótesis se expresa:

$$Q \cong A_m \cdot V_m = A_m \cdot k_s \cdot R_m^{2/3} \cdot I_e^{2/3} \quad (3.20)$$

Donde:

- Los valores de  $A_m = A(y_m)$  y  $R_m = R(y_m)$ , siendo  $y_m$ :

$$y_m = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (3.21)$$

Siempre que  $\Delta x$  sea lo suficientemente pequeño.

Según la ecuación (3.20), se puede calcular la pendiente de la línea de energía  $I_e$  en el tramo  $\Delta x$ . Explicándose esto en la figura 14.

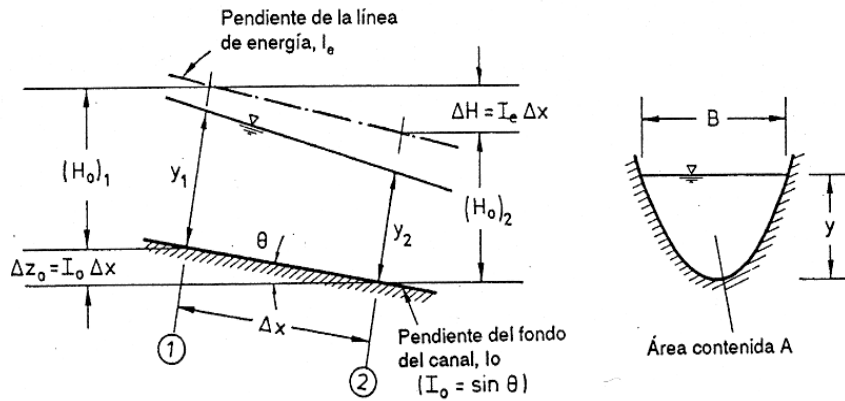


Figura 18. Esquema de definiciones para calcular por intervalos la superficie libre del agua.

De la figura 14 se formula la ecuación de la energía, en la forma:

$$I_o \cdot \Delta x + (H_o)_1 = I_e \cdot \Delta x + (H_o)_2 \quad (3.22)$$

Donde:  $H_o$  es la energía específica en la sección transversal del flujo considerado.

$$H_o = y \cdot \cos \theta + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Despejando de la ecuación (3.22), se tiene:

$$\Delta x = \frac{(H_o)_1 - (H_o)_2}{I_e - I_o} = \frac{\Delta H_o}{I_e - I_o} \quad (3.23)$$

Con estas relaciones se puede calcular cualquier perfil de superficie libre del agua en el caso del flujo gradualmente variado. Sin embargo, en la práctica aparecen grandes dificultades relacionadas con el problema de determinar las secciones de control del flujo, la dirección de avance en el cálculo por intervalos y las operaciones requeridas en el mismo.

En consecuencia para facilitar un análisis previo, resulta útil conocer las propiedades de los perfiles de la superficie libre del agua para flujo gradualmente variado.

La base para analizar los probables perfiles de flujo es la ecuación diferencial del flujo gradualmente variado, que se deduce a partir de la consideración de las siguientes hipótesis:

- La corriente es estacionaria.



- El canal es prismático.
- La curvatura de las líneas de corriente es insignificante en todo punto, de tal manera que se pueda suponer una distribución hidrostática de presiones.
- El coeficiente  $\alpha$ , es constante.

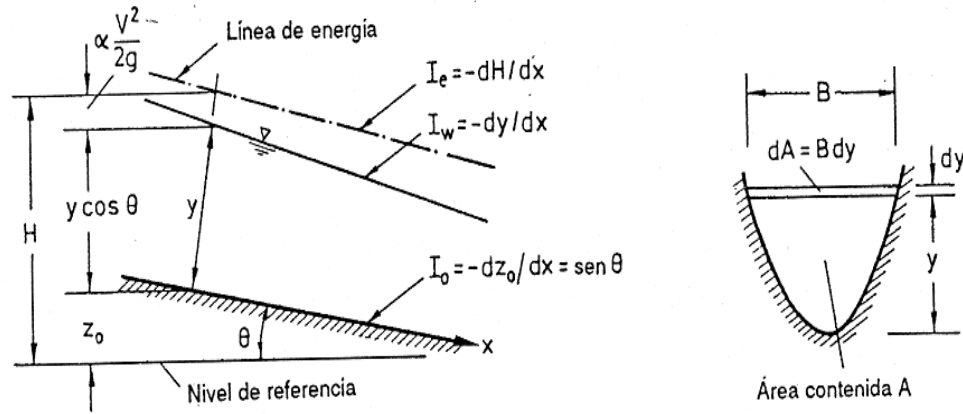


Figura 19 Esquema de definición para derivar la ecuación diferencial.

Partiendo de la figura 15 y considerándose estas hipótesis, puede escribirse la ecuación de la energía como sigue:

$$z_o + y \cdot \cos \theta + \alpha \cdot \frac{Q^2}{A^2 \cdot 2g} = H \quad (3.24)$$

Derivándose la ecuación (3.24) respecto a x, se obtiene:

$$\frac{dz_o}{dx} = \frac{dy}{dx} \cdot \cos \theta - \alpha \cdot \frac{Q^2}{A^3 \cdot g} \cdot \frac{dA}{dx} = \frac{dH}{dx} \quad (3.25)$$

Considerando que  $dA/dx = B dy/dx$  (figura 15) y sustituyendo las pendientes  $I_e$  y  $I_o$ , así como la relación  $Q = VA$ . Se obtiene la e.d. del flujo gradualmente variado para cualquier tipo de sección:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{I_o - I_e}{\cos \theta - \alpha \cdot Fr^2} \quad \text{donde} \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot \frac{A}{B}}} \quad (3.26)$$



Siendo para canal rectangular,  $\alpha \approx 1$  y  $\cos \theta \approx 0$ :

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{I_o - I_e}{1 - Fr^2} \quad (3.27)$$

### 3.4.3. Aspectos previos a la clasificación de los perfiles de la superficie libre.

Una ayuda importante en el análisis previo al cálculo de las curvas de remanso, es la clasificación de los perfiles de flujo.

A esta clasificación se llega con base en el análisis de las propiedades de la ecuación diferencial que define la ubicación de la superficie libre. Primeramente se hace una clasificación de perfiles, donde se deben tener en cuenta dos consideraciones sobre las condiciones de contorno de esta ecuación:

- En primer lugar, se subdivide la región donde pueden localizarse los niveles de agua en tres zonas por medio de dos líneas paralelas al fondo del canal que son:
  - CL, línea de flujo crítico, corresponde a un calado  $y = y_c$ .
  - NL, línea de flujo normal o uniforme, que es la que se debería desarrollar en el canal si se considerase que en él se tiene un flujo uniforme, sometido a unas condiciones de contorno dadas, corresponde a un calado  $y = y_n$ .

Estas dos líneas estarán una encima de la otra, conforme determinen las condiciones de contorno.

Siendo las tres zonas:

- Zona 1: Por encima de la línea superior.
- Zona 2: Entre las dos líneas.
- Zona 3: Por debajo de la línea inferior.

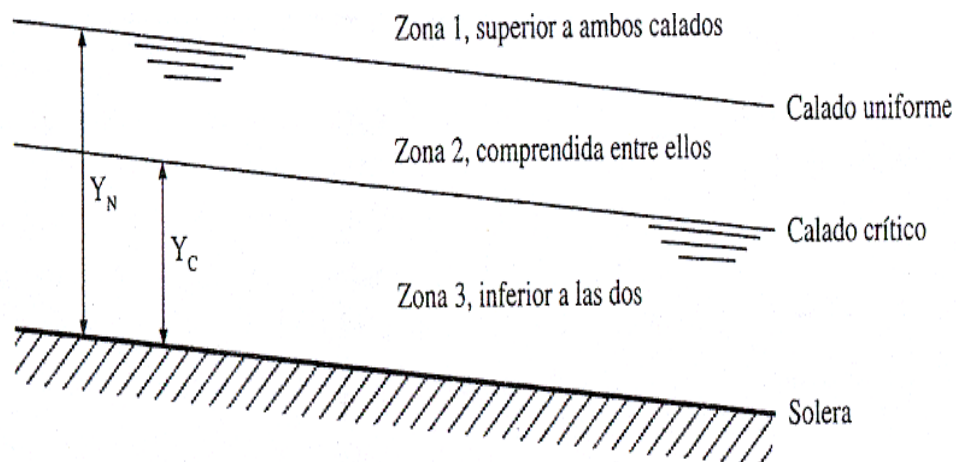


Figura 20. Definición de zonas de flujo.

- En segundo lugar, se debe considerar qué evolución posee la superficie libre al acercarse a las dos líneas características del problema (CL y NL). Esto es debido a que estas suponen barreras infranqueables para los cálculos de las curvas de remanso, ya que, la ecuación diferencial no caracteriza estas situaciones. Se tienen cuatro casos, que son:



1. Cuando  $y \rightarrow y_c \Rightarrow Fr = 1$  (a excepción de  $y_c = y_n$ ) así que en la ecuación diferencial.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{I_o - I_e}{1 - 1} = \frac{I_o - I_e}{0} = \infty$$

Es decir,  $y$  varía infinitamente respecto de  $x$ , por lo que se tiene que aproximar de forma brusca, o sea, perpendicular.

Esto nos indica que el paso del agua por esta línea se produce en condiciones singulares y está en función de la evolución que desarrolla.

- 1.1 Si hacia ese calado se evoluciona partiendo de un régimen rápido, aguas arriba, deberá sufrir un resalto antes de traspasarlo para convertirse en lento.

Por lo tanto vemos que la curva  $y$  se acerca a  $y_c$  en forma asintótica a una tangente vertical.

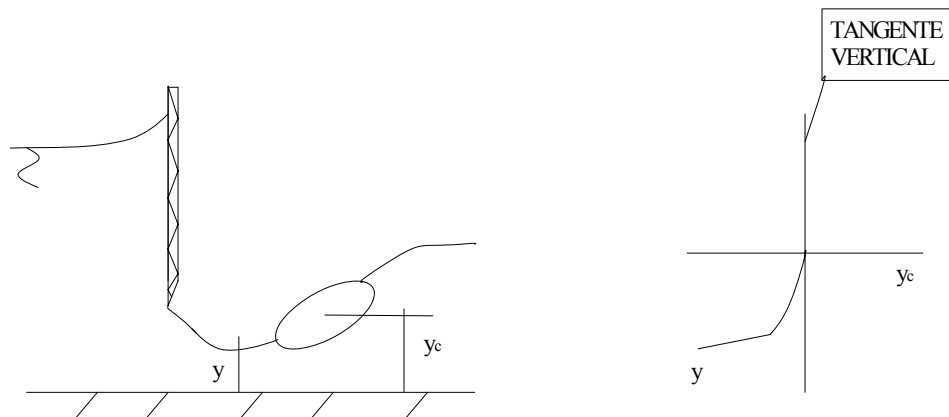


Figura 21.

- 1.2 Si hacia ese calado se evoluciona partiendo de uno lento a otro rápido, se contemplará una transición ordenada, pero como en las proximidades del régimen crítico  $\partial y / \partial x = \infty$ , el ángulo tiende a  $90^\circ$ , indicando una gran curvatura (tendente a la vertical) como en el caso anterior.

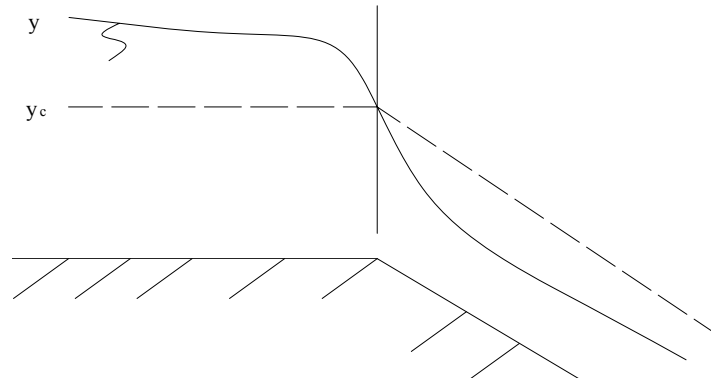


Figura 22.

Como los dos tienden a la verticalidad las líneas de corriente se curvan de manera considerable (las líneas se curvan porque cuando se está en las proximidades de  $y_c$  corresponde a un flujo rápidamente variado), lo que invalida la ecuación y todo el razonamiento por haber supuesto de partida la hipótesis de líneas de corriente paralelas.

Por ello los cálculos de la CR deben interrumpirse, en ambos casos, antes de cruzar la línea de calado correspondiente a  $y_c$ . Y poner que se acerca asintóticamente a una tangente vertical, además la CR la se pondrá de trazos discontinuos.

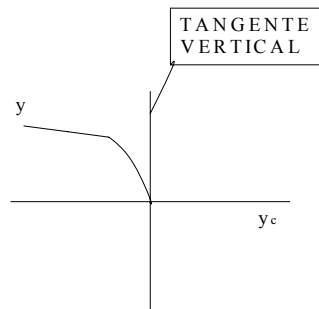


Figura 23

2. Cuando  $y \rightarrow y_n$ , es decir, cuando el calado tiende a ser normal o uniforme, la línea de agua y la línea de energía son paralelas a la solera del canal así que  $I_e \rightarrow I_o$ , siendo la ecuación diferencial.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{I_o - I_e}{1 - Fr^2} = \frac{0}{1 - Fr^2} = 0$$





Es decir, la altura del agua no depende del punto (x).

Por lo tanto a partir del punto donde se alcanza tal valor no habrá variación del calado, o sea, la lámina de agua al aproximarse al flujo normal o uniforme ( $y_n$ ) tiende a él sin sobrepasarlo. O lo que es lo mismo y tiende asintoticamente a una línea horizontal.

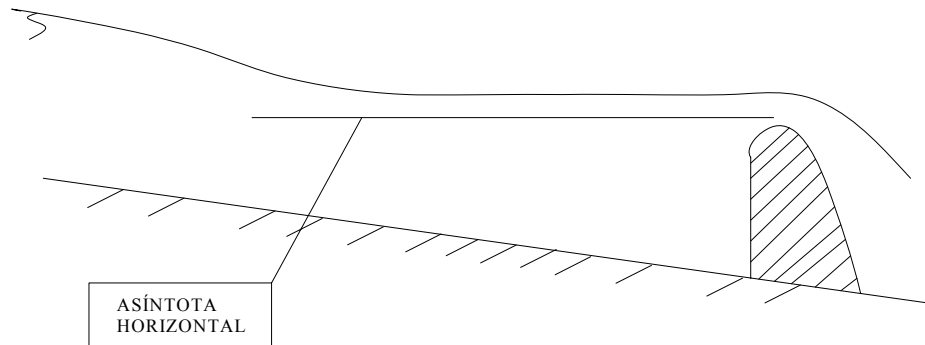


Figura 24.

3. Cuando  $y \rightarrow \infty$

$$\text{en este caso : } \left\{ \begin{array}{l} 1. Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y(\uparrow\uparrow)}} \approx 0 \\ 2. y(\uparrow\uparrow) \Rightarrow v(\downarrow\downarrow) \Rightarrow \Delta H(\downarrow\downarrow) \\ \Rightarrow \text{como } I_e = \frac{\Delta H}{\Delta x} \approx \frac{0}{\Delta x} = 0 \end{array} \right\} \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{I_o - 0}{1 - 0} = I_o$$

Así que la  $I_w = I_o$  es decir, en una zona de embalsamiento donde  $y(\uparrow\uparrow)$ , la superficie libre del agua, es una superficie libre horizontal

4. Cuando  $y \rightarrow$  solera del canal, nos encontramos en la situación del apartado 1.



### 3.4.4. Clasificación de los perfiles de la superficie libre.

Para ver la forma en que evoluciona aguas abajo la C.R. se tendrá que examinar el signo de la ecuación diferencial del F.G.V:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{I_o - I_e}{1 - Fr^2}$$

- Ya que si:
- $\partial y / \partial x = +$ , se tiene que los calados crecen aguas abajo.
  - $\partial y / \partial x = -$ , se tiene que los calados decrecen aguas abajo.

Para ello se debe ver las bases en las que se fundamenta el signo correspondiente al numerador ( $I_o - I_e$ ) y del denominador ( $1 - Fr^2$ ).

- El signo de ( $I_o - I_e$ ), está en función de la variación del calado  $y$ , con respecto del flujo uniforme o normal  $y_n$ .

| Comparación de calados | Comparación de pendientes | Signo de $I_o - I_e$ |
|------------------------|---------------------------|----------------------|
| $y > y_n$              | $I_e < I_o$               | +                    |
| $y < y_n$              | $I_e > I_o$               | -                    |

- El signo de ( $1 - Fr^2$ ), está en función de la variación del calado ( $y$ ) con respecto del calado crítico ( $y_c$ ), o lo que es lo mismo, está en función del régimen en el que se encuentre nuestro flujo, este dependerá de la pendiente que posea el canal suave (mild) o fuerte (strong).

| Comparación de calados | Régimen en el que se encuentra | Signo de $1 - Fr^2$ |
|------------------------|--------------------------------|---------------------|
| $y > y_c$              | $Fr < 1$ (R.sub.)              | +                   |
| $y < y_c$              | $Fr > 1$ (R.super.)            | -                   |

Además se debe considerar que el valor del calado crítico ( $y_c$ ) para un caudal ( $Q$ ) es función exclusiva de la geometría de la sección e independiente de la pendiente del canal.

Y el calado normal o uniforme ( $y_n$ ) por lo contrario varía fundamentalmente con dicha pendiente.



Así se agruparán los tipos de curvas de remanso según:

(a) La pendiente del canal, de acuerdo con la siguiente clasificación de pendientes. Conforme a esta, se dividen los tipos de curvas.

(b) La posición del calado ( $y$ ) con respecto al calado uniforme ( $y_n$ ) y con respecto al calado crítico ( $y_c$ ). Conforme a esta, se subdividen los tipos de curvas.

- Suave (Mild)  $\Rightarrow y_n > y_c ; I_0 < I_{ci} \Rightarrow$  En principio régimen lento.
- Fuerte (Strong)  $\Rightarrow y_n < y_c ; I_0 > I_{ci} \Rightarrow$  En principio régimen rápido.
- Crítico  $\Rightarrow y_n = y_c \Rightarrow$  En principio régimen crítico.
- Horizontal  $\Rightarrow I_0 = 0$  e  $y_n = \infty \Rightarrow$  En principio régimen lento.
- Adversa (Adverse)  $\Rightarrow I_0 < 0$  e  $y_n = \infty \Rightarrow$  En principio régimen lento.

Seguidamente se expone la figura 25 donde quedan reflejados los tipos de perfiles de la superficie libre del agua. Y seguidamente se muestran dos tablas con la deducción del signo que viene acompañada con una columna donde se muestran ejemplos de las distintas tipologías de curvas.

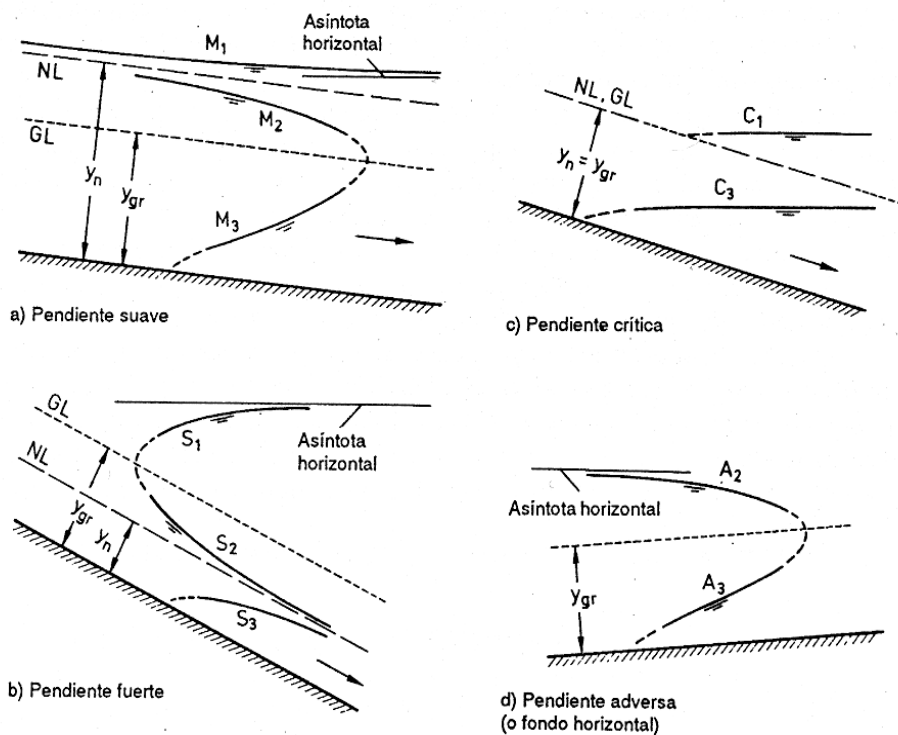


Figura 25. Tipos de perfiles de la superficie del agua para flujo estacionario gradualmente variado en un canal prismático.



| Pendiente del canal         | Designación |        |        | Relación de $y$ con $y_n$ y $y_c$ |        |        | Tipo general de curva       | Tipo de flujo    |
|-----------------------------|-------------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|-----------------------------|------------------|
|                             | Zona 1      | Zona 2 | Zona 3 | Zona 1                            | Zona 2 | Zona 3 |                             |                  |
| Horizontal<br>$S_0 = 0$     | Ninguno     |        |        | $y > y_n > y_c$                   |        |        | Ninguno                     | Ninguno          |
|                             |             | H2     |        | $y_n > y > y_c$                   |        |        | Caída                       | Subcrítico       |
|                             |             |        | H3     | $y_n > y_c > y$                   |        |        | Remanso                     | Supercrítico     |
| Suave<br>$0 < S_0 < S_c$    | M1          |        |        | $y > y_n > y_c$                   |        |        | Remanso                     | Subcrítico       |
|                             |             | M2     |        | $y_n > y > y_c$                   |        |        | Caída                       | Subcrítico       |
|                             |             |        | M3     | $y_n > y_c > y$                   |        |        | Remanso                     | Supercrítico     |
| Crítica<br>$S_0 = S_c > 0$  | C1          |        |        | $y > y_c = y_n$                   |        |        | Remanso                     | Subcrítico       |
|                             |             | C2     |        | $y_c = y = y_n$                   |        |        | Paralelo al fondo del canal | Uniforme-crítico |
|                             |             |        | C3     | $y_c = y_n > y$                   |        |        | Remanso                     | Supercrítico     |
| Empinada<br>$S_0 > S_c > 0$ | S1          |        |        | $y > y_c > y_n$                   |        |        | Remanso                     | Subcrítico       |
|                             |             | S2     |        | $y_c > y > y_n$                   |        |        | Caída                       | Supercrítico     |
|                             |             |        | S3     | $y_c > y_n > y$                   |        |        | Remanso                     | Supercrítico     |
| Adversa<br>$S_0 < 0$        | Ninguno     |        |        | $y > (y_n)^* > y_c$               |        |        | Ninguno                     | Ninguno          |
|                             |             | A2     |        | $(y_n)^* > y > y_c$               |        |        | Caída                       | Subcrítico       |
|                             |             |        | A3     | $(y_n)^* > y_c > y$               |        |        | Remanso                     | Supercrítico     |

$y^*$  en paréntesis se supone como un valor positivo.



Algunos ejemplos de estas curvas, están mostrados en la siguiente tabla.

| Pendiente del canal                     | Relaciones de profundidad | $\frac{dy}{dL}$ | Prof. en el sent. de la corriente | Símbolo | Tipo de flujo     | Forma del perfil |
|-----------------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|---------|-------------------|------------------|
| Suave<br>$0 < S < S_c$                  | $y' > y_N > y_c$          | +               | Aumenta                           | $M_1$   | Subcrítico        |                  |
|                                         | $y_N > y' > y_c$          | -               | Disminuye                         | $M_2$   | Subcrítico        |                  |
|                                         | $y_N > y_c > y'$          | +               | Aumenta                           | $M_3$   | Supercrítico      |                  |
| Horizontal<br>$S = 0$<br>$y_N = \infty$ | $y' > y_c$                | -               | Disminuye                         | $H_2$   | Subcrítico        |                  |
|                                         | $y_c > y'$                | +               | Aumenta                           | $H_3$   | Supercrítico      |                  |
| Crítica<br>$S_N = S_c$<br>$y_N = y_c$   | $y' > y_c = y_N$          | +               | Aumenta                           | $C_1$   | Subcrítico        |                  |
|                                         | $y_c = y' = y_N$          |                 | Constante                         | $C_2$   | Uniforme, crítico |                  |
|                                         | $y_c = y_N > y'$          | +               | Aumenta                           | $C_3$   | Supercrítico      |                  |
| Pronunciada<br>$S > S_c > 0$            | $y' > y_c > y_N$          | +               | Aumenta                           | $S_1$   | Subcrítico        |                  |
|                                         | $y_c > y' > y_N$          | -               | Disminuye                         | $S_2$   | Supercrítico      |                  |
|                                         | $y_c > y_N > y'$          | +               | Aumenta                           | $S_3$   | Supercrítico      |                  |
| Adversa<br>$S < 0$<br>$y_N = \infty$    | $y' > y_c$                | -               | Disminuye                         | $A_2$   | Subcrítico        |                  |
|                                         | $y_c > y'$                | +               | Aumenta                           | $A_3$   | Supercrítico      |                  |



### 3.5 Coeficiente de contracción bajo compuertas planas.

Según la formulación del cálculo de un caudal bajo compuertas planas (Naudascher páginas 107-112), se tiene que dicho caudal se halla con la expresión:

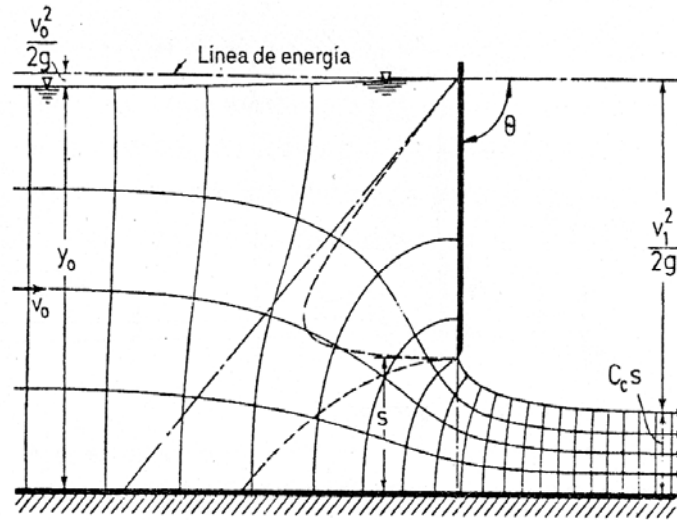


Figura 26. Flujo libre de salida bajo una compuerta plana.

Donde:

$$Q = C_c \cdot a \cdot b \cdot C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (1)$$

- $C_c$  = Coeficiente de contracción.
- $Q$  (m<sup>3</sup>/s) = Caudal
- $a$  (m) = Abertura de la compuerta.
- $b$  (m) = Ancho del canal.
- $\Delta H$  (m) = Pérdida de carga entre la sección 0 (aguas arriba de la compuerta) y la sección 1 (en el resalto no rechazado antes de sumergirse). Siendo su expresión:

$$\Delta H = H_0 - H_1$$

- $C$  = Coeficiente de velocidad. Este coeficiente de velocidad, es función de la velocidad contraída (velocidad que se da en la sección 1 anteriormente comentada) entre otros parámetros. La expresión de  $C$  es:

$$C = \frac{V_c}{\sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}} \quad (2)$$

Así que la expresión del coeficiente de contracción es:

$$C_c = \frac{Q}{a \cdot b \cdot C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}} \quad (3)$$



Nota: Debido a que la fórmulas de los coeficientes (2 y 3) proceden del mismo origen. Primero se tendrá que calcular  $C$  para insertarlo en la ecuación 3 y calcular  $C_c$ . Esto conllevará a que en el caso que no se pueda calcular  $C$  por distintos motivos ( por ejemplo no se tenga una pérdida de carga que tenga sentido real en la medición realizada) no se pueda obtener  $C_c$ .

El  $C_c$  teórico se halla con la siguiente gráfica.

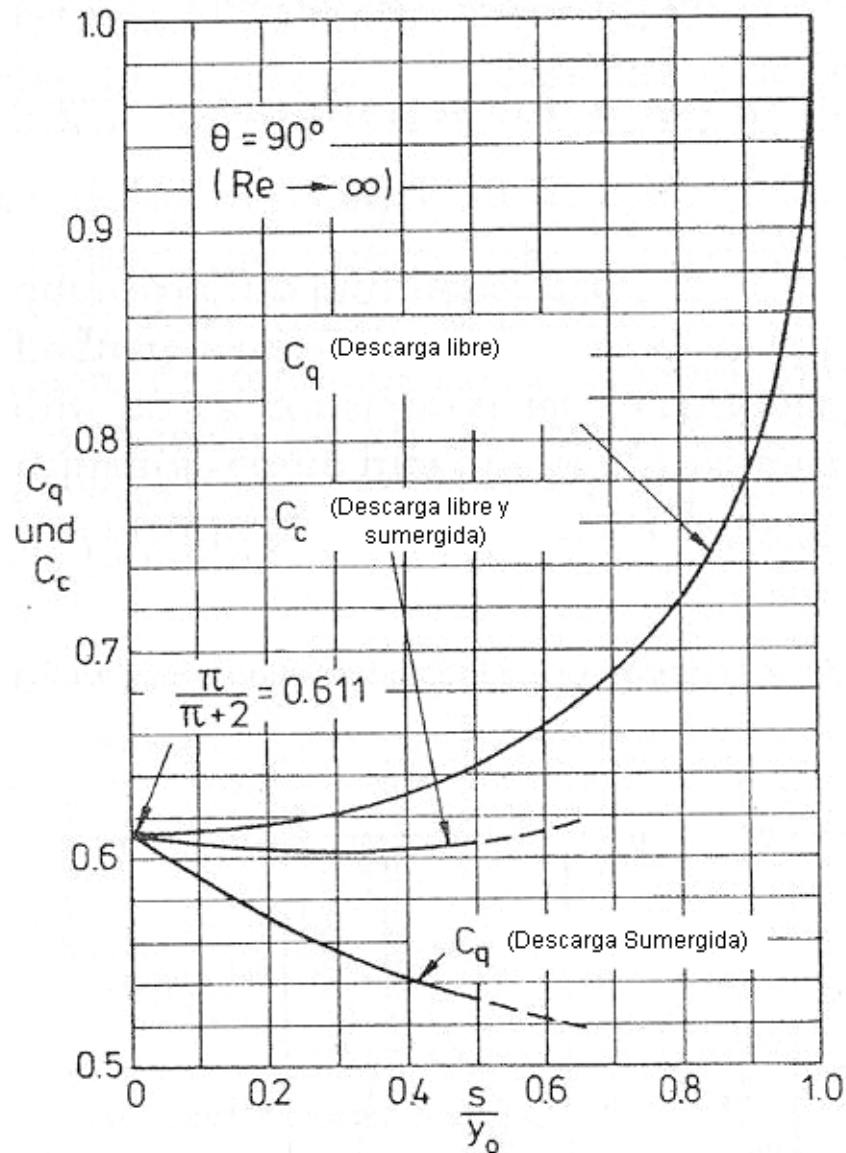


Figura 27. Coeficientes de descarga y de contracción para flujo bajo compuerta plana (condiciones ideales). Según Rouse, Engineering Hydraulics, 1950.



## 4. EQUIPO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.

### 4.1 Descripción de las campañas de medida.

#### 4.1.1 Bases.

El desarrollo teórico-práctico, del estudio del resalto hidráulico y las curvas de remanso que se van a formar, se hará en paralelo, con el fin de tener caracterizado el flujo del agua, en unas determinadas condiciones de contorno.

Primeramente se establecerán los tipos de campañas que se van a llevar a cabo, para ello se toma el resalto hidráulico como elemento diferenciador.

Así para cada caudal establecido y con una abertura de compuerta fijada, se obtiene un calado teórico aguas abajo  $y_2'$  (por Bélanger), para el cual se establece la condición de resalto  $M_1 = M_2$ . Este calado teórico  $y_2'$ , coincidirá o no, con el calado real aguas abajo  $y_2$  (se controlará manualmente, con la compuerta de aguas abajo del canal), originando los distintos tipos de resaltos que se presentan en la naturaleza, en función de las distintas condiciones de contorno a las que se vea sometido. Por ejemplo si  $y_2 = y_2'$ , se está en la condición de  $M_1 = M_2$ .

- Para resalto clásico y curvas de remanso:
  - Campaña A (S.R.):  $M_1 \gg M_2 \Rightarrow y_2' \ll y_2$
  - Campaña B (RCB):  $M_1 > M_2 \Rightarrow y_2' > y_2$
  - Campaña D (RCD):  $M_1 < M_2 \Rightarrow y_2' < y_2$

Nota: La primera campaña del resalto clásico (A) esta definida para una condición sin resalto. Esto es debido a que es imposible poner experimentalmente el  $y_2$  para una condición de resalto dadas. Ello es debido a la gran imprecisión que posee el canal para fijar un calado aguas abajo, lo que conlleva a que solo se pueda poner un calado mayor o menor que uno dado.

- Para resalto sumergido y curvas de remanso:
  - Campaña D (RSD):  $M_1 \ll M_2 \Rightarrow y_2' \ll y_2$

Estas campañas van a estar en función distintos tipos de caudales y pendientes superiores e inferiores a la pendiente crítica del canal. Esta pendiente crítica está en función de la geometría del canal y del caudal y como la geometría es constante, solo varía en función del caudal. Siendo las pendientes críticas las siguientes:





A) Para un caudal  $Q_{T1} = 12 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow$  se tiene un caudal  $Q_{\text{corregido1}} = 2.766 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\left. \begin{array}{l} Q_{c1} = 2.766 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} \\ b = \text{ancho canal} = 0,08 \text{ m} \\ n = 0,009 \text{ (vidrio)} \\ g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{array} \right\} \text{constantes} \left. \vphantom{\begin{array}{l} Q_{c1} \\ b \\ n \\ g \end{array}} \right\} q_{c1} = 3.458 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$y_{c12} = \sqrt[3]{\frac{q_{c1}^2}{g}} = 4.958 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 4.958 \text{ cm}$$

$$I_{ec12} = \frac{\frac{q_{c1}^2 \cdot n^2}{y_{c12}^2}}{\left( \frac{b \cdot y_{c12}}{2 \cdot y_{c12} + b} \right)^{\frac{4}{3}}} = 6,338 \cdot 10^{-3} \approx 7 \text{‰}$$

B) Para un caudal  $Q_{T2} = 8 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow$  se tiene un caudal  $Q_{c2} = 1.844 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\left. \begin{array}{l} Q_{c2} = 1.844 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} \\ b = \text{ancho canal} = 0.08 \text{ m} \end{array} \right\} q_{c2} = 2,305 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$y_{c8} = \sqrt[3]{\frac{q_{c2}^2}{g}} = 3.784 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 3.784 \text{ cm}$$

$$I_{ec8} = \frac{\frac{q_{c2}^2 \cdot n^2}{y_{c8}^2}}{\left( \frac{b \cdot y_{c8}}{2 \cdot y_{c8} + b} \right)^{\frac{4}{3}}} = 5.748 \cdot 10^{-3} \approx 5.7 \text{‰}$$



C) Para un caudal  $Q_{T3} = 4 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow$  se tiene un caudal  $Q_{c3} = 9.221 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\left. \begin{aligned} Q_{c3} &= 9.221 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \\ b &= \text{ancho canal} = 0.08 \text{ m} \end{aligned} \right\} q_{c3} = 1.153 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$y_{c4} = \sqrt[3]{\frac{q_{c1}^2}{g}} = 2.384 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 2.384 \text{ cm}$$

$$I_{ec4} = \frac{\frac{q_{c1}^2 \cdot n^2}{y_{c4}^2}}{\left( \frac{b \cdot y_{c4}}{2 \cdot y_{c4} + b} \right)^3} = 5.147 \cdot 10^{-3} \approx 5.1\%$$

#### 4.1.2 Tabla de campañas a realizar.

Las campañas se van a distribuir de la siguiente forma:

| Pendiente. | Curvas de remanso que se pueden dar. | Caudal ( $\text{m}^3/\text{h}$ )               | Campañas a realizar |
|------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------|
|            |                                      | 12, con $I_0 = 0$                              | A, B, C, D          |
| Horizontal | $H_2$ o $H_3$                        | 8, con $I_0 = 0$                               | A, B, C, D          |
|            |                                      | 4, con $I_0 = 0$                               | A, B, C, D          |
|            |                                      |                                                |                     |
|            |                                      | 12, con $I_0 < I_{ec12}$ ó $y_{n12} > y_{c12}$ | A, B, C, D          |
| Suave      | $M_1, M_2, M_3$                      | 8, con $I_0 < I_{ec8}$ ó $y_{n8} > y_{c8}$     | A, B, C, D          |
|            |                                      | 4, con $I_0 < I_{ec4}$ ó $y_{n4} > y_{c4}$     | A, B, C, D          |
|            |                                      |                                                |                     |
|            |                                      | 12, con $I_0 > I_{ec12}$ ó $y_{n12} < y_{c12}$ | A, B, C, D          |
| Fuerte     | $F_1, F_2, F_3$                      | 8, con $I_0 > I_{ec8}$ ó $y_{n8} < y_{c8}$     | A, B, C, D          |
|            |                                      | 4, con $I_0 > I_{ec4}$ ó $y_{n4} < y_{c4}$     | A, B, C, D          |



#### 4.1.3 Obtención de velocidades en las campañas.

Para la obtención de una velocidad dada en el canal, se recurre al uso de un tubo pitot. La base para la obtención de dicha velocidad, radica en que al poseer un orificio muy pequeño en su extremo, hace que en este la velocidad sea nula por lo que se transforma la carga de velocidad en una carga de presión.

Esto hace que la carga que se mide en piezómetro sea la suma del calado (por vasos comunicantes) y de la carga de presión ejercida por la velocidad.

Teniendo esto en cuenta y aplicando Bernoulli entre la sección diferencial más próxima al pitot (1) y la sección donde se encuentra dicho pitot (1'), se halla la velocidad:

$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_{1'} + h_{s1'} \quad (1)$$

Donde:

- $y_1 = h_1$ : Calado de agua en la sección 1.
- $hs1' = y_1 + h_{ve}$ : Carga leída en el piezómetro
- $h_{ve}$ : Es la carga de presión, debida a la velocidad.
- $z_1 = z_{1'}$  debido a que son dos secciones diferenciales, infinitamente próximas.

Despejando de la ecuación (1) se obtiene:

$$V = [2 \cdot g \cdot (h_{s1'} - h_1)]^{0.5} \quad (2)$$

En cada campaña realiza, se van a realizar dos mediciones de carga de velocidad. El objetivo de esto es poder hallar la velocidad media del agua por dos caminos diferentes, estos son:

- A partir de la velocidad máxima que se produce en el canal.  
Para ello se toma la carga máxima de velocidad, esta se produce aproximadamente a un 75% del calado desde la solera del canal. Con ella se halla la velocidad máxima, según la ecuación (2). Partiendo de esta velocidad, la velocidad media del canal se puede obtener como:

$$\bar{V}_i = \frac{2}{3} \cdot V_{\max i} \quad (3)$$

- Obteniendo la velocidad media directamente.  
En este caso la carga de presión, debida a la velocidad media, se encuentra a un 40% del calado desde la solera del canal. Teniéndose que utilizar directamente la ecuación (2) para conseguir la velocidad media.



## 4.2 Descripción de los parámetros a medir en cada campaña y tablas tipo que los agrupan.

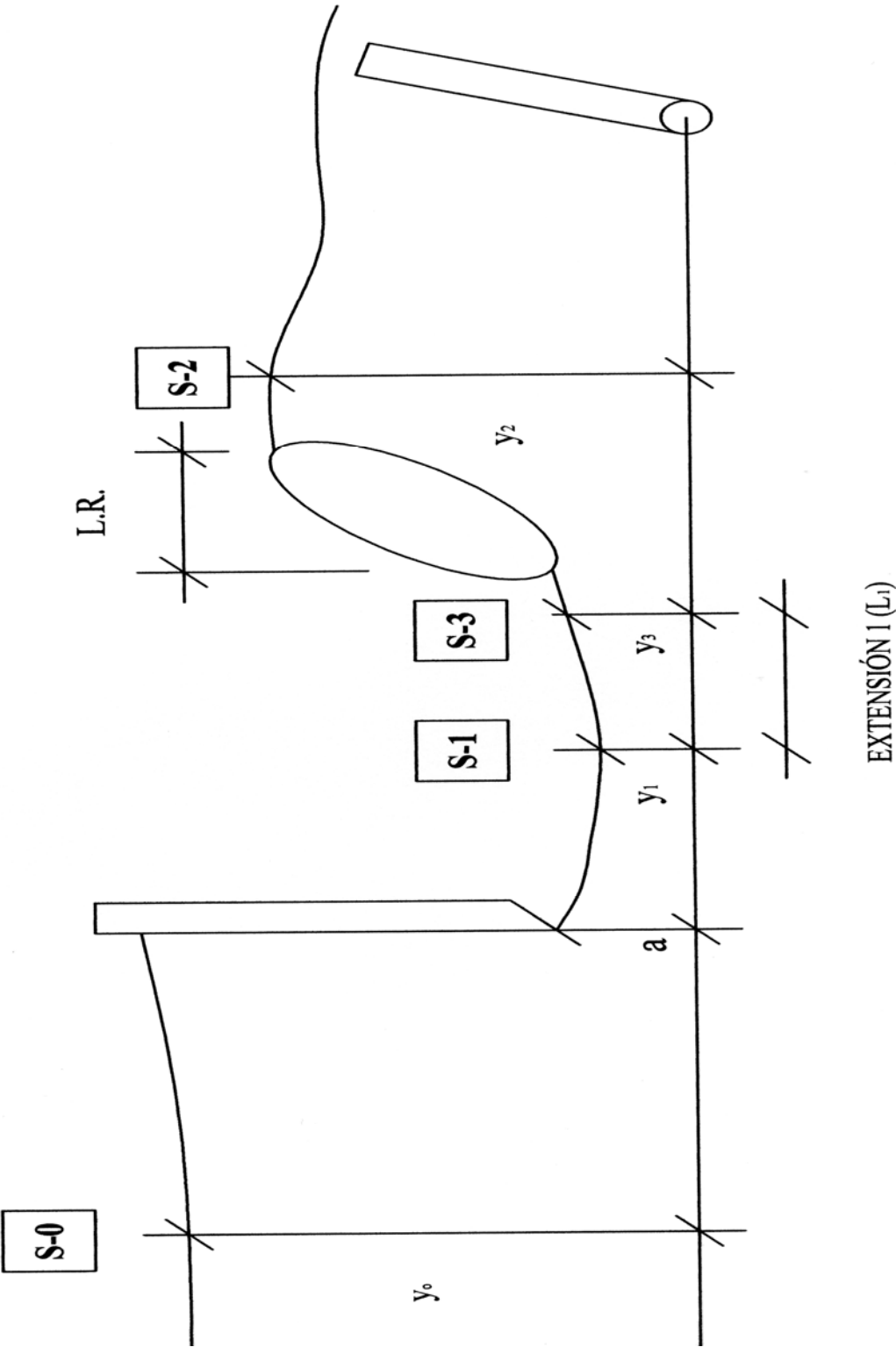
### 4.2.1 Para resalto clásico:

En primer lugar se va a representar una sección longitudinal del canal, exponiendo las secciones de estudio y los parámetros más significativos.

Donde:

- La longitud del resalto hidráulico, corresponderá a la distancia que existe entre el calado contraído y el final de los remolinos de turbulencias.
- Los criterios para escoger la secciones de estudio son:
  - Para la sección 0: Se tomará a un metro aguas arriba de la compuerta, con el fin de evitar los efectos de pared.
  - Para la sección 1: Se tomará en la sección correspondiente al calado contraído, existente después de la compuerta.
  - Para la sección 3: Se tomará en la sección correspondiente al comienzo del resalto hidráulico.
  - Para la sección 2: Se tomará en aquella sección, después del término del resalto hidráulico, en la cual no halla presencia de burbujas que puedan alterar el cebado del tubo pitot.
- Se entiende por extensión: La parte longitudinal abarcada entre dos secciones transversales, donde se desarrolla totalmente una curva de remanso.
  - A cada extensión le corresponde una longitud, por definición. Siendo las longitudes las siguientes:
    - Extensión 1  $\Rightarrow$  Longitud ( $L_1$ ), entre la sección 1 y la 3.

En la siguiente página se muestran gráficamente, todos estos parámetros.





## 4.2.1.1 Tablas prácticas del resalto clásico.

- A) Para una carga de velocidad, máxima, hallada a una profundidad de un 75% del calado.

| PRÁCTICO                               |                                                 |                |         |                |       |  |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|---------|----------------|-------|--|
| RESALTO CLÁSICO                        |                                                 |                |         |                |       |  |
| PENDIENTE, $I_o = I_{eq} \pm \Delta$   | CAUDAL ( $m^3/h$ )                              | CAMPAÑA        | INTENTO | Nº DE MEDICIÓN | FECHA |  |
| Siendo: $I_o =$                        |                                                 |                |         |                |       |  |
| HORIZONTAL, $I_o = 0$ ó $y_n = \alpha$ | 12 ( $I_{eq12} = 6,3\%$ ó $y_{c12} = 4,958$ cm) | A, S.R.        | 1º      |                |       |  |
| SUAVE, $I_o < I_{eq}$ ó $y_n > y_c$    | 8 ( $I_{eq8} = 5,7\%$ ó $y_{c8} = 3,784$ cm)    | B, $M_1 > M_2$ | 2º      |                |       |  |
| FUERTE, $I_o > I_{eq}$ ó $y_n < y_c$   | 4 ( $I_{eq4} = 5,1\%$ ó $y_{c4} = 2,384$ cm)    | C, $M_1 < M_2$ | 3º      |                |       |  |

|                    |     |            |
|--------------------|-----|------------|
| Abertura Compuerta | a = | Referencia |
|--------------------|-----|------------|

| SECCIÓN - 0            | SECCIÓN - 1                           | Fr <sub>1</sub> | SECCIÓN - 3                           | SECCIÓN - 2                           | L.R.        |
|------------------------|---------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| $y_o$                  | $h_1 = y_1$                           |                 | $h_3 = y_3$                           | $h_2 = y_2$                           |             |
|                        | PM=75% $y_1$                          |                 | PM=75% $y_3$                          | PM=75% $y_2$                          |             |
|                        | $h_{s1}$ (pitot)                      |                 | $h_{s3}$ (pitot)                      | $h_{s2}$ (pitot)                      |             |
|                        | $V_{1max} = [2g(h_{s1} - h_1)]^{0.5}$ |                 | $V_{3max} = [2g(h_{s3} - h_3)]^{0.5}$ | $V_{2max} = [2g(h_{s2} - h_2)]^{0.5}$ | COMENTARIOS |
|                        | $\bar{V}_1 = \frac{2}{3} V_{1max}$    |                 | $\bar{V}_2 = \frac{2}{3} V_{2max}$    | $\bar{V}_3 = \frac{2}{3} V_{3max}$    |             |
|                        | $\bar{V}_1^2/2g$                      |                 | $\bar{V}_2^2/2g$                      | $\bar{V}_3^2/2g$                      |             |
|                        | $H_1 = y_1 + \bar{V}_1^2/2g$          |                 | $H_3 = y_3 + \bar{V}_3^2/2g$          | $H_2 = y_2 + \bar{V}_2^2/2g$          |             |
| $\Delta H = H_o - H_i$ |                                       |                 |                                       |                                       |             |

Donde PM es la profundidad de medida de la velocidad, desde la solera del canal.



- B) Para una carga de velocidad, media, hallada a una profundidad de un 40% del calado.

PRÁCTICO

| RESALTO CLÁSICO                        |                                                 |                |         |                |       |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|---------|----------------|-------|
| PENDIENTE, $I_o = I_{ci} \pm \Delta$   | CAUDAL ( $m^3/h$ )                              | CAMPAÑA        | INTENTO | Nº DE MEDICIÓN | FECHA |
| Siendo: $I_o =$                        |                                                 |                |         |                |       |
| HORIZONTAL, $I_o = 0$ ó $y_n = \alpha$ | 12 ( $I_{ci12} = 6,3\%$ ó $y_{c12} = 4,958$ cm) | A, S.R.        | 1º      |                |       |
| SUAVE, $I_o < I_{ci}$ ó $y_n > y_c$    | 8 ( $I_{ci8} = 5,7\%$ ó $y_{c8} = 3,784$ cm)    | B, $M_1 > M_2$ | 2º      |                |       |
| FUERTE, $I_o > I_{ci}$ ó $y_n < y_c$   | 4 ( $I_{ci4} = 5,1\%$ ó $y_{c4} = 2,384$ cm)    | C, $M_1 < M_2$ | 3º      |                |       |

Referencia

Abertura Compuerta  $a =$

| SECCIÓN - 0            | SECCIÓN - 1                            | Fr <sub>1</sub> | SECCIÓN - 3                            | SECCIÓN - 2                            | L.R |
|------------------------|----------------------------------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----|
| $y_o$                  | $h_1 = y_1$                            |                 | $h_3 = y_3$                            | $h_2 = y_2$                            |     |
|                        | PM=40% $y_1$                           |                 | PM=40% $y_3$                           | PM=40% $y_2$                           |     |
|                        | $h_{s1}$ (pitot)                       |                 | $h_{s3}$ (pitot)                       | $h_{s2}$ (pitot)                       |     |
|                        | $\bar{V}_1 = [2g(h_{s1} - h_1)]^{0.5}$ |                 | $\bar{V}_3 = [2g(h_{s3} - h_3)]^{0.5}$ | $\bar{V}_2 = [2g(h_{s2} - h_2)]^{0.5}$ |     |
|                        | $\bar{V}_1^2/2g$                       |                 | $\bar{V}_3^2/2g$                       | $\bar{V}_2^2/2g$                       |     |
|                        | $H_1 = y_1 + \bar{V}_1^2/2g$           |                 | $H_3 = y_3 + \bar{V}_3^2/2g$           | $H_2 = y_2 + \bar{V}_2^2/2g$           |     |
| $\Delta H = H_o - H_i$ |                                        |                 |                                        |                                        |     |

Donde PM es la profundidad de medida de la velocidad, desde la solera del canal.



#### 4.2.2 Resalto sumergido.

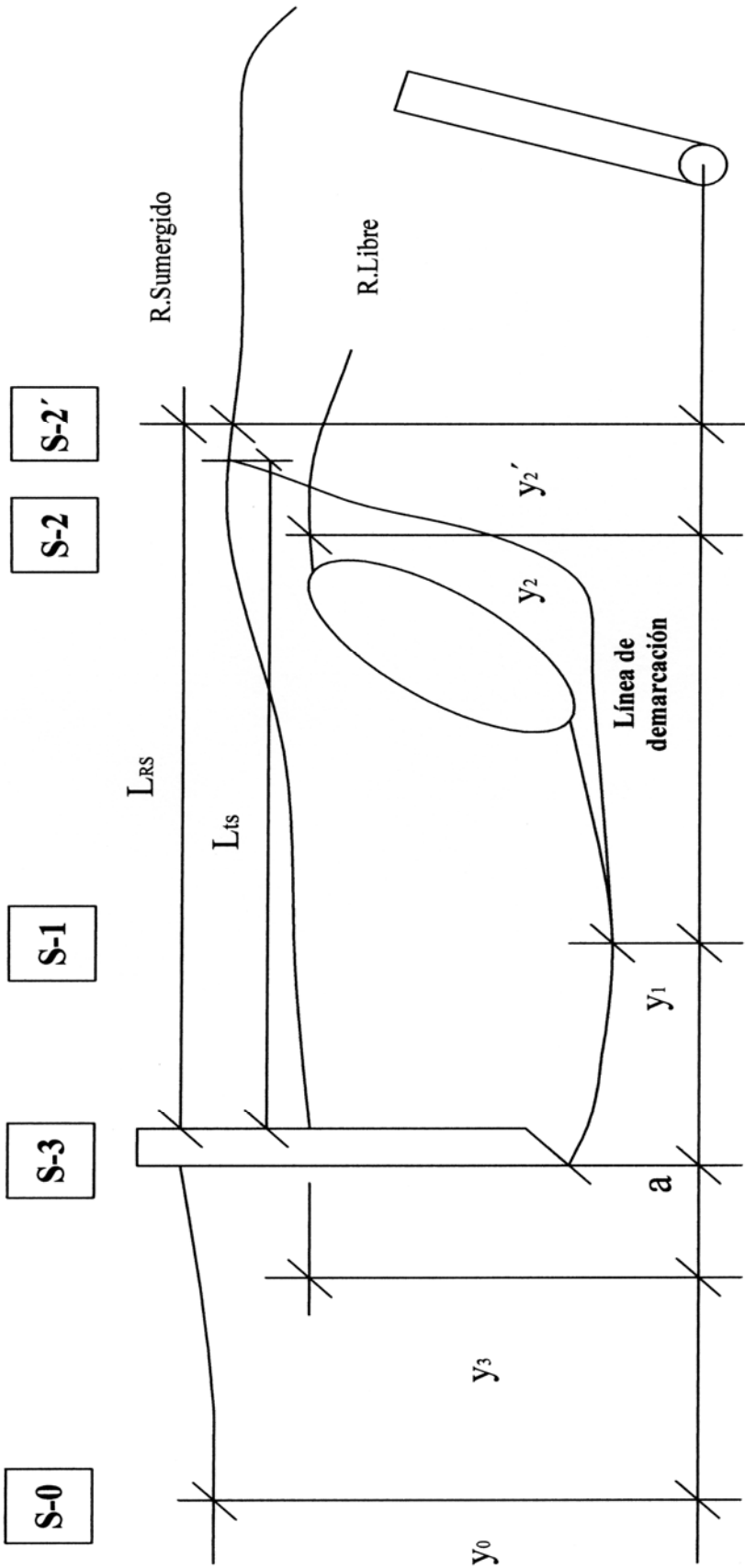
En el resalto sumergido, la sección longitudinal del canal, representando las secciones de estudio y los parámetros más significativos.

Donde:

- Criterios para escoger las secciones de estudio:
  - Las secciones 1 y 2 son las correspondientes al resalto clásico, en este caso se tendrá que identificar, para ello se utilizarán trazadores. Pero en el caso de la sección 2, se tomará en el punto donde se termina el remolino de turbulencias.
  - La sección 2': Se tomará un poco después del remolino de turbulencias, en el punto donde se estabilice ligeramente la superficie libre.
- La longitud del resalto sumergido corresponderá a la distancia que existe entre la compuerta y la sección 2'.

En la siguiente página se muestran gráficamente, todos estos parámetros.







## 4.2.2.1 Tablas teórico-prácticas del resalto sumergido.

A) Para una carga de velocidad, máxima, hallada a una profundidad de un 75% del calado.

## PRÁCTICO

| RESALTO SUMERGIDO                      |  |                                                |  |                  |  |         |  |                |
|----------------------------------------|--|------------------------------------------------|--|------------------|--|---------|--|----------------|
| PENDIENTE, $I_o = I_{c\pm} \pm \Delta$ |  | CAUDAL (m <sup>3</sup> /h)                     |  | CAMPAÑA          |  | INTENTO |  | Nº DE MEDICIÓN |
| Siendo: $I_o =$                        |  |                                                |  |                  |  |         |  |                |
| HORIZONTAL, $I_o = 0$ ó $y_n = \infty$ |  | 12 ( $I_{c12} = 6,3\%$ ó $y_{c12} = 4,958$ cm) |  | D, $M_1 \ll M_2$ |  | 1º      |  |                |
| SUAVE, $I_o < I_{c1}$ ó $y_n > y_c$    |  | 8 ( $I_{c8} = 5,7\%$ ó $y_{c8} = 3,784$ cm)    |  |                  |  | 2º      |  |                |
| FUERTE, $I_o > I_{c1}$ ó $y_n < y_c$   |  | 4 ( $I_{c4} = 5,1\%$ ó $y_{c4} = 2,384$ cm)    |  |                  |  | 3º      |  |                |

| Compuerta<br>aguas arriba | SECCIÓN - 1                                                                |  | SECCIÓN - 2'                                                                |  | L.R         |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------|--|-------------|
| y <sub>3</sub>            | h <sub>1</sub> = y <sub>1</sub>                                            |  | h <sub>2</sub> = y <sub>2</sub>                                             |  | COMENTARIOS |
|                           | PM=75% y <sub>1</sub>                                                      |  | PM=75% y <sub>2</sub>                                                       |  |             |
|                           | h <sub>s1</sub> (pitot)                                                    |  | h <sub>s2</sub> (pitot)                                                     |  |             |
|                           | V <sub>1max</sub> =[2g (h <sub>s1</sub> - h <sub>1</sub> )] <sup>0.5</sup> |  | V <sub>2max</sub> = [2g (h <sub>s2</sub> - h <sub>2</sub> )] <sup>0.5</sup> |  |             |
|                           | $\bar{V}_1 = \frac{2}{3} V_{1max}$                                         |  | $\bar{V}_2 = \frac{2}{3} V_{2max}$                                          |  |             |
| $\Delta H = H_o - H_i$    | $\bar{V}_1^2/2g$                                                           |  | $\bar{V}_2^2/2g$                                                            |  |             |
|                           | H <sub>1</sub> = y <sub>1</sub> + $\bar{V}_1^2/2g$                         |  | H <sub>2</sub> = y <sub>2</sub> + $\bar{V}_2^2/2g$                          |  |             |



- B) Para una carga de velocidad, media, hallada a una profundidad de un 40% del calado.

## PRÁCTICO

| RESALTO SUMERGIDO                      |                                                |                  |         |                |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|---------|----------------|
| PENDIENTE, $I_0 = I_{ci} \pm \Delta$   | CAUDAL ( $m^3/h$ )                             | CAMPAÑA          | INTENTO | Nº DE MEDICIÓN |
| Siendo: $I_0 =$                        |                                                |                  |         |                |
| HORIZONTAL, $I_0 = 0$ ó $y_a = \alpha$ | 12 ( $I_{e12} = 6,3\%$ ó $y_{c12} = 4,958$ cm) |                  | 1º      |                |
| SUAVE, $I_0 < I_{ci}$ ó $y_a > y_c$    | 8 ( $I_{e8} = 5,7\%$ ó $y_{c8} = 3,784$ cm)    | D, $M_1 \ll M_2$ | 2º      |                |
| FUERTE, $I_0 > I_{ci}$ ó $y_a < y_c$   | 4 ( $I_{e4} = 5,1\%$ ó $y_{c4} = 2,384$ cm)    |                  | 3º      |                |

| Compuerta<br>aguas arriba | SECCIÓN - 1                            |                                        | SECCIÓN - 2' |  | L.R         |
|---------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------|--|-------------|
|                           | $h_1 = y_1$                            | $h_2 = y_2$                            |              |  |             |
| $y_3$                     | $PM = 40\% y_1$                        | $PM = 40\% y_2$                        |              |  | COMENTARIOS |
|                           | $h_{a1}$ (pitot)                       | $h_{a2}$ (pitot)                       |              |  |             |
|                           | $\bar{V}_1 = [2g(h_{a1} - h_1)]^{0.5}$ | $\bar{V}_2 = [2g(h_{a2} - h_2)]^{0.5}$ |              |  |             |
|                           | $\bar{V}_1^2/2g$                       | $\bar{V}_2^2/2g$                       |              |  |             |
| $\Delta H = H_0 - H_i$    | $H_1 = y_1 + \bar{V}_1^2/2g$           | $H_2 = y_2 + \bar{V}_2^2/2g$           |              |  |             |

| SECCIÓN - 0 |  |
|-------------|--|
| $y_0$       |  |
|             |  |
|             |  |
|             |  |



## 5 ANÁLISIS DE DATOS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.

### 5.0 Introducción.

Para el desarrollo experimental se necesitan definir tres variables:

1ª Abertura de la compuerta:

En la realización de las mediciones experimentales se han tomado como aberturas de compuerta las siguientes medidas:

| $Q_{teo}$ (m <sup>3</sup> /h) | Abertura (mm) |
|-------------------------------|---------------|
| 12                            | 51            |
| 8                             | 41.3          |
| 4                             | 25            |

Nota: Estas medidas se han fijado por ser las aberturas óptimas para dar una carga de velocidad suficiente, unido con un buen funcionamiento del canal (no se desborde el agua).

2º Coeficiente de Manning:

El coeficiente de Manning utilizado es el desarrollo del trabajo experimental es el correspondiente para el vidrio (ver tabla 5.6 Ven Te Chow), de valor 0.009. Este coeficiente corresponde a la columna del mínimo. El fundamento para escoger el mínimo, ha sido la perfecta conservación de las paredes del canal.

A continuación se expone dicha tabla:

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad  $n$   
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

| Tipo de canal y descripción                          | Mínimo       | Normal       | Máximo |
|------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------|
| A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos |              |              |        |
| A-1. Metal                                           |              |              |        |
| a. Latón, liso                                       | 0.009        | <b>0.010</b> | 0.013  |
| b. Acero                                             |              |              |        |
| 1. Estriado y soldado                                | 0.010        | 0.012        | 0.014  |
| 2. Riveteado y en espiral                            | 0.013        | 0.016        | 0.017  |
| c. Hierro fundido                                    |              |              |        |
| 1. Recubierto                                        | 0.010        | 0.013        | 0.014  |
| 2. No recubierto                                     | 0.011        | 0.014        | 0.016  |
| d. Hierro forjado                                    |              |              |        |
| 1. Negro                                             | 0.012        | 0.014        | 0.015  |
| 2. Galvanizado                                       | 0.013        | 0.016        | 0.017  |
| e. Metal corrugado                                   |              |              |        |
| 1. Subdrenaje                                        | 0.017        | 0.019        | 0.021  |
| 2. Drenaje de aguas lluvias                          | 0.021        | <b>0.024</b> | 0.030  |
| A-2. No metal                                        |              |              |        |
| a. Lucita                                            | 0.008        | 0.009        | 0.010  |
| b. Vidrio                                            | <b>0.009</b> | <b>0.010</b> | 0.013  |
| c. Cemento                                           |              |              |        |
| 1. Superficie pulida                                 | 0.010        | 0.011        | 0.013  |
| 2. Mortero                                           | 0.011        | 0.013        | 0.015  |

Figura 28. Coeficientes de Manning (Ven Te Chow).

3º Nivel de referencia del tubo pitot:

Se entiende por nivel de referencia del tubo pitot como la carga de agua geométrica que debe estar por encima del eje central de dicho tubo, hasta la superficie libre, a la hora de cebar el pitot.

Tras muchas mediciones previas se ha estimado que el tubo pitot funciona mejor con niveles de referencia pequeños. El nivel fijado como óptimo tiene un valor de 0.020 m.



### 5.1 Correcciones:

Las correcciones que se han tenido que desarrollar a la hora de hacer el análisis de los datos han sido de dos tipos:

#### 5.1.1 Corrección de caudal.

Esta corrección se ha realizado debido a que el caudalímetro que posee el canal no proporciona una lectura correcta del caudal que circula, aunque no se aleja demasiado. Con el fin que ajustar lo más posible la medida del caudal se ha obtenido el calado crítico en el canal bajo unas condiciones. Con este parámetro se obtiene el caudal específico teórico que debería tenerse para estar en dichas condiciones.

Los pasos seguidos en la obtención del caudal teórico son:

- 1º. Se impone en el canal una pendiente lo más horizontal posible, con esta se garantiza:
  - a. Que  $S = 0$  e  $y_n = \infty$
- 2º. No se dispone ningún elemento a lo largo del canal, lo que conlleva a que no se va sufrir ninguna perturbación en él.
- 3º. Con estas dos condiciones el calado del canal va a circular en régimen de mínima energía, es decir, en régimen crítico. Por lo tanto el calado obtenido es el calado crítico.
- 4º. Con la formulación de calado crítico se obtiene el calado específico que debe circular para esta condición:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot B^2}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \Rightarrow q_{teo} = \sqrt{g} \cdot y_c^{\frac{3}{2}}$$

Una vez obtenido el caudal teórico, se compara con el que da el caudalímetro y se saca un factor de corrección para caudales leídos en el caudalímetro.

La obtención de dicho caudal, se muestra en la siguiente tabla:

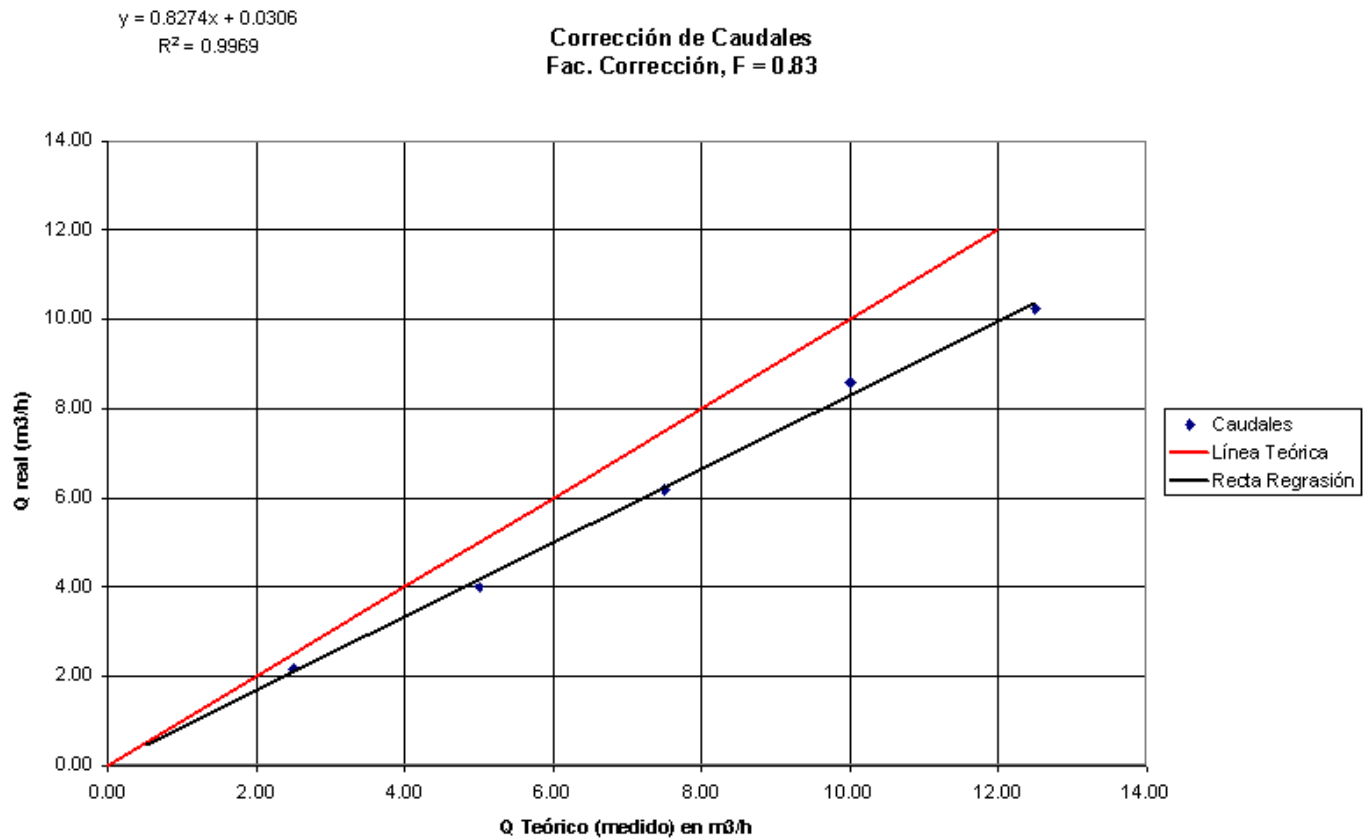
| $Q_{medido}(m^3/h)$ | $Y_c(m)$ | $q=\text{raiz}(9,81)*Y_c^{(3/2)};(m^2/s)$ | $Q=q*0,08(m^3/s)$ | $Q_{real}(m^3/h)$ |
|---------------------|----------|-------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 12.50               | 0.05048  | 0.035523                                  | 0.002842          | 10.230716         |
| 10.00               | 0.04490  | 0.029799                                  | 0.002384          | 8.582158          |
| 7.50                | 0.03610  | 0.021483                                  | 0.001719          | 6.187109          |
| 5.00                | 0.02700  | 0.013896                                  | 0.001112          | 4.001959          |
| 2.50                | 0.01800  | 0.007564                                  | 0.000605          | 2.178391          |

| $Q_{real}/Q_{medido}$ |
|-----------------------|
| 0.818457              |
| 0.858216              |
| 0.824948              |
| 0.800392              |
| 0.871356              |

|                           |      |
|---------------------------|------|
| Fac. corrección = Media = | 0.83 |
|---------------------------|------|



Además graficando  $Q_{\text{medido}}$  frente a  $Q_{\text{real}}$  también se puede hallar que el factor de corrección, como se muestra en la siguiente figura:



En definitiva, los caudales reales con los que se van a trabajar son:

$$Q_{\text{real}} = F \cdot Q_{\text{medido}}$$

Donde:  $F$  = factor de corrección e igual a 0.83

Como se dijo anteriormente se van a trabajar con caudales ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) medidos de 12, 8 y 4. La elección de estos caudales, ha sido debida a que el caudal máximo medido es de 12.5 por lo que se optó de coger el más próximo medido y a partir de este sacar otros dos con una notable diferencia.

La finalidad de esto es que en dichos parámetros se noten los distintos valores de caudales tomados.

En definitiva los caudales reales con los que se va a trabajar son:

| $Q_{\text{medido}}(\text{m}^3/\text{h})$ | $Q_{\text{medido}}(\text{m}^3/\text{s})$ | $Q_{\text{real}}(\text{m}^3/\text{s})$ |
|------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 12                                       | 0.003333                                 | 0.0027667                              |
| 8                                        | 0.002222                                 | 0.0018444                              |
| 4                                        | 0.001111                                 | 0.0009222                              |

Nota:



En lo sucesivo para referirse a los caudales se hará de la forma;  $Q_{12}$ ,  $Q_8$  y  $Q_4$ , por causas de simplificación, aunque hay que tener en cuenta que para los cálculos se han utilizado los corregidos.

### 5.1.2 Corrección de pendiente.

#### 5.1.2.1 Introducción.

Esta corrección es debida a que en el canal se ha deformado por causa de unas sollicitaciones flectoras, ocasionadas por las sobre fuerzas que actúan en los depósitos aguas arriba y abajo del canal. A raíz de ello se ha creado una deformada permanente.

El objetivo de este apartado es encontrar el valor de dicha pendiente inicial que es debido a la deformada.

La finalidad que se persigue, con su obtención, es poder hallar el incremento de calado en una sección dada, debido a la pendiente inicial. Dicho incremento tiene que ser sumado a todos los cálculos teóricos de los calados realizados para las distintas campañas.

Esto es así porque los calados teóricos se obtuvieron con las pendientes que en un principio se pensaban que eran las correctas (no existía deformación inicial). Por ello para no volver a repetir todas estas operaciones se optó por la solución ya mencionada. Así que el calado teórico corregido, será:

$$y_{i_{tc}} = y_i + \Delta y$$

Donde:  $y_{i_{tc}}$  = Calado teórico corregido.

$y_i$  = Calado teórico inicial.

$\Delta y$  = Incremento de calado debido a la pendiente inicial.



### 5.1.2.2 Cálculo de la pendiente inicial.

#### A) En pendiente fuerte. (Primer Bloque)

Para la obtención de dicha pendiente se han tomado las cotas (desde superficie de apoyo del canal) del punto medio y extremo del canal, en las condiciones de llenado extremo. Los valores que se han obtenido y su previo análisis se encuentran reflejados en la siguiente tabla:

|                                           | Centro | Extremo   | Diferencia | Aproximación |
|-------------------------------------------|--------|-----------|------------|--------------|
| Cotas (cm)                                | 115.3  | 113.7     | 1.6        | 2            |
|                                           |        | en metros | 0.016      | 0.02         |
| Longitud entre secciones (m)              | 2.46   |           |            |              |
| Pendiente (‰)                             |        |           | 6.5        | 8.1          |
| Pendiente inicial escogida por exceso (‰) |        |           | 8          |              |

Nota: Debido a que el error cometido en valores teóricos es elevado se aproxima por exceso el valor de diferencia de cotas a 0.02, con el objetivo de que se reduzca lo más posible dicho error.

Nota: La pendiente inicial de un 8‰ es constante a lo largo de todo el canal, ya que, es una pendiente media.

Como ya se ha comentado esta pendiente de 8‰ hay que sumársela a las pendientes inicialmente consideradas. Por esta razón las pendientes reales de las distintas campañas han sido:

|                                           |   |                                                   |
|-------------------------------------------|---|---------------------------------------------------|
| Horizontal<br>( $I_0 = 0$ )               | → | Horizontal + 8‰<br>( $I_0 = 8‰$ )                 |
| Suave<br>( $I_0 = I_{e_{ci}} - \Delta$ )  | → | Suave + 8‰<br>$I_0 = (I_{e_{ci}} - \Delta) + 8‰$  |
| Fuerte<br>( $I_0 = I_{e_{ci}} + \Delta$ ) | → | Fuerte + 8‰<br>$I_0 = (I_{e_{ci}} + \Delta) + 8‰$ |

Donde:  $I_{e_{ci}}$  = Pendiente crítica para un caudal dado.  
 $\Delta$  = Incremento de pendiente, para estar en una situación de pendiente suave (-) o pendiente fuerte (+)  
 $I_0$  = Pendiente de la solera del canal.

El incremento de pendiente, para estar “supuestamente” en situación de pendiente suave o fuerte para los distintos calados, tienen un valor de:

|              | $Q_{12}$ | $Q_8$ | $Q_4$ |
|--------------|----------|-------|-------|
| $\Delta$ (‰) | 3        | 3     | 3     |





Nota: Se ha tomado el valor de un 3 ‰ porque a la misma vez es un valor alto para poder diferenciar suave de fuerte y deja un valor pendiente de 2.1 ‰ para la pendiente más pequeña.

Debido a que la pendiente inicial es de un 8 ‰, y esta supera a todos los valores de las pendientes críticas de los distintos caudales ( $I_{e_{12}} = 6.3 \text{ ‰}$ ,  $I_{e_8} = 5.7 \text{ ‰}$  e  $I_{e_4} = 5.1 \text{ ‰}$ ) se tiene que desde un principio se está trabajando con pendiente fuerte. Y por lo tanto se varía dentro de una pendiente fuerte. Esto ha ocasionado dos efectos:

- Con respecto a la notación a seguir: En las campañas realizadas supuestamente en condiciones de pendiente horizontal, suave y fuerte, se sigan denominando de la misma forma pero añadiéndole un, + 8 ‰, después de horizontal, suave y fuerte.
- Con respecto a las campañas realizadas:
  - El primer bloque de campañas esté en condiciones de pendiente fuerte, como ya se ha comentado con anterioridad.
  - Que se realice un segundo bloque de campañas, para obtener alguna medida en condición de pendiente suave.
    - Este segundo bloque va a estar compuesto por una sola campaña, siendo esta en condiciones de pendiente “lo más horizontal posible” para el  $Q_{12}$ .

Nota: Debido a la aparición de este nuevo bloque, se ha tomado la decisión, de hacer un análisis en paralelo de toda la información en los apartados que se van a realizar.

Por lo tanto la metodología a la hora de tratar la información, será:

- i. Primero: Se analiza la información correspondiente a la pendiente fuerte (es la de mayor envergadura).
- ii. Segundo: Al final de cada apartado y de forma paralela, habrá un punto que analice la pendiente suave para compararla con los datos de la pendiente fuerte.

#### B) Pendiente suave (Segundo Bloque)

Cálculo de la pendiente inicial para el segundo bloque.

|                                            |        |           |            |
|--------------------------------------------|--------|-----------|------------|
|                                            | Centro | Extremo   | Diferencia |
| Cotas (cm)                                 | 115.75 | 114.7     | 1.05       |
|                                            |        | en metros | 0.0105     |
| Longitud entre secciones (m)               | 2.46   |           |            |
| Pendiente (‰)                              |        |           | 4.3        |
| Pendiente inicial escogida por defecto (‰) |        |           | 4          |

Nota: Como se puede observar la pendiente inicial en este caso es menor que la crítica, para un  $Q_{12}$  (6.3 ‰). Por lo tanto ya se estará en condiciones de pendiente suave.



Con respecto a la notación, al igual que en el apartado anterior se le añadirá ahora un + 4‰ para identificar esta condición de contorno.

### 5.1.2.3 Cálculo del incremento de calado debido a la pendiente inicial.

#### A) En condiciones de pendiente fuerte (+ 8 ‰) :

##### a. Resalto no rechazado:

- i. En la sección 2: Si la distancia del centro a la compuerta es de 0.58 m. Y entre la compuerta y la sección 2 de medida distan aproximadamente para todas las compañías unos 0.7m, para una pendiente de un 8 ‰. Se obtiene un valor de:

$$\Delta y = (0.58 + 0.7) \cdot 0.008 = 0.01024 \approx 0.010 \text{ m}$$

##### b. Resalto rechazado:

- i. En la sección 3: La distancia del centro a la compuerta es de 0.58 m. Y entre la compuerta y la sección 2 de medida distan aproximadamente para todas las compañías unos 0.48m, para una pendiente de un 8 ‰. Se obtiene un valor de:

$$\Delta y = (0.58 + 0.48) \cdot 0.008 = 0.00848 \approx 0.0085 \text{ m}$$

- ii. En la sección 2': Las distancias parciales entre el centro, la compuerta, la curva de remanso, la longitud del remanso y la sección 2 de medida, son respectivamente, en metros; 0.58, 0.9, 0.3 y 0.15. Por lo que el incremento es:

$$\Delta y = (0.58 + 0.9 + 0.3 + 0.15) \cdot 0.008 = 0.01544 \approx 0.015 \text{ m}$$

Nota: En la sección 1 tanto del resalto rechazado como el no rechazado el valor de la variación del calado se basa en otra condición. En esta al contrario que las anteriores, se restará dicho valor al tomado experimentalmente.

Condición para la sección 1: Los valores de la sección 1 no son los estrictamente referidos al calado contraído. Esto ha sido ocasionado porque a la hora de tomar los calados, el limnómetro, se posee un tope que limita la aproximación a la compuerta, lugar donde se encuentra generalmente el calado contraído.

Por esta razón unida a que los valores experimentales son bastante buenos, se ha tomado el criterio de reducir el calado medido experimental en un 10%.

##### c. Resalto sumergido

- i. Resalto no rechazado asociado al sumergido: Es el propio resalto no rechazado por lo que posee sus mismas correcciones.
- ii. Sección 3 del R. sumergido: Como esta sección está situada en la compuerta, su distancia al centro es 0.58m, por lo que la corrección es:

$$\Delta y = (0.58) \cdot 0.008 = 0.00464 \approx 0.0046 \text{ m}$$



B) En condiciones de pendiente suave(+ 4 ‰):

Para esta condición solo varía la pendiente, los demás parámetros permanecen constantes, así:

a. Resalto no rechazado:

i. En la sección 2:

$$\Delta y = (0.58 + 0.7) \cdot 0.004 = 0.00512 \approx 0.0051 \text{ m}$$

b. Resalto rechazado:

i. En la sección 3:

$$\Delta y = (0.58 + 0.48) \cdot 0.004 = 0.00424 \approx 0.0042 \text{ m}$$

ii. En la sección 2':

$$\Delta y = (0.58 + 0.9 + 0.3 + 0.15) \cdot 0.004 = 0.00772 \approx 0.0077 \text{ m}$$

Nota: En la sección 1 se reduce el calado medido experimental en un 10%.

c. Resalto sumergido

i. Sección 3 del R. sumergido

$$\Delta y = (0.58) \cdot 0.004 = 0.00232 \approx 0.0023 \text{ m}$$

#### 5.1.2.4 Tipos de curvas de remanso desarrolladas.

El hecho de que el canal posea una deformación permanente ha influenciado en los distintos tipos de curvas que se deberían haber formado. Por esta razón solo se ha desarrollado un tipo de curva en cada bloque (pendiente fuerte y pendiente suave).

A) Curva en pendiente fuerte(+ 8 ‰):

- Como  $I_{\text{canal}} (I_o)$  es mayor que la pendiente crítica para todos los calados  $Ie_i$ , se está en pendiente fuerte (Strong).
- Como el calado es menor que el calado normal ( $y_n$ ) y que el calado crítico ( $y_c$ ), es decir, posee un flujo supercrítico (zona 3). Por lo que se tiene un Froude  $> 1$ .
- Con estos dos parámetros se deduce que  $\partial y / \partial x = +$ , es decir, la curva es ascendente.
- El símbolo de la curva es S3.

B) Curva en pendiente suave (+ 4 ‰):

- Como  $I_{\text{canal}} (I_o)$  es menor que la pendiente crítica para todos los calados  $Ie_i$ , se está en pendiente suave (Mild).
- Al igual que antes si el calado es menor que el calado normal ( $y_n$ ) y que el calado crítico ( $y_c$ ), se posee un flujo supercrítico (zona 3). Siendo el Froude  $> 1$ .
- Con estos dos parámetros se deduce que  $\partial y / \partial x = +$ , es decir, la curva es ascendente.
- El símbolo de la curva es M3.



### 5.1.2.5. Explicación de las tablas correctoras.

En el análisis de los datos que se ha llevado a cabo se han realizado unas tablas para corregir los calados anteriormente expuestos. Además se hace una comparación entre distintos calados para ver cómo evoluciona el error al ir aportando variables corregidas.

Existen tres tipos de tablas correctoras, en función del resalto que haya. La explicación a las distintas tablas es la siguiente:

#### A) Para resalto no rechazado:

Está compuesta por tres partes donde se expone lo siguiente:

- En la primera parte con el  $y_1$  medido se halla el correspondiente  $y_2$  mediante la ecuación de Bèlanguer ( $y_2$  calculado), y este se compara con:
  - i. El  $y_2$  medido.
  - ii. El  $y_2$  teórico, hallado a partir del  $y_1$  teórico ( $C_c \cdot a$ ), mediante Bèlanguer.
  - iii. El  $y_2$  teórico corregido, siendo este el  $y_2$  teórico más el incremento de calado debido a la pendiente inicial.
- En la segunda parte se halla el  $y_2$  a partir de Bèlanguer con el  $y_1$  medido corregido (-10%). A este se lo denomina calculado corregido.
- En la tercera parte se compara el  $y_2$  teórico corregido con el calculado corregido.

Nota: Para  $V_{max}$  y  $V_{med}$  los calados teóricos son los mismos, ya que no dependen de la velocidad práctica que se obtenga.

#### B) Para resalto rechazado:

En esta tabla la complejidad aumenta, ya que, el calado teórico depende de la velocidad práctica que se obtenga. Y como se tienen dos velocidades distintas una para  $V_{max}$  y otra para  $V_{min}$ , pues existen dos calados teóricos en la sección 2.

Este está compuesto por dos partes principales:

- En la primera parte con el  $y_3$  medido, mediante Bèlanguer se calcula su  $y_2$  asociado ( $y_2$  calculado). Este es comparado con:
  - i. El  $y_2$  medido.
  - ii. Los  $y_2$  teóricos corregidos, hallados a partir de  $V_{max}$  y  $V_{med}$ .
- En la segunda parte, con los  $y_3$  teóricos corregidos, sacados para  $V_{max}$  y  $V_{med}$ , se hallan sus correspondientes  $y_2$  calculados, a partir de Bèlanguer. A continuación:
  - i. Se compara este  $y_2$  calculado con su correspondiente  $y_2$  teórico corregido, respetando la velocidad de la cual parten (debe ser la misma). Además también se compararán con el  $y_2$  medido.

#### C) Para el resalto sumergido:

La tabla de corrección es muy parecida que la del resalto no rechazado. Esta solo varía en que se le añade la corrección del calado en la sección 3.



## 5.2 Comparación de medidas no corregidas con corregidas.

### 5.2.1 Introducción.

El siguiente apartado se hace para el bloque de campañas, en pendiente fuerte. Esto es debido a que para pendiente suave solo se tiene una medida.

La comparación entre medidas no corregidas y corregidas posee como finalidad saber el grado de corrección que presentan los parámetros una vez corregidos. A la hora de la realización de esta contrastación, se van a comparar las distintas campañas para un resalto dado y dentro de este, entre las distintas pendientes.

### 5.2.2 Resalto no rechazado

#### 5.2.2.1. Pendiente horizontal + 8 ‰

##### a) Para $Q_{teo}$ de 12 m<sup>3</sup>/h:

- Calados: Los calados tanto en la sección 1 y 2 disminuyen su error al corregirlos.
- Velocidades: Los valores más óptimos son para la tabla  $V_{max}$  corregida aunque para el valor en la sección 2 se desfaza un 40%. Hay que notar que en la tabla  $V_{max}$  sin corregir, los resultados son mejores que cuando se corrige.
- Froude: Como consecuencia de lo anterior los valores en los Froude de  $V_{max}$  sin corregir son mejores que para  $V_{max}$  corregida. El valor que se obtiene en la sección 1 para esta última tabla es  $Fr = 2.324$  clasificándose el resalto como débil.
- Energías: Para la tabla  $V_{max}$  corregida, el error en la energía es menor.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 13% lo que indica una buena aproximación.

##### b) Para $Q_{teo}$ de 8 m<sup>3</sup>/h:

- Calados: En este caso la corrección que se hace, rectifica de manera considerable el error, sobre todo para la sección 2 que pasa de un 40% a un 20%.
- Velocidades: La velocidad que posee menos error es para la  $V_{max}$  corregida, aunque el valor de  $V_{med}$  tampoco es malo, como se ve estos dos errores no distan mucho. Para la sección 2 la altura piezométrica es escasa y por ello no se puede calcular prácticamente.
- Froude: Para la sección 1 en  $V_{max}$  corregida el error en el Froude es de un 12% lo que indica una buena aproximación. El valor del Froude es  $Fr = 1.631$ , lo que clasifica al resalto como ondulante.
- Energías: De igual forma la mejor energía en la sección 1 es para  $V_{max}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 3% lo que muestra un error mínimo.

##### c) Para $Q_{teo}$ de 4 m<sup>3</sup>/h:

- Calados: En estas condiciones también la corrección de los calados hace que el error se reduzca considerablemente siendo en la sección 1 de un 1% y en la 2 de un 30%.



- Velocidades: El error menor es para  $V_{max}$  corregida en la sección 1, siendo de un 10%. Mientras que en la sección 2 no se puede calcular por la menor altura piezométrica.
- Froude: El Froude óptimo está en la  $V_{max}$  corregida siendo el error de un 13% y el valor de este es  $Fr = 1.750$  siendo el resalto clasificado como débil.
- Energías: También la energía en  $V_{max}$  no corregida es la mejor.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 6% por lo que se da como un valor muy bueno.

#### 5.2.2.2. Pendiente suave + 8‰.

##### a) Para $Q_{teo}$ de $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: En la sección 1 al corregir el calado su error no varía mucho, pero en la sección 2 se reduce un 10%, siendo el valor del error obtenido de un 30%.
- Velocidades: Las velocidades para  $V_{max}$  corregidas tienen unos errores aceptables. Aunque para  $V_{max}$  sin corregir estos valores son mejores que en la anterior.
- Froude: Los Froude con menos error en global son los obtenidos en  $V_{max}$  corregida, siendo el valor en la sección 1 de  $Fr = 2.203$  clasificando el resalto como débil.
- Energías: Las energías son mejores para  $V_{max}$  corregidas
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 15% por lo que se da como un valor aceptable. Aunque al corregir los calados sube el error.

##### b) Para $Q_{teo}$ de $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: En la sección 1 aumenta el error al corregirlo, mientras que para la sección 2 el error disminuye considerablemente.
- Velocidades: La velocidad con un menor error para la sección 1 está en  $V_{max}$  corregida, siendo la de  $V_{med}$  una velocidad con un error bastante grande. Para la sección 2 no se puede calcular la práctica ya que la altura del piezómetro es escasa.
- Froude: El Froude más aceptable es para  $V_{max}$  siendo el error de un 4% y el valor es  $Fr = 1.782$  clasificándose el resalto como débil – ondulante.
- Energías: La energía en la sección 1 también es mejor para  $V_{max}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 2% por lo que se da como un valor aceptable al corregir los calados.

##### c) Para $Q_{teo}$ de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Los calados al corregirlos si muestran una corrección bastante buena ya que se obtiene un error de un 1% y de un 20% para la sección 1 y 2 respectivamente.
- Velocidades: La velocidad más óptima se obtiene en  $V_{med}$  siendo el error de un 1% y en la  $V_{max}$  se dispara este error. En la sección 2 no se puede calcular debido a que la altura piezométrica no es suficiente.
- Froude: Para la sección 1 es mejor el Froude de  $V_{med}$  corregida. El error es de un 3% y su valor es de  $Fr = 1.937$  clasificándose como débil.



- Energías: Las energías con menos error son para la sección 1 de la  $V_{med}$  corregida .
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 0.22% siendo este error despreciable.

#### 5.2.2.3 Pendiente fuerte + 8%.

##### a) Para $Q_{teo}$ de $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Al corregir los calados en la sección 1 se ve un incremento del error aunque muy despreciable y para la sección 2 se tiene un error de un 30% lo cual es asumible.
- Velocidades: Para la sección 1 el error es menor en la  $V_{max}$ , mientras que en la sección 2 es menor para la  $V_{med}$ .
- Froude: Los mismo pasa con los Froude, ya que proceden de los anteriores. El valor obtenido es de  $Fr = 2.166$  clasificándose el resalto como débil.
- Energías: Las energías son mejores para la  $V_{max}$  corregidas, tienen un menor error.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 10% siendo bastante bueno el error.

##### b) Para $Q_{teo}$ de $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: En la sección 1 se aumenta en un 2% el error al corregirlo, mientras que en la sección 2 se reduce un 20%, llegando al error de 30%.
- Velocidades: La velocidad más óptima de entre las corregidas está en  $V_{max}$  corregida, sin embargo la menor de toda el análisis se encuentra en  $V_{med}$  no corregida, siendo el error de un 17%. Para la sección 2 no es posible calcular su velocidad práctica debida a la escasa altura del piezómetro.
- Froude: El mejor Froude se da para  $V_{max}$  corregida siendo el error de un 15%, el valor de este es  $Fr = 1.579$  clasificándose el resalto como ondulante.
- Energías: La energía con menos error es para  $V_{max}$  corregida, aunque la obtenida en  $V_{med}$  esta muy cercana.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 11% siendo este valor bueno.

##### c) Para $Q_{teo}$ de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Al corregir los calados los errores se reducen bastante llegando a valores muy buenos en la sección 1 y un poco desfasado (39%) en la sección 2
- Velocidades: Las velocidades con menor error se dan en  $V_{med}$  corregida, aunque para  $V_{med}$  sin corregir son más reducidas.
- Froude: Para la sección 1 en  $V_{med}$ , se obtiene un Froude con poco error, siendo su valor de  $Fr = 2.345$  clasificándose su resalto como débil.
- Energías: La energía con menos error es también la dada en  $V_{med}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 10% siendo bueno el error.



### 5.2.3. Resalto rechazado

#### 5.2.3.1. Pendiente horizontal + 8 ‰.

##### a) Para $Q_{teo}$ de 12 m<sup>3</sup>/h:

- Calados: Con respecto a los calados, al corregir  $y_1$  presenta un error mayor pero por contra en  $y_2$  e  $y_3$  disminuye el error.
- Velocidades: Al corregir los calados las velocidades también reducen su error excepto para la sección 2 (en la sección 1 incrementa en 1% el error), obteniéndose unas velocidades aceptables sobre todo para las secciones 1 y 3. Esto se da para las velocidades sacadas a partir de las velocidades máximas de la lámina de agua (a 75% del fondo), pero con respecto a las velocidades sacadas de las velocidades medias directamente (a 40% del fondo) los valores dan unos errores muy grandes.
- Froude: Estos toman unos errores buenos sobre todo en la sección 1 y 3 para  $V_{max}$  corregida. Siendo del valor de  $Fr_3 = 1.684$  lo que conlleva a que se clasifique el resalto ondulante – débil.
- Energías: Para la tabla  $V_{max}$  corregida, las energías toman errores buenos.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 20% por lo que se da como un valor aceptable.

##### b) Para $Q_{teo}$ de 8 m<sup>3</sup>/h:

- Calados: Los mejores calados se dan para la tabla  $V_{max}$  corregida, siendo el de la sección 3 el que se desfasa un poco pero el error es solo de un 20% que es aceptable. En la sección 2 no se puede calcular.
- Velocidades: Las velocidades con menos error se siguen dando en  $V_{max}$  corregida para las secciones 1 y 3, aunque para la sección 2 se ve que se tiene un error menor en la  $V_{med}$  corregida.
- Froude: Para las secciones 1 y 3 el error menor error global se da en  $V_{med}$  sin corregir, aunque los valores de  $V_{max}$  corregida tampoco son malos. Y en la sección 2 el menor se encuentra en  $V_{med}$  corregida. El menor Froude se da en  $V_{med}$  sin corregir siendo  $Fr = 1.270$ , clasificándose el resalto como ondulante.
- Energías: Para la tabla  $V_{max}$  corregida, las energías toman errores buenos, aproximadamente de un 20%.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 20% por lo que se da como un valor aceptable.

##### c) Para $Q_{teo}$ de 4 m<sup>3</sup>/h:

- Calados: Los calados corregidos más óptimos están en  $V_{max}$  siendo el error en la sección 1 de 1% y en la sección 3 de un 20% que es aceptable, mientras que en la sección 2 no se puede calcular el teórico, debido a que no se puede hallar la velocidad práctica.
- Velocidades: Las velocidades más óptimas siguen siendo también en este caso las de la tabla  $V_{max}$ , aunque las de la  $V_{med}$  son buenas sobre todo en la sección 3 no corregida. Aquí tampoco se puede calcular la velocidad práctica de la sección 2 debido a la escasa altura en el piezómetro.





- Froude: Los Froude más homogéneos son los de  $V_{max}$  corregidos y nos da que en la sección 3 el  $Fr = 1.116$  y el resalto es ondulante.
- Energías: Las energías con menos error son para la sección 1 de la  $V_{max}$  corregida y para la sección 3 de la  $V_{med}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 20% por lo que se da como un valor aceptable.

#### 5.2.3.2. Pendiente suave + 8‰

##### a) Para $Q_{teo}$ de $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Los mejores calados se dan para la tabla  $V_{max}$  corregida, siendo el de la sección 3 el que se desfasa un poco pero el error es solo de un 20% que es aceptable.
- Velocidades: Las velocidades con menos error se siguen dando en  $V_{max}$  corregida para las secciones 1 y 3, aunque para la sección 2 se ve que se tiene un error menor en la  $V_{med}$  corregida.
- Froude: Para las secciones 1 y 3 el error menor está en la  $V_{max}$  corregida y en la sección 2 el menor se encuentra en  $V_{med}$  corregida. En la sección 3 el valor del  $Fr = 1.622$ , siendo el resalto ondulante
- Energías: Para la tabla  $V_{max}$  corregida, las energías toman errores buenos, aproximadamente de un 20%.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 30% por lo que se da como un valor aceptable.

##### b) Para $Q_{teo}$ de $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Para este caudal los calados de  $V_{max}$  y  $V_{med}$  corregidos son prácticamente los mismos, siendo un poco mejor los de  $V_{max}$ .
- Velocidades: Las velocidades para la sección 1 tienen menos error en  $V_{max}$  y para la sección 3 el error menor es en  $V_{med}$ . Pero en la sección 2 no se puede tener velocidad práctica.
- Froude: Los mejores Froude son los de la tabla  $V_{max}$  corregida sobre todo para la sección 1 mientras que para la sección 3 el error es un poco grande y según este  $Fr = 1.004$  el resalto correspondiente a un régimen crítico.
- Energías: Para la sección 1 el error es menor en  $V_{max}$  y para la sección 3 es mejor la  $V_{med}$ .
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 17% por lo que se da como un valor aceptable.

##### c) Para $Q_{teo}$ de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Los calados corregidos más óptimos están en  $V_{max}$  siendo el error en la sección 1 de 1% y en la sección 3 de un 15% que es aceptable, mientras que en la sección 2 no se puede calcular el teórico, debido a que no se puede hallar la velocidad práctica.
- Velocidades: La mejor velocidad para la sección 1 es la que está en  $V_{med}$  corregida, mientras que para la sección 3 la mejor se encuentra en  $V_{max}$  corregida. Siendo la velocidad en 2 imposible de calcular, debido a la poca altura del piezómetro.



- Froude: Para la sección 1 es mejor el Froude de  $V_{med}$  corregida, mientras que para la sección 3 es mejor la  $V_{max}$  corregida, siendo este último de valor  $Fr = 0.966$  correspondiente a un régimen subcrítico.
- Energías: Las energías con menos error son para la sección 1 de la  $V_{med}$  corregida y para la sección 3 de la  $V_{max}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 17% por lo que se da como un valor aceptable.

#### 5.2.3.3 Pendiente fuerte + 8%.

##### a) Para $Q_{teo}$ de $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: La mejor corrección se da en  $V_{max}$  corregida, aunque en la sección 1 al corregirla se incrementa el error y el calado en la sección 2 no se puede calcular, aunque el error en  $V_{med}$  corregida es solo de un 2%.
- Velocidades: Las velocidades más óptimas se dan en la  $V_{max}$  corregida, siendo en la sección 1 el error de 1%, aunque la velocidad en la sección 2 no se puede calcular debido a la poca altura del piezómetro.
- Froude: También para las secciones 1 y 3 los mejores Froude se dan en la  $V_{max}$  corregida, además de un error entre el 10% y 30%. Donde en la sección 3 el Froude tiene un valor de  $Fr = 1.729$ , clasificándose como ondulante – débil.
- Energías: En las energías también se ratifica que la mejor medida es para  $V_{max}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 25% por lo que se da como un valor aceptable.

##### b) Para $Q_{teo}$ de $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Los mejores calados siguen siendo los de  $V_{max}$  corregidos, aunque no difieren mucho de los de  $V_{med}$  corregida, lo que se observa en la sección 3. En la sección 2 no se puede comparar. Además en la sección 1 al corregirlo se incrementa un poco el error.
- Velocidades: Las velocidades son mejor para la  $V_{max}$  corregida, aunque para  $V_{med}$  corregida se refleja que el error va bajando.
- Froude: Los Froude son mejores en la  $V_{max}$  corregida siendo en la sección 3  $Fr = 1.079$  y el resalto se clasifica como ondulante (muy próximo al régimen crítico).
- Energías: Para la sección 1 el error es menor en  $V_{max}$  corregida y para la sección 3 es mejor la  $V_{med}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 25% por lo que se da como un valor aceptable.

##### c) Para $Q_{teo}$ de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: El menor error en los calados se da en la tabla  $V_{max}$  corregida, siendo en la sección 1 de un 4% y en la sección 3 de 15%, mientras que el teórico de la sección dos no se puede calcular.
- Velocidades: Para la sección 1 se obtiene un error menor en la  $V_{med}$  corregida, mientras que para la sección 3 es menor en la  $V_{max}$ . Siendo en la sección 2 imposible de calcular por la poca altura de piezómetro.



- Froude: Para la sección 1 es mejor el Froude de  $V_{med}$  corregida, mientras que para la sección 3 es mejor la  $V_{max}$  corregida. Siendo el valor en esta última sección de  $Fr = 1.491$  y clasificándose el resalto como ondulante.
- Energías: Tanto para la sección 1 como 3 es mejor el valor en la  $V_{med}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 37% por lo que se da como un valor aceptable, aunque el error es apreciable.

## 5.2.4 Resalto sumergido

### 5.2.4.1. Pendiente horizontal + 8 ‰.

#### a) Para $Q_{teo}$ de $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: El calado teórico  $y_3$  según Rajaratnam II es de un 1% para los valores corregidos, con independencia de  $V_{max}$  o  $V_{med}$ . Mientras que por Rajaratnam I nos da un error de un 20% en las mismas condiciones que en el anterior.
- Velocidades: La velocidad en la sección 1 da un error de un 11% para  $V_{max}$  corregida.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 37% siendo este error aceptable, debido a la dificultad de medir este parámetro.
- Coeficiente de contracción: El error que se tiene en  $V_{max}$  corregida es de un 10%, mientras que en  $V_{max}$  sin corregir el error es de un 9%.

#### b) Para $Q_{teo}$ de $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Para Rajaratnam II son mejores los valores de  $y_3$  siendo en  $V_{max}$  corregida de un 2% lo que muestra la gran aproximación, mientras que para Rajaratnam I está en  $V_{max}$  corregida en un 30%.
- Velocidades: La velocidad que más se aproxima es en  $V_{max}$  corregida en la sección 1 siendo el error de un 1%. En  $V_{med}$  el error se incrementa bastante.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 30%, siendo este error aceptable, debido a la dificultad que posee este parámetro para ser medido.
- Coeficiente de contracción: No se puede calcular para las medidas corregidas, ya que, en la práctica sale una energía mayor aguas abajo que aguas arriba, lo cual es imposible y se debe al error producido en las medidas. Aunque para las medidas sin corregir sí se puede calcular, siendo el valor más óptimo el de  $V_{max}$  sin corregir con un error de un 18%.

#### c) Para $Q_{teo}$ de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: En  $V_{max}$  sin corregir el error en  $y_3$  es menor que en  $V_{max}$  corregida según Rajaratnam II, aunque parezca extraño. Y para Rajaratnam I el error se reduce un 10% hasta llegar a un 50% en  $V_{max}$  corregida.
- Velocidades: El error para  $V_{max}$  corregida en la sección 1 es de un 1%, mientras que para la sección 2' no se puede calcular la práctica por la poca altura piezométrica.



- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 36% siendo un valor que está al límite de estar aceptado como admisible.
- Coeficiente de contracción: Al corregir los datos no se puede obtener el Cc debido a que en la sección 1 hay más energía que en la sección 0. Pero cuando no se corrigen se obtiene para Vmax sin corregir un error de 14%.

#### 5.2.4.2. Pendiente suave + 8‰.

##### a) Para $Q_{teo}$ de $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Para Rajaratanam II se obtiene mejor error en Vmax sin corregir que corregida, aunque la diferencia solo es de un 3%, siendo el valor para Vmax sin corregir de un 9%. Para Rajaratanam I al corregir el calado se reduce el error en un 10%, llegando a un error de 40%.
- Velocidades: La velocidad en la sección 1 más exacta es para Vmax corregida. Para la sección 2' si se puede calcular la práctica.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 48% lo que está un poco por encima de lo admisible.
- Coeficiente de contracción: El Cc más óptimo está en la Vmax sin corregir, aunque solo dista del obtenido en Vmax corregido en un 6%, llegando en este último a un error de 9% lo cual es bastante aceptable.

##### b) Para $Q_{teo}$ de $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: En esta situación también para Rajaratanam II el y3 teórico es mejor para Vmax sin corregir que corregida, aunque para esta última el valor es bastante bueno, siendo el error de un 11%. Para Rajaratanam I al corregir los calados el error se reduce en un 10%, llegando a un error de un 30%.
- Velocidades: La velocidad con menos error está en Vmax corregida siendo de un 12% en la sección 1. Para la sección 2' si se puede calcular la práctica.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 42% siendo un poco elevado el error, pero dentro de lo aceptable.
- Coeficiente de contracción: El Cc más óptimo que sale es para Vmax sin corregir, siendo el valor de C igual a 0.967 siendo este muy próximo al teórico que es de 0.9, dando un error de un 10%. Sin embargo para todos los demás casos no se puede calcular debido a que aguas abajo la energía sale mayor que aguas arriba, lo que es imposible y esto se debe a los errores.

##### c) Para $Q_{teo}$ de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Para Rajaratanam II el valor en Vmax sin corregir sale mejor que para Vmax corregida, diferenciándose en un 4%, siendo el valor del error en



el corregido de un 10%. Para Rajaratanam I corrigiendo, los valores de  $y_3$  salen mejor, sale un error de un 40%.

- Velocidades: La mejor velocidad es para  $V_{max}$  corregida dando un valor en el error de un 4% en la sección 1. Para la sección 2' se puede calcular la práctica.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 34% siendo este error aceptable.
- Coeficiente de contracción: El valor más óptimo sale para  $V_{med}$  sin corregir siendo el error de un 5% (el valor de  $C$  sale aproximado a 0.9). Sin embargo para los corregidos no se puede calcular debido a que hay más energía aguas abajo que aguas arriba lo que no es posible y es debido a los errores.

#### 5.2.4.3 Pendiente fuerte + 8‰

a) Para  $Q_{teo}$  de  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Para Rajaratanam II en  $V_{max}$  sin corregir se tiene un error de un 17%, mientras que para el corregido es de un 20%, aquí la diferencia es mínima aunque sigue siendo mejor sin corregir. Para Rajaratanam I al corregir los calados el error se reduce un 10% y llega a un 38%.
- Velocidades: Para las velocidades en la sección 1 es mejor la  $V_{max}$  corregida que da un valor de error de un 1% y para la sección 2' se puede calcular la velocidad práctica.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 40% lo cual está dentro de lo esperado.
- Coeficiente de contracción: Para  $V_{med}$  no se puede calcular, mientras que el valor más óptimo está para  $V_{max}$  sin corregir que da un error de un 1%, mientras que para  $V_{max}$  corregida da un valor de un 10% de error que son valores bastante buenos.

b) Para  $Q_{teo}$  de  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Por Rajaratanam II se tiene un error en  $V_{max}$  sin corregir de 13% y en  $V_{max}$  corregida de un 16%. Para Rajaratanam I al corregir los calados se reduce el error en un 8% obteniendo un valor de 40% de error.
- Velocidades: La mejor velocidad se da en  $V_{max}$  corregida siendo el error de un 2%. Para la sección 2' se puede calcular la práctica.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 35% estando este valor dentro de los aceptables.
- Coeficiente de contracción: El menor error se da en  $V_{med}$  sin corregir siendo este de un 14%.

c) Para  $Q_{teo}$  de  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados: Para Rajaratanam II el calado en  $V_{max}$  sin corregir es de 8% y en  $V_{max}$  corregido es de 12%. Para Rajaratanam I cuando corriges se disminuye el error en un 10% llegando a un error de 60%.



- Velocidades: La velocidad con menos error es para  $V_{max}$  corregido, siendo el error de un 13% en la sección 1. Para la sección 2' se puede calcular la práctica.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 33% lo que nos da un error aceptable.
- Coeficiente de contracción: El menor error se da en  $V_{med}$  sin corregir siendo este de un 11%. Siendo imposible calcular el  $C_c$  para los corregidos ya que la energía aguas abajo sale mayor que aguas arriba, debido a los errores.

### 5.2.5 Comparación en pendiente suave (+ 4 ‰)

#### 5.2.5.1 Introducción.

Para pendiente suave solo se ha realizado una serie de campañas, cuyos parámetros de realización han sido; Pendiente horizontal (4‰) para  $Q_{12}$ .

#### 5.2.5.2 Resalto no rechazado + 4 ‰

- Calados: Los calados mientras que en la sección 2 disminuye el error en la sección 1, aumenta un 4% el error.
- Velocidades: En la tabla  $V_{max}$  corregida es donde se dan valores más exactos de velocidades, siendo el error en la sección 1 de un 1%.
- Froude: El valor que se obtiene en la sección 1 para esta tabla es  $Fr = 2.095$  clasificándose el resalto como débil.
- Energías: Para la tabla  $V_{max}$  corregida, el error global en la energía es menor.
- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 10% lo que indica una buena aproximación.

#### 5.2.5.3 Resalto rechazado + 4 ‰

- Calados: Al corregir los calados el error en la sección 3 disminuye considerablemente siendo al final de un 20%. Sin embargo para la sección 1 y 2, aumenta ligeramente el error.
- Velocidades: Las velocidades en las secciones 1 y 3 al corregir calados reducen su error en gran medida. En la sección 2 el error permanece invariable.
- Froude: El valor del Froude es  $Fr = 2.095$  clasificándose el resalto como débil.
- Energías: En las secciones 1 y 3 se reduce el error al corregir calados. En la sección 2 no cambia.
- Longitud de resalto: El error en la longitud del resalto es de un 20%.

#### 5.2.5.4 Resalto sumergido + 4 ‰

- Calados: Para Rajaratnam II al corregir los calados el error aumenta en un 4%, siendo este en  $V_{max}$  corregida de un 12%. En Rajaratnam I cuando corriges se disminuye el error en un 10% llegando a un error de 34%.
- Velocidades: Tanto en la sección 1 y 2', no es factible calcular la velocidad, debido a que la carga de velocidad supera el límite del pitot ( $>0.250$  m)



- Longitud de resalto: La longitud de resalto existente entre lo que se ha medido y lo que debería ser es de un 31% , siendo este un error aceptable.
- Coeficiente de contracción: El menor error se da en la tabla Vmax sin corregir siendo este de un 2%. Al corregir los calados, en la tabla Vmax corregida el error se incrementa en un 7%. Para Vmed no se puede hallar, debido a que la pérdida de carga no es concorde con la realidad.

### 5.3 Conclusiones entre mediciones

#### 5.3.1 Introducción:

Es este punto se van a comparar las campañas con igual caudal, pertenecientes a un mismo tipo de resalto. Esto se ha hecho con el fin de tener un aspecto global entre medidas no corregidas y corregidas.

#### 5.3.2. Resalto no rechazado + 8 ‰

##### a) Para $Q_{teo}$ de 12 m<sup>3</sup>/h:

- Calados:
  - a. Los calados al corregirlos disminuyen su error, y este es menor para la sección 1 que para la sección 2
  - b. En ocasiones al corregir el calado en la sección 1 se obtiene incrementa un poco el error, este caso se da para una pendiente muy fuerte.
- Velocidades:
  - a. Con carácter general los valores de Vmax sin corregir son mejores que los Vmax corregidos, pero estos últimos poseen magnitudes de error aceptables. Esto se nota mejor para pendientes pequeñas.
  - b. Para la sección 2 en pendientes fuertes la velocidad procedente de Vmed corregida posee menor error.
- Froude:
  - a. El resalto se puede clasificar en estas condiciones como un resalto débil.
- Energías:
  - a. Las mejores energías se dan para Vmax corregida, poseen un error menor.
- Longitud de resalto:
  - a. El error en la longitud del resalto es aproximadamente de un 13% por lo que la medida de la longitud ha sido buena.

##### b) Para $Q_{teo}$ de 8 m<sup>3</sup>/h:

- Calados:
  - a. Que en la sección 1 se incrementa un poco el error al corregirlo.
  - b. En la sección 2 se corrige bastante el error, siendo esta reducción aproximadamente de un 20%..
- Velocidades:
  - a. Para la sección 1 las velocidades con menor error están en la Vmax corregida, sin embargo los medidas de Vmed corregidas no son malas, y estas se van mejorando conforme aumenta la pendiente.



b. En la sección 2 no se puede calcular la velocidad práctica, debido a la escasa altura piezométrica, debido a los errores.

- Froude:
  - a. El resalto se define en estas características como ondulante, aunque está cerca del débil.
- Energías:
  - a. Como carácter general las obtenidas para  $V_{max}$  corregidas son mejores. Aunque las  $V_{med}$  corregidas están muy próximas, sobre todo para mayores pendientes.
- Longitud de resalto:
  - a. El error medio que se produce es de un 5%, siendo el de mayor pendiente el que posee un poco más de error.

c) Para  $Q_{teo}$  de  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados:
  - a. Los calados al corregirlos, reducen su error sobre todo para la sección 2 que desciende aproximadamente un 20%
  - b. En la sección 2 para pendientes fuertes el error se desfasa un poco.
- Velocidades:
  - a. Como aspecto más importante se destaca que para pendientes medias y fuertes son mejores los datos de  $V_{med}$  corregidas, aunque para muy fuertes en  $V_{med}$  sin corregir también se obtienen buenos datos.
  - b. Para pendientes muy pequeñas es mejor la  $V_{max}$  corregida.
  - c. En la sección 2 no se puede calcular la velocidad práctica ya que la altura piezométrica es escasa.
- Froude:
  - a. Se clasifica el resalto en estas condiciones como débil.
- Energías:
  - a. Para mayor pendiente son mejores las de  $V_{med}$  corregidas y para menor son mejores las  $V_{max}$  pero en este caso no corregidas.
- Longitud de resalto:
  - a. El error medio es de un 5% siendo el valor más desfasado el producido en una pendiente muy fuerte.

### 5.3.3. Resalto rechazado + 8 ‰

a) Para  $Q_{teo}$  de  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- Calados:
  - a. Para este caudal se puede sacar como conclusión que las mejores medidas se dan para la tabla  $V_{max}$  corregida.
  - b. En ocasiones al corregir el calado en la sección 1 se obtiene incrementa un poco el error.
- Velocidades:
  - a. En las secciones 1 y 3 las medidas más óptimas se dan para  $V_{max}$  corregida.
  - b. Para la sección 2 los valores se desfasan de la realidad, es donde es más difícil que realidad y teoría se asemejen.





- Froude:
    - a. Los Froude con menor error están en  $V_{max}$  corregida.
    - b. El resalto se puede clasificar en estas condiciones como un resalto que está entre el resalto ondulante y débil.
  - Energías:
    - a. Las mejores energías se dan para  $V_{max}$  corregida.
  - Longitud de resalto:
    - a. El error en la longitud del resalto es aproximadamente de un 25% como valor medio. Se puede concluir que las medidas están dentro del error esperado, debido a la dificultad de medición de este fenómeno.
- b) Para  $Q_{teo}$  de  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :
- Calados:
    - a. Que en la sección 1 se incrementa un poco el error al corregirlo.
    - b. En las secciones 1 y 3 se dan valores de errores aceptables en la tabla  $V_{max}$  corregida.
    - c. Los errores de la  $V_{max}$  corregida y en la  $V_{med}$  se van acercando.
    - d. En la sección 2 en ocasiones el calado práctico no se puede obtener.
  - Velocidades:
    - a. Los errores en las velocidades obtenidas de  $V_{max}$  y  $V_{med}$  corregidas se van aproximando entre sí. Aunque siguen siendo mayormente los obtenidos de  $V_{max}$  corregida ligeramente mejores.
  - Froude:
    - a. El resalto se define en estas características como ondulante.
  - Energías:
    - a. En la sección 1 el error es menor para  $V_{max}$  corregida y en la sección 3 es mejor para  $V_{med}$  corregida. Esto es como nota general, aunque las obtenidas en global de  $V_{max}$  corregidas no son malas.
  - Longitud de resalto:
    - a. El error medio que se produce es de un 20% lo que se da por aceptable.
- c) Para  $Q_{teo}$  de  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :
- Calados:
    - a. En las secciones 1 y 3 los mejores calados son los obtenidos en  $V_{max}$  corregidos. Siendo el error en la sección 1 casi despreciable.
    - b. En la sección 2 no se puede calcular ya que está en función de la velocidad práctica en esa sección y esta es imposible hallarla.
  - Velocidades:
    - a. Como carácter general se puede sacar que las velocidades sacadas de  $V_{med}$  corregidas son las más correctas, aunque las de  $V_{max}$  corregidas poseen unos errores también aceptables.
    - b. Para la sección 1 es mejor la  $V_{med}$  corregida, para la sección 3 es mejor la  $V_{max}$  y para la sección 2 no se puede calcular, debido a la escasa altura del piezómetro.
  - Froude:
    - a. Se clasifica el resalto en estas condiciones como ondulante.
  - Energías:



- a. Con carácter general las de  $V_{med}$  corregidas son mejores, sobre todo a mayores pendientes, aunque para la sección 1 y 3 en ocasiones es mejor la de  $V_{max}$  corregida
- Longitud de resalto:
  - a. El error medio es de un 25%, siendo este valor aceptable (para una pendiente muy fuerte el error a sido el mayor)

#### 5.3.4. Resalto sumergido + 8 ‰

- a) Para  $Q_{teo}$  de  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ :
  - Calados:
    - a. Cuando se recurre a Rajaratnam II se tiene que destacar que para la  $V_{max}$  sin corregir los calados  $y_3$  salen con menos error aunque no distan mucho de los  $V_{max}$  corregidos. Esto es en general, pero existen excepciones.
    - b. Utilizando Rajaratnam I los valores de  $y_3$  son mejores para la  $V_{max}$  corregidos y generalmente estos presentan un error de entre un 30% - 40%.
    - c. Rajaratnam II es bastante más aproximado que Rajaratnam I.
  - Velocidades:
    - a. En la sección 1 la velocidad más aproximada se da en  $V_{max}$  corregida, siendo su error escaso.
    - b. Para la sección 2' en ocasiones no se puede calcular la velocidad práctica, debido a la escasa altura del piezómetro.
  - Longitud de resalto:
    - a. El error en la longitud del resalto es aproximadamente de un 36%, siendo el valor más desfavorable en pendientes intermedia, y el menor para una pendiente muy pequeña y fuerte.
    - b. El gran error que se muestra, está debido a la dificultad de poder precisar dónde se termina este resalto, aunque se hayan tomado las medidas lo más precisas posibles.
  - Coeficiente de contracción:
    - a. Los valores con menos error se dan en  $V_{max}$  sin corregir.
    - b. A mayor pendiente se obtienen valores más exactos.
- b) Para  $Q_{teo}$  de  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ :
  - Calados:
    - a. Rajaratnam II generalmente se obtienen mejores  $y_3$  en  $V_{max}$  corregir que en  $V_{max}$  sin corregir, aunque en la pendiente intermedia ocurre lo contrario.
    - b. En la sección 2 se corrige bastante el error en  $V_{max}$  corregida, produciéndose un error medio de un 35%, obteniéndose el valor más pésimo de error para una pendiente fuerte.
  - Velocidades:
    - a. Para la sección 1 las velocidades con menor error se encuentran en  $V_{max}$  corregida, obteniendo valores de error bastante pequeños.
    - b. En la sección 2' se pueden calcular las velocidad práctica sin ningún problema para  $V_{med}$  pero surgen problemas para  $V_{max}$ , siendo imposible su cálculo, debido a la altura piezométrica.
  - Longitud de resalto:



- a. El error medio es de un 36% siendo los valores más perjudiciales los obtenidos en pendientes intermedias y el menor en muy pequeñas y fuertes.
- Coeficiente de contracción:
    - a. Como carácter general salen menos errores en tablas sin corregir ya sea en  $V_{max}$  o  $V_{med}$  (suave, fuerte) según el caso.
    - b. Para pendiente muy pequeña no se puede calcular, debido a que sale más energía aguas abajo que aguas arriba lo que es imposible, siendo esto ocasionado por los errores.
- c) Para  $Q_{teo}$  de  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :
- Calados:
    - a. Para el cálculo del  $y_3$  por Rajaratnam II sale menor error en  $V_{max}$  sin corregir que en  $V_{max}$  corregida
    - b. Según Rajaratnam I al corregirlo se reduce en un 10% el error, siendo los valores con menos error los obtenidos en una pendiente intermedia y los de mayor en una pendiente más fuerte.
  - Velocidades:
    - a. En la sección 1 la velocidad con menor error se da en  $V_{max}$  corregida, siendo los valores para pendientes pequeñas y medianas los que poseen menos error.
    - b. En la sección 2' mientras con pendiente muy pequeña no se puede calcular debido a la escasa altura piezométrica. Para pendientes suaves y fuertes si se puede hacer.
  - Longitud de resalto:
    - a. El error medio producido es de un 35%, siendo los valores con menores pendientes los que poseen más error, aunque este es de un 36% lo cual se asemeja a los errores que se van manejando a lo largo de la campaña.
  - Coeficiente de contracción:
    - a. Generalmente se puede calcular este valor para pendientes suaves y fuertes y siempre en  $V_{med}$  sin corregir. Para pendientes muy pequeñas solo se puede hacer en  $V_{max}$  sin corregir.
    - b. El valor más aproximado se produce en una pendiente suave.
    - c. Para valores corregidos no se puede obtener debido a la mayor energía aguas abajo que aguas arriba.

### 5.3.5 Pendiente suave. (+ 4 ‰)

#### 5.3.5.1 Introducción.

En este caso se va a comparar directamente con su homogéneo para pendiente fuerte.

#### 5.3.5.2 Resalto no rechazado + 4 ‰

- Calados:
  - a. Al igual que pasa en pendiente fuerte, en pendiente suave al corregir calados en ocasiones el error de la sección 1 aumenta ligeramente.



- Velocidades:
  - a. Mientras que en pendiente fuerte con carácter general los valores de  $V_{max}$  sin corregir son mejores que los  $V_{max}$  corregidos, en pendiente suave la medida más aceptable es para  $V_{max}$  corregida.
- Froude:
  - a. El resalto se puede clasificar tanto para pendiente suave como fuerte, dadas estas condiciones como un resalto débil.
- Energías:
  - a. Las mejores energías se dan para  $V_{max}$  corregida, poseen un error menor, ya sea tanto para pendiente suave como fuerte.
- Longitud de resalto:
  - a. El error en la longitud del resalto es aproximadamente de un 13% para pendiente fuerte y en pendiente suave es de un 10% por lo que las medidas de la longitud han sido buenas.

#### 5.3.5.3 Resalto rechazado + 4 ‰

- Calados: Mientras que para pendiente suave al corregir los calados, el error en la sección 3 baja y en las secciones 1 y 2 sube. En pendiente fuerte los calados, al corregir  $y_1$  presenta un error mayor pero por contra en  $y_2$  e  $y_3$  disminuye el error.
- Velocidades: Para pendiente fuerte y suave corrigiendo calados el error en la velocidad disminuye en las secciones 1 y 3, aumentado ligeramente en la sección.
- Froude: Estos toman unos errores buenos sobre todo en la sección 1 y 3 para  $V_{max}$  corregida, para las dos pendientes Siendo del valor de  $Fr_3 = 1.684$  lo que conlleva a que se clasifique el resalto ondulante – débil para pendientes fuertes, mientras que en pendiente suave el  $Fr_3 = 2.095$ , clasificándose sólo como débil. Concluyéndose que para pendiente suave está mejor definido el resalto.
- Energías: Para las dos pendientes la tabla  $V_{max}$  corregida, da las energías con menos error.
- Longitud de resalto: En pendiente fuerte y suave el error en la longitud de resalto es aproximadamente 20%.

#### 5.3.5.4 Resalto sumergido + 4 ‰

- Calados:
  - a. En Rajaratnam II para pendiente fuerte, generalmente se obtienen valores mejores de  $y_3$  para  $V_{max}$  sin corregir. Sin embargo para pendiente suave, se han obtenido los mejores resultados en  $V_{max}$  corregida.
  - b. Utilizando Rajaratnam I los valores de  $y_3$  son mejores para la  $V_{max}$  corregidos, tanto para pendiente suave como fuerte y generalmente estos presentan un error de entre un 30% - 40%.
  - c. Rajaratnam II es bastante más aproximado que Rajaratnam I. Esto es debido a que su formulación simula mejor las condiciones de sumergencia en lámina libre.
- Velocidades:
  - a. En la sección 1 la velocidad más aproximada se da en  $V_{max}$  corregida, siendo su error escaso, para pendiente fuerte. Sin embargo para pendiente suave no se puede calcular esta velocidad, debido a la gran carga de velocidad que se posee.



b. Para la sección 2' en ocasiones no se puede calcular la velocidad práctica, debido a la escasa altura del piezómetro. Esto ocurre tanto para pendiente fuerte como suave.

- Longitud de resalto:
  - a. Mientras que el error en pendiente fuerte es de un 36% en pendiente suave es de un 31%. Esto indica la gran proximidad de exactitud para la longitud de resalto ya sea pendiente suave como fuerte.
- Coeficiente de contracción:
  - a. Tanto en pendiente fuerte como suave, los valores con menos error se dan en  $V_{max}$  sin corregir.

#### 5.4 Comparación de medidas corregidas Vs otros trabajos experimentales.

##### 5.4.1 Introducción:

En el siguiente apartado se van a enfrentar los datos de las campañas prácticas realizadas frente a trabajos experimentales consolidados. El fin que se persigue es por una parte comprobar el grado de exactitud de las medidas obtenidas y por otra el poder aportar algunas conclusiones frente a estos trabajos experimentales consolidados.

Las comparaciones se van a realizar para pendientes semejantes, pudiendo sacar después los análisis entre distintas pendientes.

No obstante, antes de nada hay que hacer una purga las mediciones que no pueden ser comparadas de las que sí. Para ello se van a utilizar parámetros característicos de cada medición como es el número de Froude en la sección anterior al resalto (sección 1, en resalto no rechazado o sección 3, en el resalto rechazado)

##### 5.4.2 Criba de mediciones válidas.

De las 30 campañas realizadas, que se desglosan en:

| Condiciones de contorno                     |                 | Nº Campañas según tipo de resalto |                  |              | Número de campañas |
|---------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------------|--------------|--------------------|
| Pend. Fuerte                                |                 | No Rechazado                      | Rechado (+ S.R.) | R. Sumergido |                    |
|                                             |                 |                                   |                  |              |                    |
|                                             | Horizontal + 8‰ | 3                                 | 3                | 3            | 9                  |
|                                             | Suave + 8‰      | 3                                 | 3                | 3            | 9                  |
| Para los tres Q distintos en cada pendiente | Fuerte + 8‰     | 3                                 | 3                | 3            | 9                  |
|                                             |                 |                                   |                  |              |                    |
|                                             |                 |                                   |                  |              |                    |
| Pend. Suave                                 |                 | No Rechazado                      | Rechado (+ S.R.) | R. Sumergido |                    |
|                                             |                 |                                   |                  |              |                    |
| Para un $Q_{12}$                            | Horizontal + 4‰ | 1                                 | 1                | 1            | 3                  |
|                                             |                 |                                   |                  |              |                    |
| TOTAL                                       |                 |                                   |                  |              | 30                 |



El requisito que debe cumplir cada medición, para ser aceptada, radica en que su Froude sea mayor de uno, ya que, como se ha comentado con anterioridad este primer bloque de campañas se encuentra en la situación de pendiente fuerte ( $I_o > I_{e_{ci}}$ ).

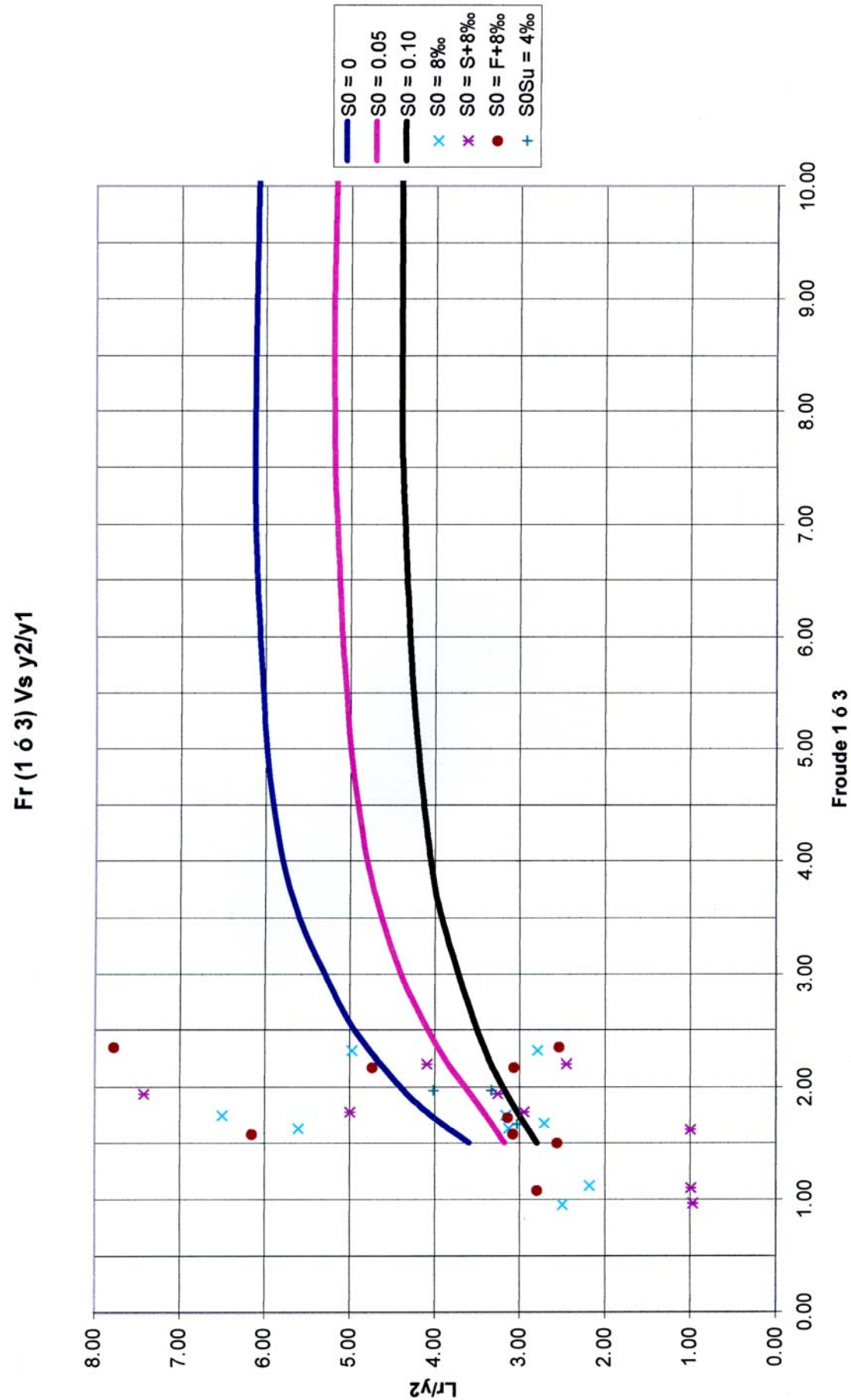
Para facilitar esta tarea se van a representar gráficamente todas las campañas realizadas en un gráfico que nos representa la relación de calados conjugados frente el número de Froude. Este gráfico se muestra en la siguiente página.

Debido a la condición impuesta se observa que se eliminan tres mediciones, dos correspondientes a la campaña suave + 8‰ y otra correspondiente a la campaña horizontal + 8‰. Por lo tanto las mediciones purgadas son:

- Campaña horizontal + 8‰:
  - La medición correspondiente a resalto rechazado con  $Q_8$ .
- Campaña suave + 8‰:
  - La medición correspondiente a resalto rechazado con  $Q_4$ .

Como se ha podido ver, todas las mediciones anuladas han sido en resalto rechazado. Esto ratifica que para estas condiciones las tareas de medición han sido a la misma vez un poco más inexactas y difíciles de realizar, sobre todo para la sección 3. La explicación que se da para que hayan ocurrido estas circunstancias, es que, en dicha sección 3 y por causa de la formación de la curva de remanso, la carga de velocidad desciende de tal forma que el tubo pitot no posee la suficiente precisión y además es proceso que se haya introducido aire, ocasionando que la medida no sea correcta.

Nota: El requisito que se ha tomado para cribar las mediciones es estrictamente relacionado con el Froude. Este no tiene en cuenta el rango para el cuál está definida la curva ( $Lr/y_2$  Vs Froude). Ello es debido a que el límite mínimo está en un Froude de 1.5 y el mínimo de los trabajos experimentales es mayor que uno, por lo que entre estos dos límites se puede extrapolar la formada de la curva, ya que, la diferencia entre estos dos es muy escasa.



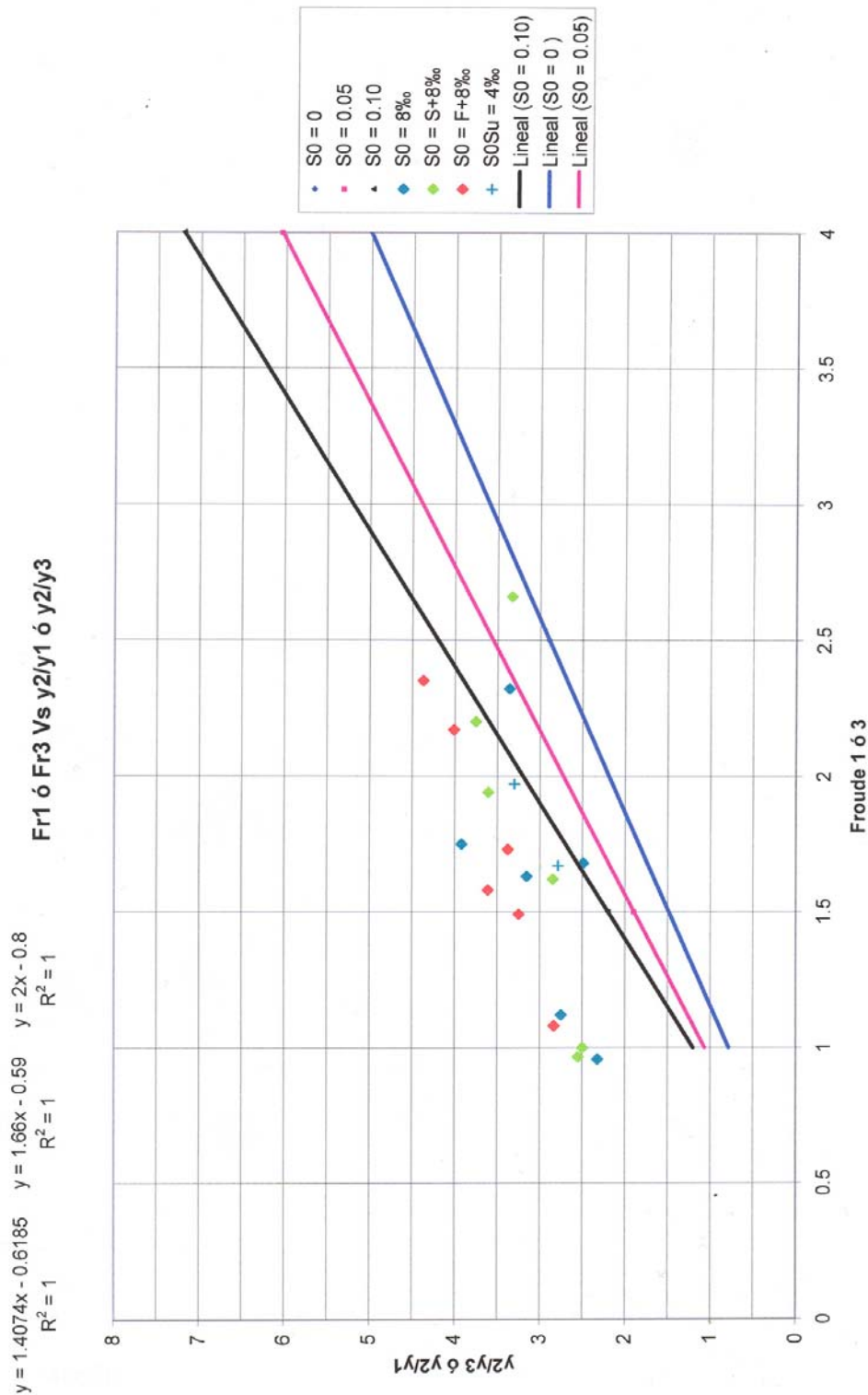
Gráfica 1



### 5.4.3 Comparación de $y_2 / y_1$ Vs $Fr_1$ .

En el siguiente análisis solo se van a hacer comparaciones entre resalto rechazado y no rechazado.

Seguidamente se va exponer la gráfica donde se muestran todos los datos hallados para la realización del siguiente análisis.



Gráfica 2





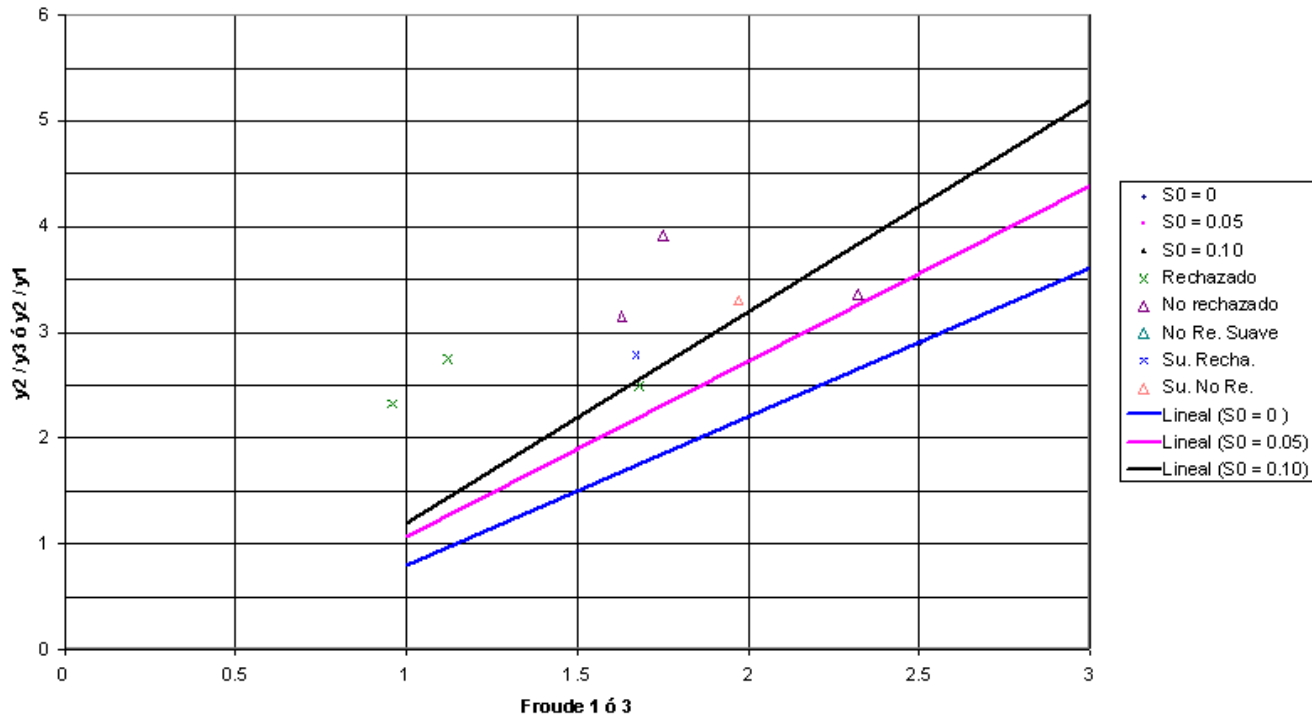
Para simplificar el análisis, se van a mostrar las gráficas, separadas en función de la pendiente.

Nota: Las gráficas y sus tablas de datos resumen se encuentran en el anejo correspondiente.

a) Pendiente Horizontal:

$$y = 1.4074x - 0.6185 \quad R^2 = 1 \quad y = 1.66x - 0.59 \quad R^2 = 1 \quad y = 2x - 0.8 \quad R^2 = 1$$

Fr(1 ó 3) Vs  $y_2/y_1$  ó  $y_2/y_3$



➤ En pendiente fuerte (+ 8%).

- Para un  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ , tanto en resalto rechazado como no rechazado, es donde se obtienen los datos que más se aproximan a la pendiente casi horizontal de un 8%. Aunque estos están más próximos de una pendiente del 5%.

➤ En pendiente suave (+ 4%).

- Para la medida en pendiente suave con  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ , en vez de aproximarse a la pendiente del 5% como ocurre con pendiente fuerte, lo hacen a la pendiente del 10%.



## b) Pendiente Suave + 8‰:

$$y = 1.4074x - 0.6185$$

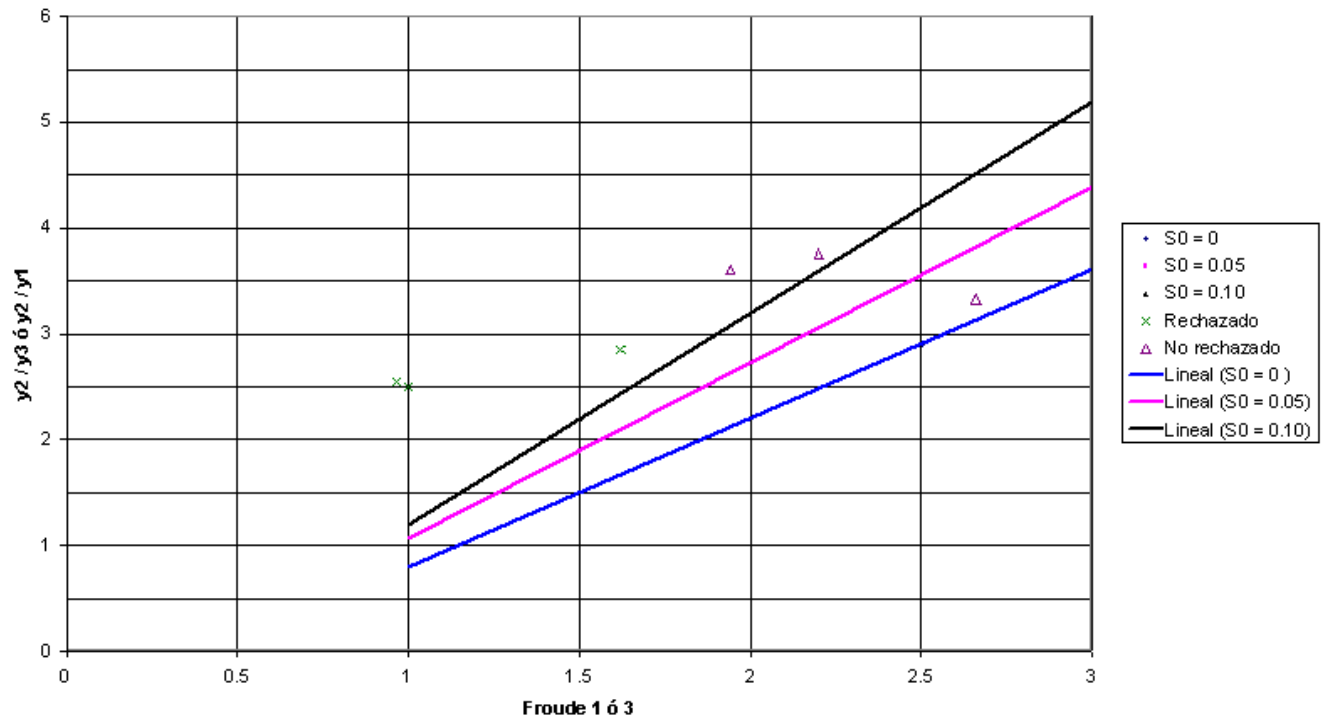
$$R^2 = 1$$

$$y = 1.66x - 0.59$$

$$R^2 = 1$$

$$y = 2x - 0.8$$

$$R^2 = 1$$

Fr(1 ó 3) Vs  $y_2/y_1$  ó  $y_2/y_3$ 

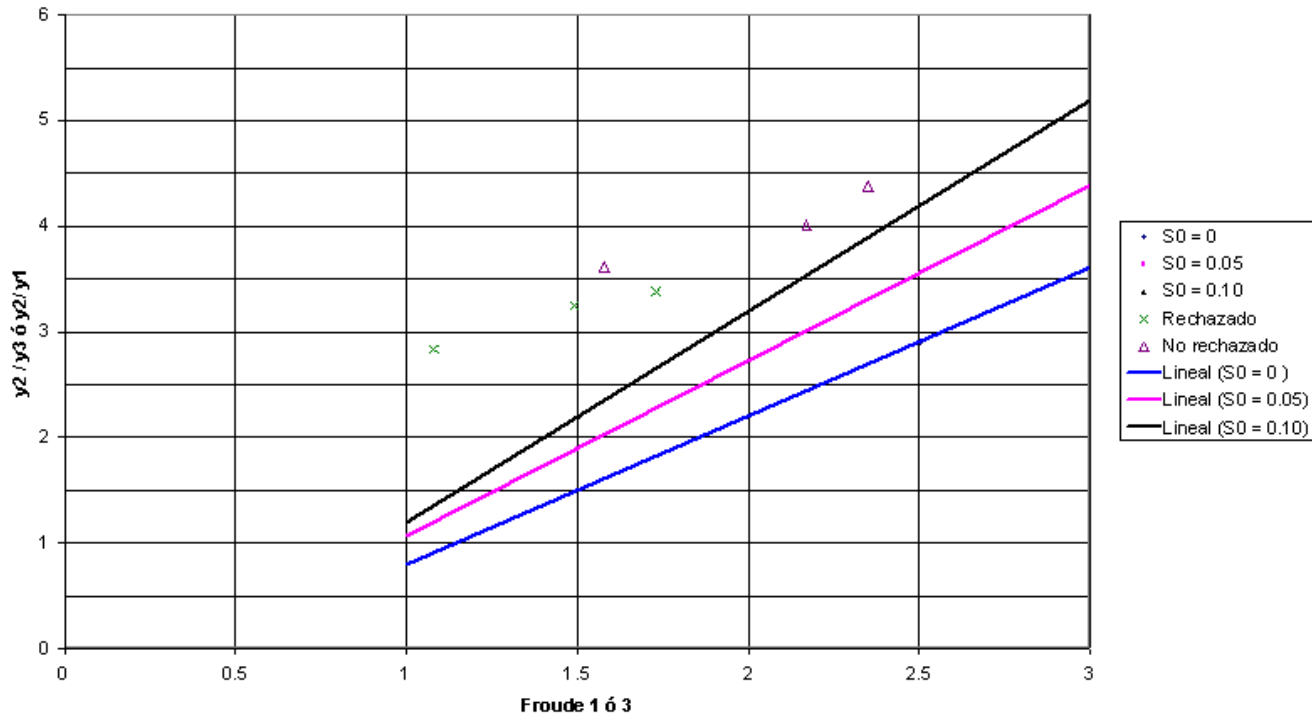
Gráfica 4

- En esta gráfica, los puntos disminuyen su dispersión.
- Los datos más próximos a la pendiente horizontal son: Para los obtenidos del resalto no rechazado con un  $Q_{teo} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ , además esta medición se aproxima bastante bien. Y para el resalto rechazado con un  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ .



## c) Pendiente Fuerte + 8‰:

$$y = 1.4074x - 0.6185 \quad R^2 = 1 \quad y = 1.66x - 0.59 \quad R^2 = 1 \quad y = 2x - 0.8 \quad R^2 = 1$$

Fr(1 ó 3) Vs  $y_2/y_1$  ó  $y_2/y_3$ 

Gráfica 5

- Los datos se han homogeneizado en mayor proporción, pero esto se ha realizado en una pendiente del 10%. Mientras lo que se esperaba es que los datos se agruparan alrededor de una pendiente como máximo de un 8‰.
- En esta campaña todas las mediciones están bastante alejadas de las pendientes propuestas en el estudio. Según el gráfico de referencia se estaría trabajando con una pendiente superior a un 10‰.

## d) Conclusión:

- En pendiente fuerte (+ 8‰).
- Generalmente se obtendrán mejores resultados para un  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$  para un resalto rechazado. Y para resalto no rechazado de  $Q_{teo} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$
- Como se puede observar la pendiente que ha existido a la hora de realizar las mediciones es muy difícil de controlar, siendo la pendiente supuesta en teoría distinta de la realmente existente. Esta discordancia está debida a la gran curvatura que presenta el canal. Aún así se han obtenido algunas medidas que se aproximan a valores teóricos que en principio deberían haber salido.



➤ En pendiente suave ( $+ 4\text{‰}$ ).

Ambos tipos de medidas están próximas, por lo que se puede deducir:

- Son medidas alejadas de los datos que se deberían dar.
- El error cometido es siempre constante. Por lo que entre los distintos tipos de medidas nos darán resultados parecidos.



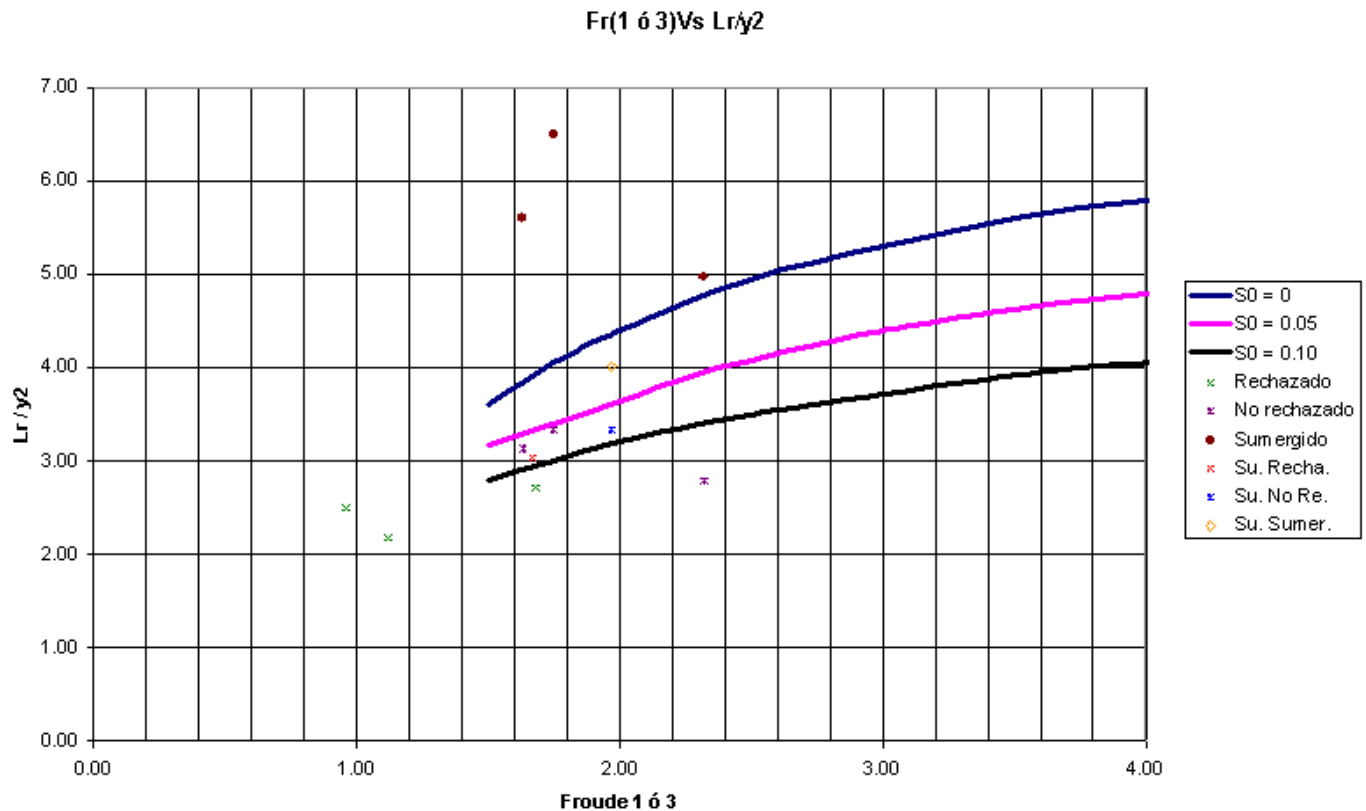
#### 5.4.4 Comparación de $L_r / y_2$ Vs $Fr_3$ ó $Fr_1$

En el siguiente punto, se va a realizar la comparación de todos los tipos de resalto, ya que, los parámetros impuestos para ello aparecen en cada una de estas mediciones, cosa que no ocurría en el apartado anterior.

Nota: La gráfica resumen de todos los puntos de este análisis ya se ha expuesto con anterioridad en la criba de mediciones válidas. Por lo que no se muestra.

De igual forma para hacer un análisis más en profundidad se separan las gráficas en función de la pendiente.

a) Pendiente Horizontal:

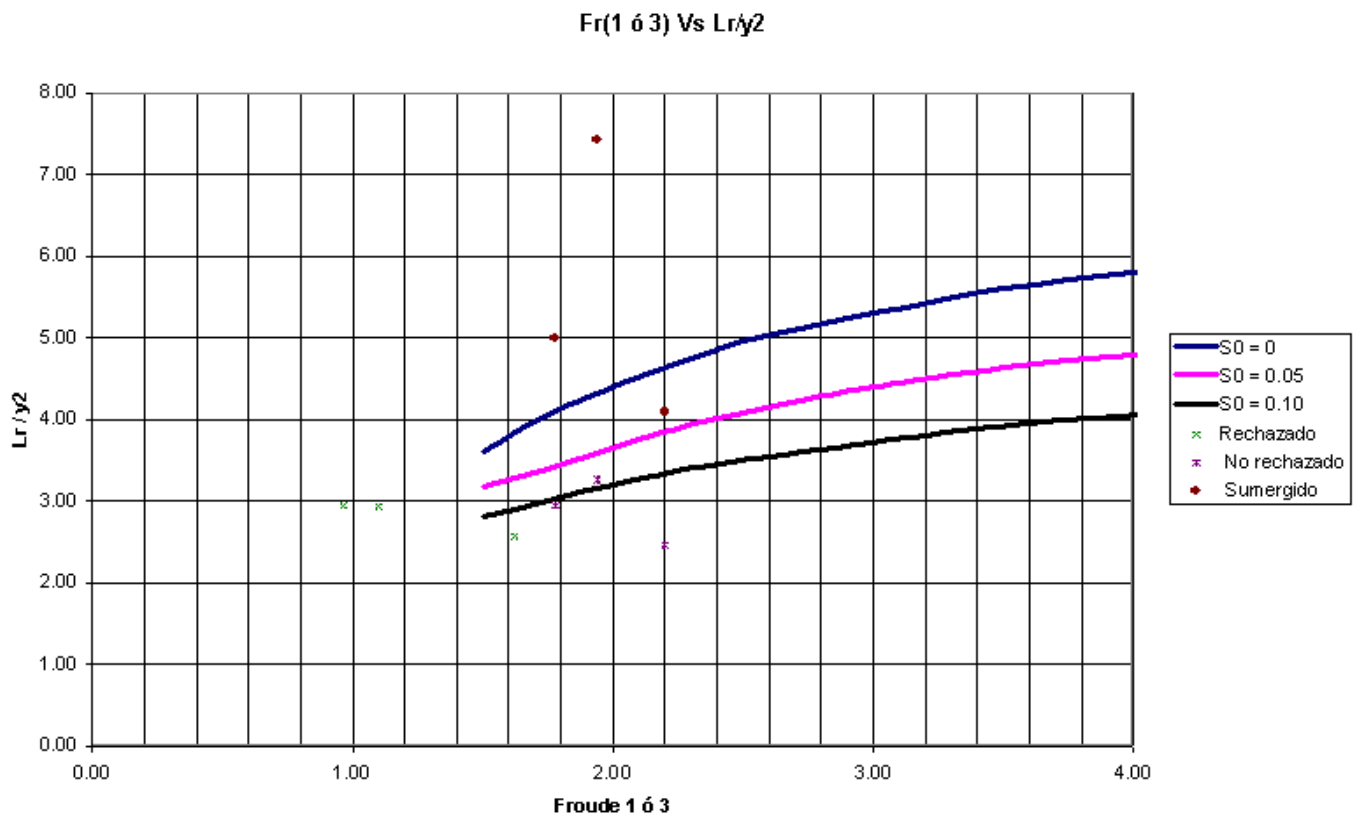


- En pendiente fuerte (+ 8%).
  - En el resalto sumergido es valor más próximo es el obtenido a partir de un  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ .
  - Para resalto rechazado el dato más cercano se halla para un caudal teórico de  $Q_{teo} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ .
  - En el caso de resalto no rechazado es donde se dan los valores más alejados de la teoría, siendo los más cercanos de estos los hallados a partir de  $Q_{teo} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{teo} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- En pendiente suave (+ 4%).
  - En el resalto sumergido:



- El obtenido a partir de un  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ , en suave está muy próximo a la pendiente horizontal, aunque por contra del hallado en pendiente fuerte, este primero se encuentra por debajo de la línea.
- Entre las distintas pendientes se dan valores muy parecidos.
- Para resalto rechazado:
  - En pendiente suave se da un resultado parecido al análogo en fuerte pero con mayor cercanía a la línea horizontal.
- En el caso de resalto no rechazado:
  - Es este caso la mejoría con respecto al mismo dato pero en fuerte, es apreciable. Acercándose más a pendientes propuestas.

b) Pendiente Suave + 8‰:

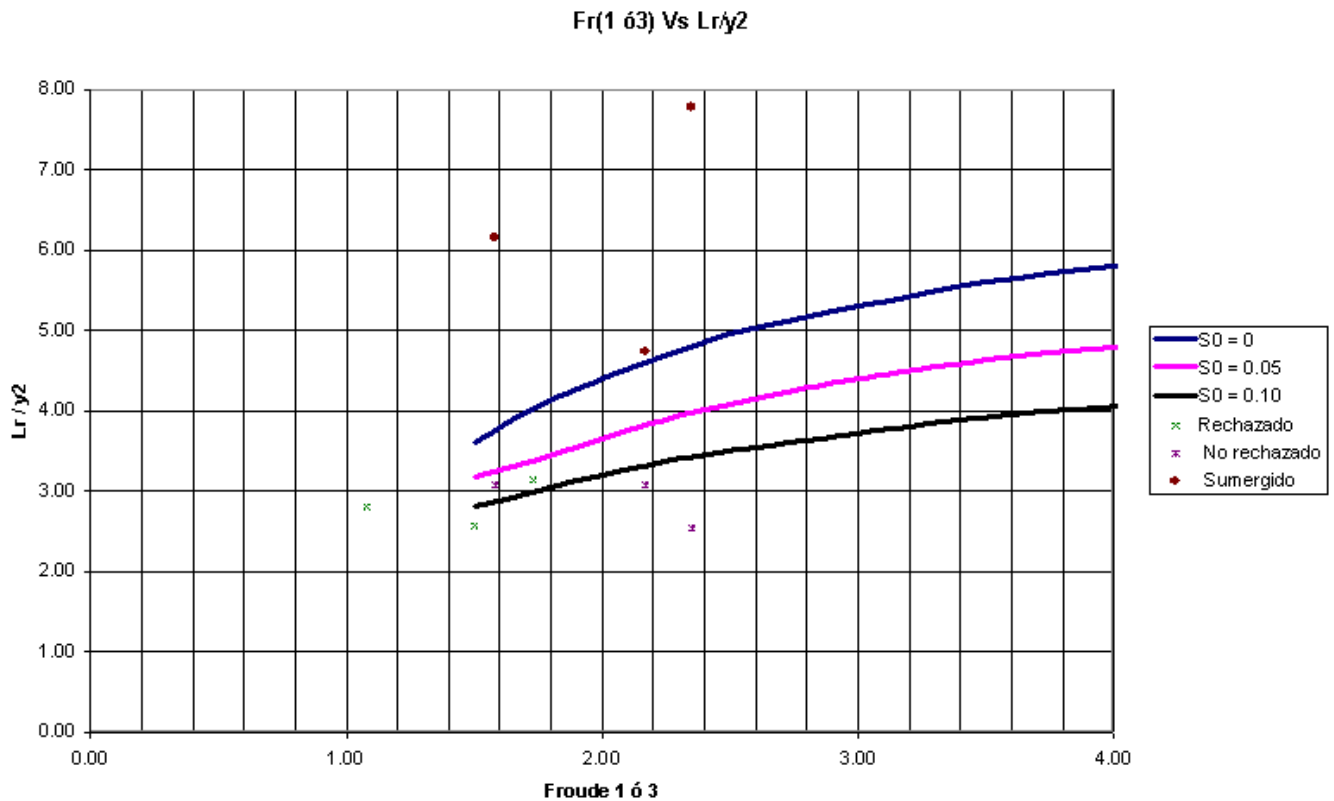


Gráfica 7

- En el caso de resalto sumergido los valores más próximos son los hallados a partir de  $Q_{teo} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- En resalto rechazado se da el valor más aproximado para esta pendiente, siendo dicho valor el referido a  $Q_{teo} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- En el caso de resalto no rechazado el valor más próximo es el dato para un  $Q_{teo} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ , aunque este se encuentra más cerca de una pendiente de un 5%.



c) Pendiente Fuerte + 8‰:



Gráfica 8

- Algunos datos se van homogenizando más cerca de la pendiente horizontal.
- Para el resalto sumergido en valor más próximo es para un  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ , aunque este se encuentra un poco por encima de la horizontal.
- En el resalto rechazado es donde se dan resultados más concordantes, siendo para  $Q_{teo} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{teo} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$  los mejores datos.
- En resalto no rechazado el valor más cercano es el de  $Q_{teo} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ , estando los otros dos puntos en una situación bastante alejada de las pendientes que se están manejando.

d) Conclusión:

- Conclusión de pendiente fuerte(+ 8‰):
  - a) Cuando se aumenta la pendiente, también se incrementa el Froude, dando esto lugar a que los puntos en el rechazo sumergido y no rechazado se desplacen hacia la derecha, siendo esto sinónimo de valores menos exactos en algunos casos.
  - b) También al aumentar la pendiente se incrementa en el resalto sumergido la relación  $Lr / y_2$ , dando esto lugar a que se



dispersen un poco más estos datos. Esto ocurre para una pendiente fuerte  $+ 8\%$ , mientras que para la pendiente suave  $+ 8\%$  ocurre lo contrario.

- c) Para finalizar se puede concluir diciendo que aunque como se puede observar una existente dispersión de datos por el gráfico, esto será debido a ciertos errores. Pero también se tiene que tener en cuenta que se está trabajando con un rango de Froude donde los datos son muy variables. Esto se ve en que la gráfica de donde se han sacado las curvas de las pendientes, para estos rangos de Froude está en líneas discontinuas. Esta conclusión hace pensar que en cierta medida los datos hallados no están tan lejos de la realidad.
- Conclusión de pendientes suaves( $+ 4\%$ ):
  - a) Al realizar el análisis para pendientes suaves se obtienen resultados con mejor grado de aproximación a los trabajos experimentales expuestos.
  - b) Aunque sean mejores los datos para pendientes suaves, no son lo suficientemente buenos para contrastar certeramente los trabajos experimentales.

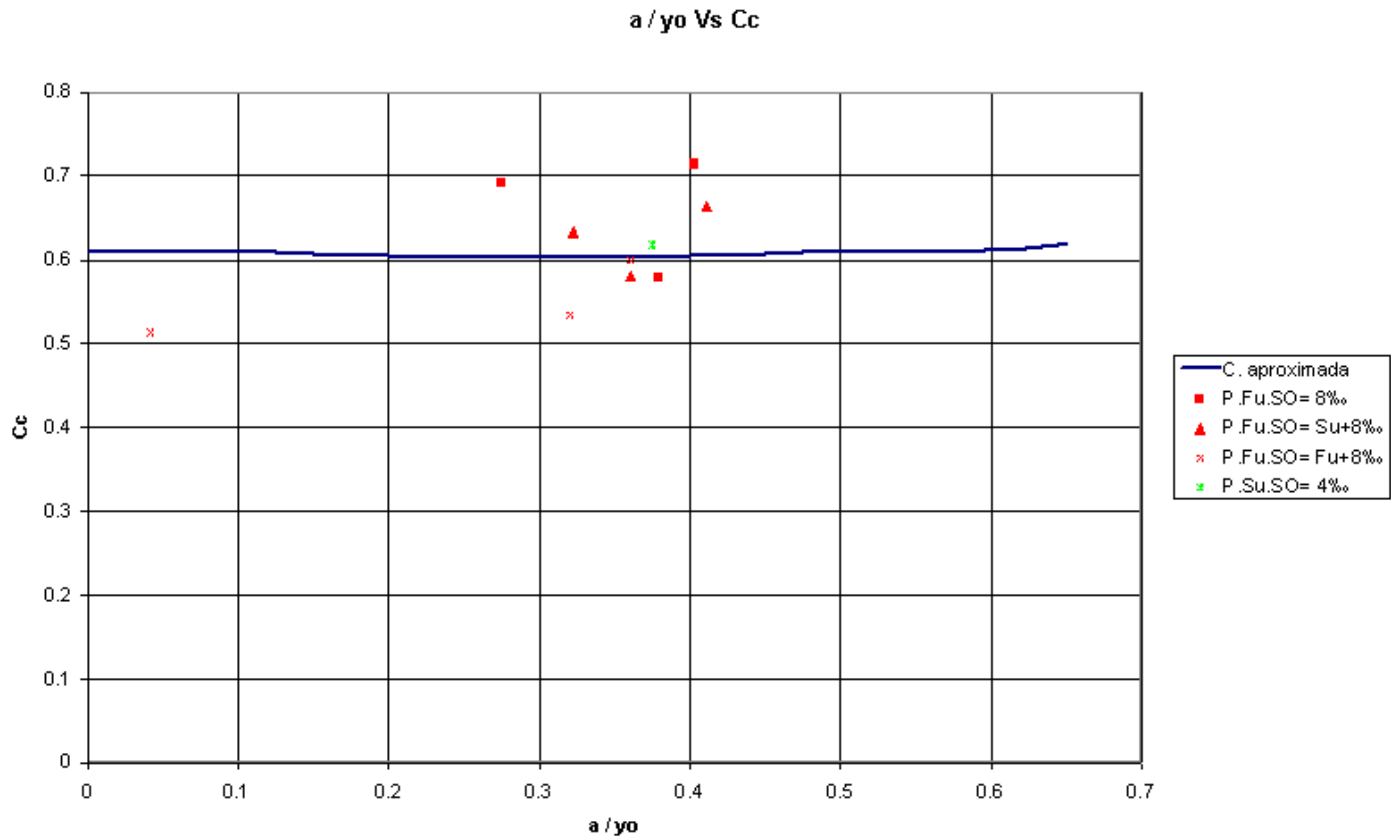




#### 5.4.5 Comparación de $C_{c\text{teórico}}$ Vs $C_{c\text{práctico}}$

Por último se van a comparar los coeficientes de contracción para el resalto sumergido. Este coeficiente es función de la abertura de compuerta y el calado que existe aguas arriba de esta, es decir:  $C_c = f(a / y_o)$ .

A continuación se muestra la gráfica donde se recogen todos los datos que han tenido lugar en este análisis.



Gráfica 9

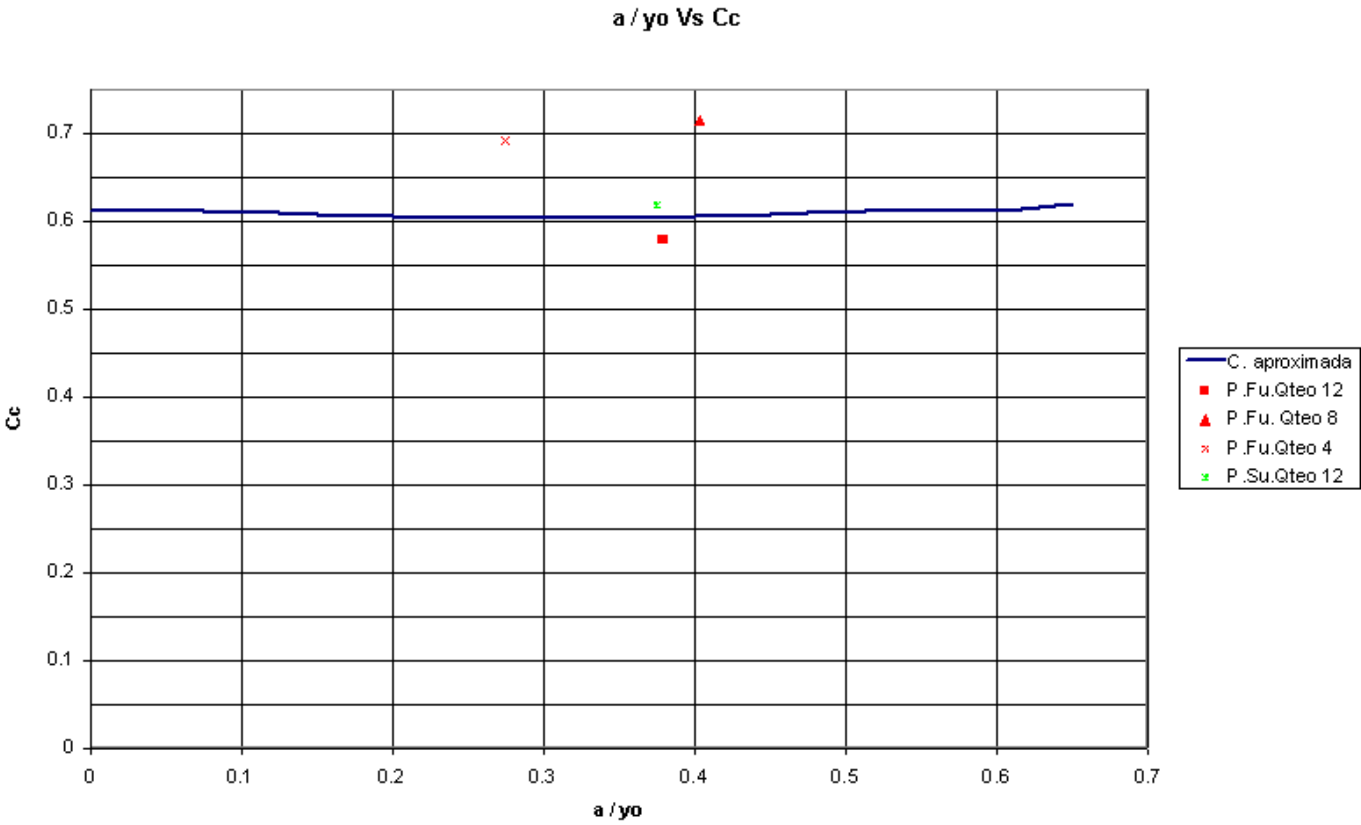
Para realizar un análisis más en detalle se muestran los datos separados por pendientes. A diferencia de los otros dos análisis, aquí se expondrán las tres gráficas seguidas, siendo el orden:

- 1ª (Gráfica 10) Pendiente horizontal (+ 8‰, + 4‰).
- 2ª (Gráfica 11) Pendiente suave. (+ 8‰).
- 3ª (Gráfica 12) Pendiente fuerte. (+ 8‰).

Nota: Los gráficos con sus tablas de datos se muestran en su anejo correspondiente.

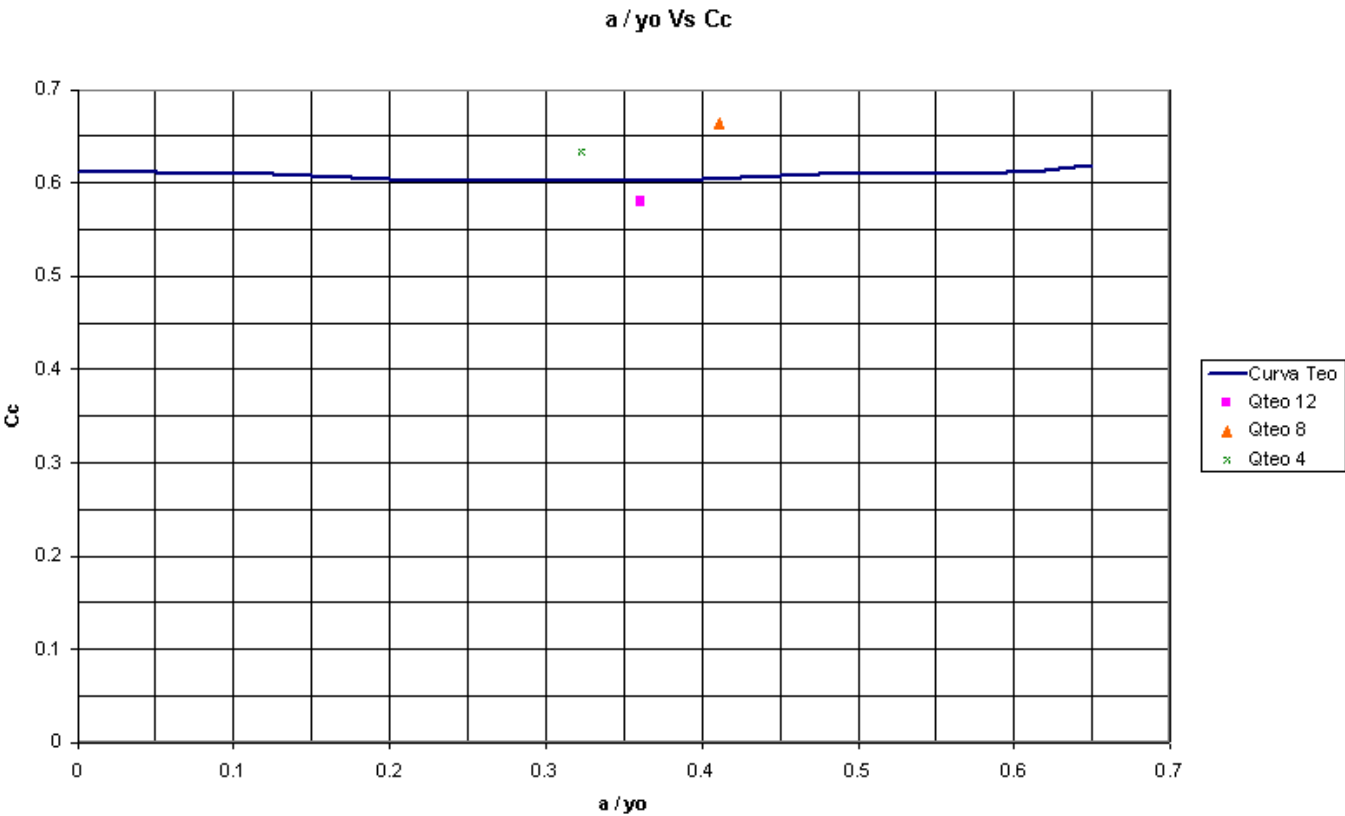


1ª



Gráfica 10

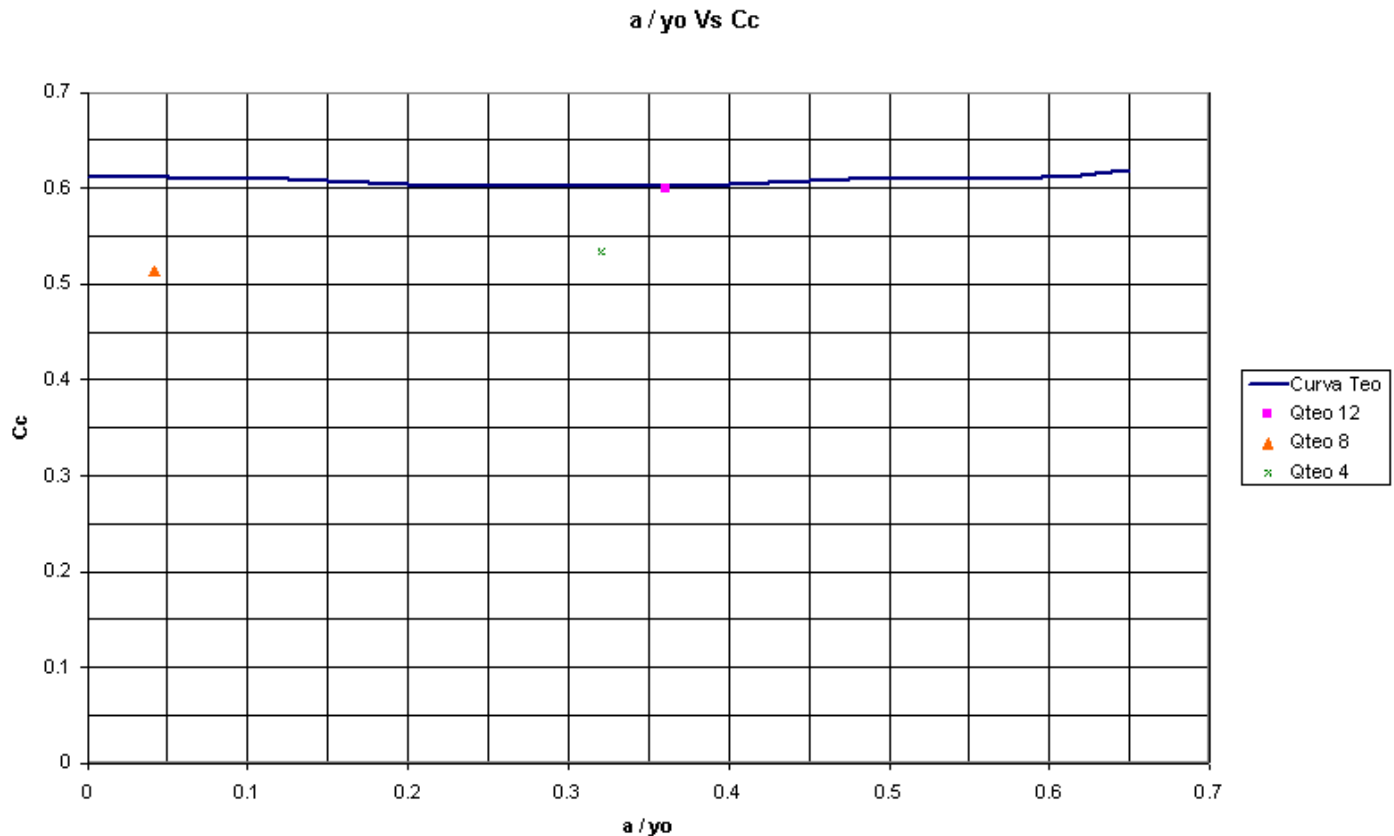
2ª



Gráfica 11



3ª



Gráfica 12

a) Comparación entre caudales:

- Para pendiente fuerte (+ 8‰).
  - Los mejores resultados se obtienen para un  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{teo} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que para el  $Q_{teo} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ , los valores se desfasan.
- Para pendiente Suave (+ 4‰).
  - El dato obtenido para un  $Q_{teo} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$  está muy próximo del hallado en fuerte, salvo que está por encima de la línea.

b) Comparación entre pendientes:

- Para pendientes horizontales + 8‰ y fuertes + 8‰ los datos obtenidos están más cercanos a la teoría, siendo estos últimos los mejores de entre estos dos. Mientras que para pendientes de suave + 8‰ se desfasan.

c) Conclusión:

- Para pendiente fuerte (+ 8‰).
  - En general los datos obtenidos de  $C_c$  no presentan una discordancia muy grande con la teoría, estando siempre entre un intervalo de 0.5 a 0.7, siendo el valor teórico al que deberían tender de 0.6.
  - Los valores de  $C_c$  teóricos aquí expuestos son los sacados de medidas no corregidas, esto es debido a dos motivos:



- a) Primero: En algunas tablas de valores corregidos estos valores no se pueden hallar, debido a que sale una energía mayor en la sección 1 que en la sección 0 lo cual es imposible.
- b) Segundo: Los valores de las tablas no corregidas dan errores menores, aproximándose así mejor a la teoría.
- Por último decir que:
  - a) A pendientes pequeñas los valores de  $C_{p\text{r}\acute{a}c\text{t}\text{i}c\text{o}s}$  son mejores los obtenidos a partir de tablas  $V_{\text{max}}$  sin corregir.
  - b) En pendientes suaves son mejores los hallados a partir de  $V_{\text{max}}$  sin corregir para  $Q_{\text{teo}} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{\text{teo}} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $V_{\text{med}}$  sin corregir para  $Q_{\text{teo}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ .
  - c) Para pendientes fuertes son mejores los datos sacados de  $V_{\text{med}}$  sin corregir para unos caudales de  $Q_{\text{teo}} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{\text{teo}} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$  y para  $Q_{\text{teo}} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$  el obtenido de  $V_{\text{max}}$  sin corregir.
- Para pendiente Suave(+ 4‰).
  - Los resultados obtenidos para similares condiciones, en el trabajo experimental son parecidos para ambas pendientes.
  - Se comprueba que el valor experimental más óptimo se da para un  $Q_{\text{teo}} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ .

NOTA: Todas las tablas a las que se hace referencia en el punto 5.4 están en el anejo correspondiente a esta unidad.



## 5.5 Modelización de campañas mediante HEC-RAS.

### 5.5.0 Introducción:

En este apartado se van a modelizar las campañas que cumplen los requisitos para ello, se ha utilizado el Programa de Cálculo de Flujo Unidimensional Gradualmente Variado, HEC-RAS, del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos “HEC-RAS (2003)” En el punto siguiente se citarán las campañas que no son aptas primero para ser modelizadas y segundo de aquellas modelizadas las que no son válidas para el análisis.

El objetivo de la modelización es comparar el calado teórico corregido ( $y_{2tc}$ ) con el obtenido en el programa ( $y_{2HR}$ ), para unas condiciones de contorno dadas. Estas condiciones son los calados teóricos corregidos aguas arriba y abajo, hallados con los parámetros reales del canal, para los caudales establecidos.

En el desarrollo anteriormente comentado, al introducir los parámetros (calados y secciones de canal), no se van a obtener unos resultados concordes con los experimentales. Debido a esto, se fijará como parámetro de ajuste del modelo la longitud de curva de remanso práctica ( $C1_{prac}$ ). Con el fin de hallar resultados semejantes.

Al imponer esta condición, el programa debido a ciertas limitaciones (se está trabajando con valores muy pequeños y este ha sido diseñado para valores bastante superiores), no acepta el valor de,  $C1_{prac}$ , exacto. Esto conlleva a que se obtenga un valor de longitud de curva de remanso distinta a la real, llamándose esta nueva longitud  $C1_{HR}$ .

El valor de  $C1_{HR}$  es generalmente aproximado, aunque en algunas modelizaciones se desfasa, lo que desencadenará que dicha modelización sea anulada. Con el fin de saber cuándo ocurre esto, se tomará como valor límite del error entre  $C1_{prac}$  y  $C1_{HR}$  un 70%. El valor dado del error, aunque parezca alto, considera todos los errores groseros que se han podido dar a la hora de la obtención del parámetro (medida del  $C1_{prac}$ , falta de precisión del programa, etc).

### 5.5.1 Modelizaciones omitidas:

Se omitirán para la modelización las campañas que presenten esta característica:

- Todas las campañas en las que no se puede calcular el  $y_{2tc}$  debido a que la carga de velocidad de presión en el pitot es demasiado pequeña. Estas campañas son:
  - o De la campaña Horizontal (+8‰) Rechazado, los caudales teóricos 8 y 4.
  - o De la campaña Suave (+8‰) Rechazado, los caudales teóricos 8 y 4.
  - o De la campaña Fuerte (+8‰) Rechazado, los caudales teóricos 12, 8 y 4.

Nota: Las tablas de resultado obtenidos en la modelización se encuentran en su anexo correspondiente.

### 5.5.2 Modelizaciones omitidas para el análisis:

No se tendrán en cuenta las siguientes campañas modelizadas:

- Las campañas en las que el error debido a la curva de remanso  $C1_{HR}$  sea superior al 70%. Siendo estas campañas:
  - o La campaña Horizontal (+8‰) No Rechazado Q4, error de un 141.67%.
  - o La campaña Suave (+ 8‰) No Rechazado Q8, error de un 110%.
  - o Nota: Estos valores de error no se pueden reducir, debido a que al aumentar el calado de aguas abajo para ir fijando la curva de remanso  $C1_{prac}$  se sumerge el resalto, siendo los valores límites de los calados antes de sumergirse los expuestos en la tabla.



### 5.5.3 Ejemplo-resumen de una modelización.

En este apartado se van a exponer los distintos pasos que se han realizado para la elaboración para cada una de las modelizaciones. Los pasos a seguir son:

1º Hacer una tabla donde se especifiquen todos los parámetros de entrada al programa como son:

- Cotas de los puntos definitorios de la sección transversal.
- Distancias entre secciones transversales
- Condiciones de contorno, aguas arriba y abajo.

A continuación se muestra un ejemplo para pendiente horizontal + 8 %, con resalto rechazado en  $Q_{12}$ .

|    | A                                   | B             | C                                   | D         | E                                                                            | F         | G          | H | I          | J                           | K         | L        | M            | N      | O           |
|----|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|---|------------|-----------------------------|-----------|----------|--------------|--------|-------------|
| 1  | Tabla de datos de entrada a HEC-RAS |               |                                     |           | Condiciones: Pendiente horizontal (+ 8%), en resalto rechazado para $Q_{12}$ |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 2  |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 3  |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 4  |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 5  |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 6  |                                     | Centro        | Compuerta ?                         | S-1       | Apoyo                                                                        | S-2       | Desembalse |   |            | Centro                      | Compuerta | S-1      | Apoyo        | S-2    | Desembalse  |
| 7  | Cotas(cm)                           | 115.3         |                                     | 115.2     | 115.1                                                                        | 114.8     | 114.7      |   |            | Long(cm)                    | 0.0       | 58.0     | 74.7         | 125.0  | 176.0       |
| 8  | $\Delta$ Centro/S-1                 | 0.1           |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            | $\Delta$ Com/S <sub>1</sub> |           |          | 16.7         | 67.0   | 118.0       |
| 9  | Pen(Cen-S1)                         | 0.00134       |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 10 | Descenso                            |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 11 | hasta Comp                          | 0.07764       |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            | $\Delta$ longitud           |           |          |              |        |             |
| 12 | Cota                                |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            | entre                       |           |          |              |        |             |
| 13 | Compuerta                           | 115.22        |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            | Secciones                   | cm        | 16.7     | 50.3         | 51.0   | 35.0        |
| 14 |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            | m                           | 0.167     | 0.503    | 0.51         | 0.35   |             |
| 15 | $\Delta$ Comp/S <sub>1</sub>        | cm            | 0                                   | 0.02      | 0.12                                                                         | 0.42      | 0.52       |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 16 |                                     | m             | 0                                   | 0.0002236 | 0.0012236                                                                    | 0.0042236 | 0.00522356 |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 17 | Cota sección                        |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 18 | con ref =10                         |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 19 | en compuerta                        | solera        | 10.0000                             | 9.9998    | 9.9998                                                                       | 9.9958    | 9.9948     |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 20 |                                     | cota superior | 10.2500                             | 10.2498   | 10.2488                                                                      | 10.2458   | 10.2448    |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 21 |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 22 |                                     |               | Cálculo del Water surface elevation |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 23 |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 24 |                                     |               | Distancia de                        |           | Distancia relativa                                                           |           |            |   | Pendiente  |                             |           |          | Cota de      |        | Cota WS (m) |
| 25 |                                     |               | la compuerta                        |           | de la sección                                                                |           |            |   | tramo      |                             | Descenso  |          | y2           |        | ag. Abajo   |
| 26 |                                     |               | a y2 (m)                            | 1.35      | S-2                                                                          | a y2      | 0.17       |   | S-2 / Dese | 0.00286                     | en y2     | 0.000486 | con respecto | 9.995  | 10.075      |
| 27 |                                     |               |                                     |           | a Desemb                                                                     |           | 0.35       |   |            |                             |           |          | a S2         |        |             |
| 28 |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          | y2teo corr   | 0.0797 |             |
| 29 |                                     |               |                                     |           | Cota WS (m)                                                                  |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 30 |                                     |               | y1 teo corr                         | 0.0309    | ag. Arriba                                                                   | 10.0309   |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |
| 31 |                                     |               |                                     |           |                                                                              |           |            |   |            |                             |           |          |              |        |             |

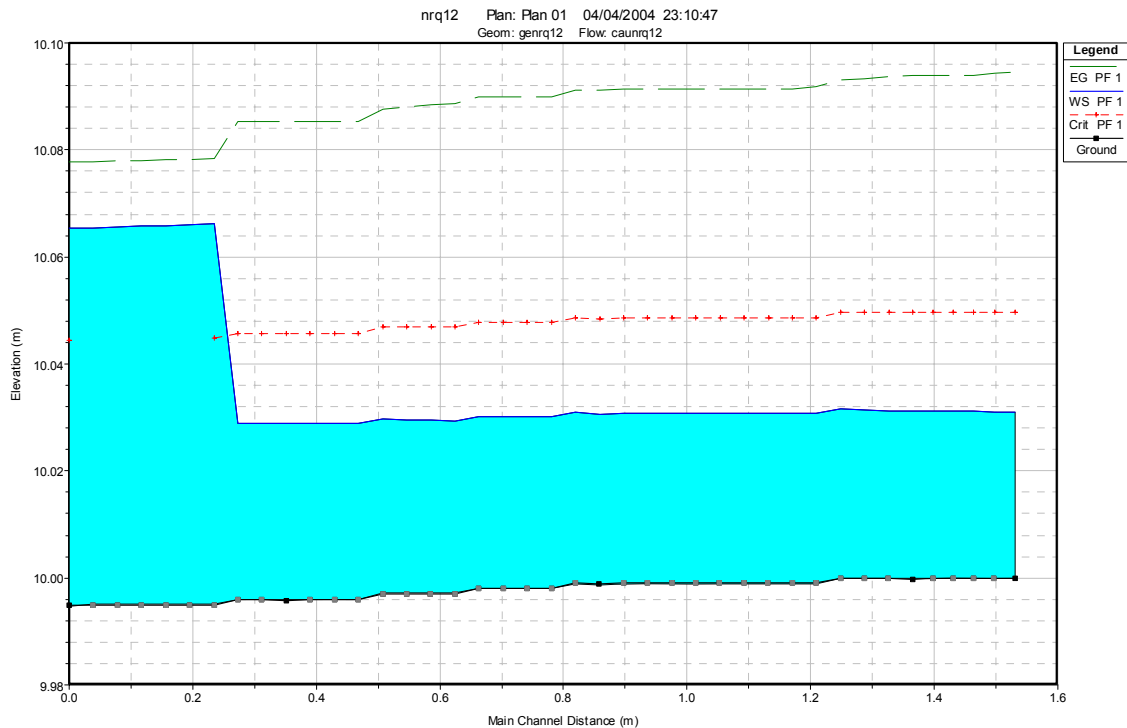
2º Una vez insertados estos datos y con las condiciones de imponer la C1 se obtienen dos tipos de salidas.

- Primeramente una tabla de los datos de cada modelización, donde se muestran:
  - o La longitud donde se produce el resalto  $C1_{HR}$ .
  - o Calado en cada sección.
  - o El momentum de cada sección: Para que se produzca el resalto, el momentum existente en las dos secciones donde se produce debe ser el mismo.  
En ocasiones en la modelización no es justamente este. Esto puede ser debido a la poca precisión del programa, para estos caudales, ya que, un resalto se produce a igualdad de momentos.
  - o Esto se puede observar en las tablas correspondientes. Continuando con el ejemplo.



| Tabla de datos de salida del HEC-RAS |         |             |              |        |             |             |          |        |             | Condiciones: Pendiente horizontal (+ 8%), en resalto rechazado para Qto=4 |           |        |             |           |           |            |             |           |              |
|--------------------------------------|---------|-------------|--------------|--------|-------------|-------------|----------|--------|-------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-------------|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|--------------|
| River Sta                            | Profile | Length Chnl | T. length nc | error  | e. acumels. | T. length c | Q Total  | Área   | Dist.C.D.G. | Min Ch El                                                                 | W.S. Elev | Calado | Momentum    | Crit W.S. | E.G. Elev | E.G. Slope | Vel Chnl    | Top Width | Froude # Chl |
| (m)                                  |         | (m)         | (m)          |        |             | (m)         | (m³/s)   | (m²)   |             | (m)                                                                       | (m)       | (m)    | (m³)        | (m)       | (m)       | (m/m)      | (m/s)       | (m)       |              |
| 100                                  | PF 1    | 0.03        | 0.03         | 0.002  | 0.002       | 0.03        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.117.224   | 0.08      | 2.02         |
| 96.*                                 | PF 1    | 0.03        | 0.03         | 0.002  | 0.002       | 0.03        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.114.016   | 0.08      | 2.01         |
| 92.*                                 | PF 1    | 0.03        | 0.07         | 0.002  | 0.002       | 0.06        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.110.250   | 0.08      | 2            |
| 88.*                                 | PF 1    | 0.03        | 0.10         | 0.002  | 0.002       | 0.09        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.110.250   | 0.08      | 2            |
| 84.*                                 | PF 1    | 0.03        | 0.13         | 0.002  | 0.002       | 0.12        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.110.250   | 0.08      | 2            |
| 80                                   | PF 1    | 0.04        | 0.17         | 0.002  | 0.002       | 0.16        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.110.250   | 0.08      | 2            |
| 76.4615*                             | PF 1    | 0.04        | 0.21         | 0.0008 | 0.0008      | 0.21        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.106.427   | 0.08      | 1.93         |
| 76.3230*                             | PF 1    | 0.04        | 0.25         | 0.0008 | 0.0015      | 0.25        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.102.503.0 | 0.08      | 1.98         |
| 75.3846*                             | PF 1    | 0.04        | 0.29         | 0.0008 | 0.0023      | 0.29        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.098.497   | 0.08      | 1.97         |
| 73.8461*                             | PF 1    | 0.04        | 0.33         | 0.0008 | 0.0031      | 0.32        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.095.719   | 0.08      | 1.96         |
| 72.3076*                             | PF 1    | 0.04        | 0.37         | 0.0008 | 0.0038      | 0.36        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 70.7692*                             | PF 1    | 0.04        | 0.40         | 0.0008 | 0.0046      | 0.40        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 69.2307*                             | PF 1    | 0.04        | 0.44         | 0.0008 | 0.0054      | 0.44        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 67.6923*                             | PF 1    | 0.04        | 0.49         | 0.0008 | 0.0062      | 0.49        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 66.1538*                             | PF 1    | 0.04        | 0.52         | 0.0008 | 0.0069      | 0.51        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 64.6153*                             | PF 1    | 0.04        | 0.56         | 0.0008 | 0.0077      | 0.55        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 63.0769*                             | PF 1    | 0.04        | 0.60         | 0.0008 | 0.0085      | 0.59        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 61.5384*                             | PF 1    | 0.04        | 0.64         | 0.0008 | 0.0092      | 0.63        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 60                                   | PF 1    | 0.04        | 0.68         | 0.0008 | 0.0100      | 0.67        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.091.517   | 0.08      | 1.95         |
| 58.4615*                             | PF 1    | 0.04        | 0.72         | 0.0008 | 0.0108      | 0.71        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.087.664   | 0.08      | 1.94         |
| 56.9230*                             | PF 1    | 0.04        | 0.76         | 0.0008 | 0.0116      | 0.75        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.084.152   | 0.08      | 1.93         |
| 55.3846*                             | PF 1    | 0.04        | 0.79         | 0.0008 | 0.0124      | 0.79        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.084.152   | 0.08      | 1.93         |
| 53.8461*                             | PF 1    | 0.04        | 0.83         | 0.0008 | 0.0132      | 0.83        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.084.152   | 0.08      | 1.93         |
| 52.3076*                             | PF 1    | 0.04        | 0.87         | 0.0008 | 0.0140      | 0.87        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.084.152   | 0.08      | 1.93         |
| 50.7692*                             | PF 1    | 0.04        | 0.91         | 0.0008 | 0.0148      | 0.91        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.080.311   | 0.08      | 1.92         |
| 49.2307*                             | PF 1    | 0.04        | 0.95         | 0.0008 | 0.0156      | 0.95        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.075.723   | 0.08      | 1.91         |
| 47.6923*                             | PF 1    | 0.04        | 0.99         | 0.0008 | 0.0164      | 0.99        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.071.020   | 0.08      | 1.9          |
| 46.1538*                             | PF 1    | 0.04        | 1.03         | 0.0008 | 0.0172      | 1.03        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.066.206   | 0.08      | 1.89         |
| 44.6153*                             | PF 1    | 0.04        | 1.07         | 0.0008 | 0.0180      | 1.07        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.061.686   | 0.08      | 1.85         |
| 43.0769*                             | PF 1    | 0.04        | 1.11         | 0.0008 | 0.0188      | 1.11        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.051.686   | 0.08      | 1.85         |
| 41.5384*                             | PF 1    | 0.04        | 1.15         | 0.0008 | 0.0196      | 1.15        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.051.686   | 0.08      | 1.85         |
| 40                                   | PF 1    | 0.04        | 1.18         | 0.0008 | 0.0204      | 1.18        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.051.686   | 0.08      | 1.85         |
| 37.7777*                             | PF 1    | 0.04        | 1.22         | 0.001  | 0.001       | 1.22        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.051.686   | 0.08      | 1.85         |
| 35.5555*                             | PF 1    | 0.04        | 1.26         | 0.001  | 0.002       | 1.26        | 0.002766 | 0.0024 | 0.015       | 10.00                                                                     | 10.03     | 0.03   | 0.000360956 | 10.05     | 10.03     | 0.02       | 1.051.686   | 0.08      | 1.85         |
| 33.3333*                             | PF 1    | 0.04        | 1.30         | 0.001  | 0.003       | 1.30        | 0.002766 | 0.0056 | 0.035       | 10.00                                                                     | 10.07     | 0.07   | 0.000335267 | 10.04     | 10.08     | 0          | 0.468221    | 0.08      | 0.58         |
| 31.1111*                             | PF 1    | 0.04        | 1.34         | 0.001  | 0.004       | 1.34        | 0.002766 | 0.0056 | 0.035       | 10.00                                                                     | 10.07     | 0.07   | 0.000335267 | 10.08     | 10.08     | 0          | 0.469178    | 0.08      | 0.59         |
| 28.8888*                             | PF 1    | 0.04        | 1.38         | 0.001  | 0.006       | 1.37        | 0.002766 | 0.0056 | 0.035       | 10.00                                                                     | 10.07     | 0.07   | 0.000335267 | 10.08     | 10.08     | 0          | 0.490141    | 0.08      | 0.59         |
| 26.6666*                             | PF 1    | 0.04        | 1.42         | 0.001  | 0.007       | 1.41        | 0.002766 | 0.0056 | 0.035       | 10.00                                                                     | 10.07     | 0.07   | 0.000335267 | 10.08     | 10.08     | 0          | 0.491017    | 0.08      | 0.59         |
| 24.4444*                             | PF 1    | 0.04        | 1.46         | 0.001  | 0.008       | 1.45        | 0.002766 | 0.0056 | 0.035       | 10.00                                                                     | 10.07     | 0.07   | 0.000335267 | 10.08     | 10.08     | 0          | 0.492086    | 0.08      | 0.59         |
| 22.2222*                             | PF 1    | 0.04        | 1.50         | 0.001  | 0.009       | 1.49        | 0.002766 | 0.0056 | 0.035       | 10.00                                                                     | 10.07     | 0.07   | 0.000335267 | 10.08     | 10.08     | 0          | 0.493076    | 0.08      | 0.59         |
| 20                                   | PF 1    | 0.04        | 1.54         | 0.001  | 0.010       | 1.53        | 0.002766 | 0.0064 | 0.040       | 3.99                                                                      | 10.07     | 0.08   | 0.000377858 | 10.04     | 10.08     | 0          | 0.491422    | 0.08      | 0.59         |
| 45                                   |         |             |              |        |             |             |          |        |             |                                                                           |           |        |             |           |           |            |             |           |              |
| 46                                   |         |             |              |        |             |             |          |        |             |                                                                           |           |        |             |           |           |            |             |           |              |
| 47                                   |         |             |              |        |             |             |          |        |             |                                                                           |           |        |             |           |           |            |             |           |              |
| 48                                   |         |             |              |        |             |             |          |        |             |                                                                           |           |        |             |           |           |            |             |           |              |
| 49                                   |         |             |              |        |             |             |          |        |             |                                                                           |           |        |             |           |           |            |             |           |              |
| 50                                   |         |             |              |        |             |             |          |        |             |                                                                           |           |        |             |           |           |            |             |           |              |
| 51                                   |         |             |              |        |             |             |          |        |             |                                                                           |           |        |             |           |           |            |             |           |              |
| 52                                   |         |             |              |        |             |             |          |        |             |                                                                           |           |        |             |           |           |            |             |           |              |

- Por último, en el anejo correspondiente se muestra el perfil longitudinal de la campaña modelizada. Aquí se puede visualizar la línea de energía (verde) como el calado crítico (rojo). Siendo en el ejemplo tratado, el de la siguiente figura.





#### 5.5.4 Análisis de las campañas modelizadas:

##### 5.5.4.1 Modelización en pendiente fuerte (+ 8‰):

- Para resalto no rechazado + 8 ‰ :
  - Horizontal + 8 ‰:
    - Para el Q12 el error al aproximar la curva de remanso es de un 3.5% y para los calados es de un 17.5%, estos valores de error son bastante aceptables.
    - Para el Q8 aunque el error en la curva sea de un 61%, en los calados es de un 22.5% siendo este valor aproximado a la realidad
  - Suave + 8 ‰ :
    - En el Q12 el error obtenido en la curva de remanso es de un 55%, se va acercando al límite establecido, a pesar de esto se obtiene un error en los calados de un 18% que no está mal.
    - Para el Q4 el valor del error en curva es de un 40%, siendo en calados de un 10%, como se observa la cercanía de los calados es apreciable.
  - Fuerte + 8 ‰:
    - En Q12 se tiene un error curva de un 25% y en calados de un 18%. Aquí se observa que casi el error cometido a la hora de poner la curva de remanso es parecido al obtenido en los calados.
    - En Q8 el error de las curvas es de un 38% mientras que para los calados es de un 23%. Se va aumentando el valor de los errores, aunque están dentro de lo aceptable.
    - Para Q4 el valor del error en la curva es de un 62% y para calados es de un 34%. El error de curva aumenta hasta el límite, aunque el error de los calados no se incrementa tanto como este último y posee un valor moderado.
  - Resumen: Generalmente se obtienen valores errores de curvas de remanso, menores para los caudales altos, lo que también ocurre para valores de los calados. La excepción a ello está en la campaña suave, en la que se invierten estos valores.
- Para resalto rechazado + 8 ‰:
  - Horizontal + 8 ‰ con Q12: El error obtenido en la curva de remanso es solo de un 5% mientras que en los calados es de un 12%. En esta campaña se obtienen valores bastantes aproximados.
  - Suave + 8 ‰ con Q12: El error en la curva de remanso es de un 4%, mientras que para el calado el error sube hasta un 36%.
  - Resumen: En la campaña de rechazados los errores de la curva de remanso muy bajos. Este error tan bajo de error en curva solo se traslada a error pequeño en calados en campaña horizontal Q12, mientras que para suave Q12 el error de calados es ligeramente superior.
  - Conclusión en pendiente fuerte, para resalto no rechazado y rechazado: En rasgos generales para las campañas rechazadas se dan unos valores de errores en los calados menores que en las campañas no rechazadas. Aunque se sigue manteniendo que existe un punto discordante, para la campaña suave, donde se invierte esta tónica. También se debe comentar que los errores cometidos en las campañas no rechazados para iguales calados y distintas pendientes son muy parecidos (a excepción de la campaña suave con Q4 que es un punto discordante en comparación con sus semejantes). La explicación a este fenómeno radica





en que las distintas pendientes expuestas tienen poca diferencia entre sí para la precisión del programa. Por ello las tomará muy parecidas a la hora de hacer la modelización.

- Para resalto sumergido + 8 ‰:
  - La comparación para el resalto sumergido se va a hacer directamente entre calados iguales de distinta campaña (horizontal, suave y fuerte). Esto es debido a se obtienen valores muy próximos:
    - o En el Q12 el error medio es de un 42% aproximadamente.
    - o Para el Q8 el error medio es de un 46% aproximadamente.
    - o Para el Q4 el error medio es de un 61% aproximadamente.
  - Conclusión entre estas distintas campañas en resalto sumergido:
    - o Como se ha dicho anteriormente los errores entre calados iguales y de distinta campaña son muy parecidos. Pero los menores errores que se dan es para la campaña de pendiente fuerte. Esto puede ser ocasionado porque el programa ya va entrando en valores de pendientes para los cuales ha sido diseñado.

#### 5.5.4.2 Modelización en pendiente suave (+ 4‰):

- Para resalto no rechazado + 4‰:
  - o En el Q12 el error de la curvas de remanso es de un 45%, mientras que para los calados es de un 18%.
  - Resumen: Como se puede apreciar para este valor un poco elevado de error en la curva de remanso, se obtiene un error bastante bueno para los calados.
- Para resalto rechazado + 4‰:
  - o Para el Q12 se obtiene un valor de error de curva de remanso de 2% y en los calados de un 4%.
  - Resumen: Los valores de los errores son muy pequeños y además se puede asumir que el valor del error en los calados será en medida por el error debido a la curva de remanso.
- Para resalto sumergido + 4‰:
  - o Para el Q12, el error es de un 44%.
  - Resumen: Aunque el error parezca bastante elevado, está dentro de los límites admitidos.

#### 5.5.4.3 Comparación entre modelizaciones en pendiente fuerte (+ 8‰) y suave (+ 4‰): Esta comparación solo se hará para el Q12, ya que es el único que se ha realizado en régimen subcrítico.

- Para resalto no rechazado horizontal:
  - o En este caso el error obtenido en pendiente suave es mayor que en pendiente fuerte.



- Para resalto rechazado:
  - Para pendiente suave el error es menor que para fuerte, sobretodo para el valor de los calados.

Conclusión:

El programa ha modelizado mejor el pendiente suave para resalto rechazado.

Mientras la modelización para resalto no rechazado es más exacta en pendiente fuerte sobre todo para el error de la curva, sin embargo para el error en el calado son prácticamente semejantes (17.45% en fuerte y 17.55% en suave)

- Para resalto sumergido:
  - Para el Q12, el error cometido es prácticamente el mismo (40% en fuerte y 44% en suave), aunque para pendiente fuerte u horizontal el valor modelizado es ligeramente mejor.

Conclusión:

En la modelización de resalto sumergido, por los datos obtenidos. Se puede extraer como conclusión que da igual si se parte de pendiente fuerte o de suave, debido a que esto no influye una vez esté el resalto sumergido, ya que se obtienen valores muy próximos.

Nota: En el anejo correspondiente, se muestran las distintas tablas de entrada y salida del programa. Así como distintos perfiles longitudinales.



## 6 CONCLUSIONES.

El objetivo, de este proyecto fin de carrera, ha sido principalmente la verificación de la formulación que rige el flujo gradualmente y bruscamente variado.

Con este fin, se ha realizado la comparación entre trabajos experimentales, ya contrastados, que definen dicha formulación y los datos obtenidos de las distintas campañas que se han realizado. Sin embargo a la hora de trabajar con estos datos y como consecuencia de las limitaciones y deflexiones existentes en el equipo experimental, han tenido que ser corregidos.

Por esta razón los resultados obtenidos no son todo lo buenos que se esperaba desde un principio. Aún así las conclusiones y aportaciones que se extraen de los distintos apartados del proyecto son:

### 6.1 Correcciones:

- A la hora de realizar las correcciones de los calados, en la mayoría de las campañas los errores disminuyen, aunque existe un porcentaje mínimo en el que hay un ligero ascenso.
- Esta corrección de calados, ocasiona que las velocidades se aproximen más a las reales. Sin embargo en ocasiones se desfasan o no se pueden hallar debido a:
  - La precisión del tubo pitot para caudales bajos no es muy buena.
  - Se haya podido producir un descebado del tubo por diferentes causas.

Nota: Estos dos puntos se dan de forma general tanto en pendiente de + 8‰ como de + 4‰.

### 6.2 Trabajos experimentales.

#### A) $y_2/y_1$ ó $y_2/y_3$ frente $Fr_1$ ó $Fr_3$ .

- Debido al error del equipo los resultados obtenidos se encuentran por encima de la pendiente que se ha desarrollado en las campañas.
- Los datos se agrupan en la pendiente de un 10% siendo los obtenidos en pendiente suave (+8‰) y en horizontal (+ 8‰, + 4‰) los que más se acercan.
- 

#### B) $Lr/y_2$ frente $Fr_3$ ó $Fr_1$ .

- Al igual que en el apartado anterior los datos se agrupan en la pendiente de un 10%, aunque aquí existe una mayor dispersión.
- La mayor dispersión ha podido ser ocasionada por la dificultad de obtener la longitud del resalto, aunque los errores al hallarlas no han sido elevados.
- Para pendientes suaves (+4‰) se obtienen resultados más óptimos.

#### - Conclusión de estos dos trabajos experimentales:

- Los resultados obtenidos distan de los teóricos.
- Los datos hallados no han servido para verificar los ensayos realizados por los distintos autores. Por lo tanto se ha resaltado que el equipo experimental posee limitaciones y errores que son muy difíciles de corregir.



- Aún así, se han podido sacar mediciones que son próximas a las teóricas, sobre todo para caudales altos y pendientes lo más horizontales posibles.
- Por último se tiene que comentar que se está trabajando en una zona que no está muy bien definida en los trabajos experimentales ya afianzados. Este motivo junto con los ya comentados, puede ser el motivo de que los resultados no hayan sido los esperados.

#### C) $C_{cTeórico}$ frente $C_{cPráctico}$ .

- Para pendientes horizontales (+ 8‰, + 4‰) y suaves (+8‰), con caudales teóricos de  $12\text{m}^3/\text{s}$  se han obtenido los mejores resultados.
- En este apartado la dispersión no es muy alta. Por ello los resultados obtenidos son bastante buenos.
- Se ratifica este trabajo teórico-experimental

#### 6.3 Modelización.

- La modelización ha servido para ratificar que los errores cometidos en el trabajo experimental solo se han podido corregir hasta un determinado nivel.
- El programa HEC-RAS, al estar trabajando en rangos muy pequeños de caudales y pendientes, no puede aportar datos muy precisos de las campañas realizadas.
- En la modelización al hacer una pequeña variación de las condiciones de contorno, se produce un gran salto en los resultados aportados por el programa.
- A pesar de todo lo comentado y teniendo en cuenta los errores cometidos, se puede extraer que:
  - La modelización da una idea global de los distintos aspectos tratados en el proyecto, ya que, se pueden visualizar los perfiles longitudinales modelizados.

#### 6.4 Trabajo didáctico.

Finalmente, se han tomado fotos y vídeo digitales de los principales tipos de flujo; editándose este material en CD para ser utilizados como material didáctico en las clases de Obras Hidráulicas y Aprovechamientos Hidráulicos.



## 7 REFERENCIAS.

**CASTILLO-E, L.G. (2002).** “Apuntes de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos”. Universidad Politécnica de Cartagena.

**NAUDASCHER, E. (2000).** “Hidráulica de canales. Diseño de estructuras”. Ed. Limusa

**VEN TE CHOW (1998).** “Hidráulica de canales abiertos”. Ed. McGraw-Hill.

**CANALES, A. (2000).** “Estudio teórico-experimental de los criterios metodológicos de adaptación del diseño de las presas con cuenco amortiguador de resalto o trampolín semisumergido, a caudales de avenida superiores a los de diseño”. Tesis Doctoral. ETSI de caminos, C. Y P. de Valencia UPV.

**RANGA RAJU, K.G. (1998).** “Flow Through Open Channels”. Ed. Tata McGraw-Hill.

**LOPEZ, L.A. (1997).** “Manual de hidráulica”. Universidad de Alicante.

**CANAL DE FLUJO. Ref. FL5.1 de 5m.** “Manual de usuario y Prácticas de laboratorio”.

**RIVER ANALYSIS SYSTEM. Developed by the U.S. Army Corps of Engineers. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (HEC-RAS, version 3.1.1 May 2003).** “Users Manual, Hydraulic Reference and Applications Guide”.