



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
CARTAGENA**



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE
INGENIERÍA TÉCNICA CIVIL**

***INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS
ESPECIALIDAD HIDROLOGÍA***

Proyecto Fin de Carrera

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE
DISTRIBUCIONES DE VELOCIDAD E ÍNDICES
TURBULENTOS DE ALGUNOS TIPOS DE
RESALTOS HIDRÁULICOS**

JOSÉ MARÍA CARRILLO SÁNCHEZ

Dirigido por:

D. LUIS G. CASTILLO ELSITDIÉ

Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P.

Cartagena, septiembre de 2004

ÍNDICE

I	RESUMEN	7
II	INTRODUCCIÓN.	16
II.1	Clasificación de flujos.	16
II.2	Labor experimental y descripción del proyecto.	17
II.2.1	Labor experimental	17
II.2.2	Descripción de elementos del equipo del canal.	17
II.2.3	Descripción de los elementos del medidor de velocidad acústico por Doppler ADV.	18
III	OBJETIVOS	19
IV	BASES TEÓRICAS	20
IV.1	Flujo en un canal. Conceptos fundamentales	20
IV.2	El resalto hidráulico o salto hidráulico.	24
IV.2.1	Definición de cantidad de movimiento específico	27
IV.2.2	Calados Conjugados o Alternos	30
IV.2.3	Tipos de resalto.	34
IV.2.4	Pérdida de energía	36
IV.2.5	Resalto sumergido	42
IV.2.6	Longitud del resalto hidráulico.	43
IV.2.7	El perfil superficial.	47
IV.2.8	Ecuaciones fundamentales del flujo turbulento y distribución de velocidades en un canal	48
IV.2.9	Significado y características del flujo turbulento en el resalto	53
IV.3	Estructuras de control	57
IV.3.1	Estructuras con flujo inferior	57
IV.3.1.1	Compuertas de flujo inferior con nivel libre aguas arriba y descarga libre	57
IV.3.1.2	Compuertas de flujo inferior con nivel libre aguas arriba y descarga sumergida	61
IV.3.2	Estructuras con flujo superior.	63
IV.3.2.1	Forma del perfil de vertederos de rebose o aliviaderos.	63
IV.3.2.2	Capacidad de descarga en los aliviaderos.	65
IV.3.2.3	Curva de capacidad de descarga en aliviaderos.	66
IV.3.2.4	Flujo a la salida de los aliviaderos.	66
IV.3.2.5	Aliviaderos sumergidos.	68
IV.4	Metodología ADV	70
IV.4.1	Introducción	70

IV.4.2	Método habitual biestático y transformación Doppler	70
IV.4.3	Geometría de los brazos y medida de velocidad 3D	72
IV.4.4	Definición del volumen de muestreo	72
IV.4.5	Procesamiento de pulso-coherente	73
IV.4.6	Datos de ADV	74
IV.4.6.1	Velocidad	74
IV.4.6.1.1	Rango de velocidad	75
IV.4.6.1.2	Muestreo	75
IV.4.6.1.3	Incertidumbre a corto plazo (ruido)	76
IV.4.6.1.4	Exactitud	76
IV.4.6.2	Intensidad de señal	77
IV.4.6.3	Coefficiente de correlación	77
IV.4.7	Programa de adquisición de datos en tiempo real (ADF.EXE)	78
IV.4.7.1	Archivo de Configuración de sonda.	78
IV.4.7.2	Modo de calibración.	78
IV.4.7.3	Modo de ajuste de límite.	80
IV.4.7.4	Modo de adquisición de datos	81
IV.4.7.5	Datos registrados	84
IV.4.8	WinADV. Programa de conversión de datos ADV.	84
IV.4.8.1	El programa de WinADV	84
IV.4.8.2	Opciones de programas	86
IV.4.8.3	Pantallas de salida gráfica del programa.	88
IV.4.8.4	Cálculo y significado de las estadísticas de salida de WinADV.	90
V	APORTACIONES AL LABORATORIO	94
V.1	Corrección del caudalímetro.	94
V.2	Construcción del soporte para la sonda ADV.	95
VI	TRABAJO EXPERIMENTAL	97
VI.1	Resaltos aguas abajo de una compuerta	97
VI.1.1	Resaltos cuya profundidad aguas abajo y_2' es igual a la profundidad y_2 secuente a y_1 .	97
VI.1.1.1	Caudal de 4,18 l/seg	97
VI.1.1.2	Caudal de 3,48 l/seg	105
VI.1.1.3	Caudal de 2,78 l/seg	107
VI.1.2	Resaltos cuya profundidad aguas abajo y_2' es mayor a la profundidad y_2 , secuente a y_1 . Resaltos sumergidos.	109
VI.1.2.1	Caudal de 4,18 l/seg	109
VI.1.2.2	Caudal de 3,48 l/seg	111
VI.1.3	Caudal de 2,78 l/seg	113
VI.2	Resaltos obtenidos aguas abajo de un aliviadero.	116
VI.2.1	Resaltos al pie de la estructura de control.	116
VI.2.1.1	Caudal de 4,18 l/seg	116
VI.2.1.2	Caudal de 3,48 l/seg	118
VI.2.1.3	Caudal de 2,78 l/seg	119
	Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos	

VI.2.2	Resaltos cuya sumergencia es igual a la mitad de la altura del aliviadero.	121
VI.2.2.1	Caudal de 4,18 l/seg	122
VI.2.2.2	Caudal de 3,48 l/seg	124
VI.2.2.3	Caudal de 2,78 l/seg	126
VI.2.3	Resaltos cuya sumergencia es igual a la altura del aliviadero.	128
VI.2.3.1	Caudal de 4,18 l/seg	128
VI.2.3.2	Caudal de 3,48 l/seg	130
VI.2.3.3	Caudal de 2,78 l/seg	132
VI.3	Comparación de los perfiles obtenidos.	135
VI.3.1	Comparación de perfiles para resalto no rechazado (estable).	135
VI.3.1.1	Mitad del resalto	135
VI.3.1.2	Final del resalto	135
VI.3.1.3	A 30 cm del final del resalto	135
VI.3.2	Comparación de perfiles para resalto sumergido.	136
VI.3.2.1	Inicio del resalto	136
VI.3.2.2	Mitad del resalto sumergido.	136
VI.3.2.3	Final del resalto sumergido.	137
VI.3.2.4	Perfiles a 30 cm del final del resalto sumergido	137
VI.3.3	Comparación de los perfiles de velocidades turbulentas.	138
VI.3.3.1	Resaltos no rechazados.	140
VI.3.3.2	Comparación de los perfiles de los resaltos sumergidos.	141
VI.3.3.3	Perfiles de velocidades turbulentas adimensionalizadas con la velocidad media.	141
VI.3.3.3.1	Comparación de perfiles turbulentos en mitad de resaltos clásicos.	142
VI.3.3.3.2	Comparación de perfiles turbulentos en la parte central de resaltos sumergidos.	142
VII	CONCLUSIONES	143
VII.1	Variables características.	143
VII.2	Conclusiones del trabajo experimental.	144
ANEJO 1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO.		145
ANEJO 2. GRÁFICAS COMPARATIVAS		181
A2.1	GRÁFICAS DE VELOCIDAD FRENTE CALADO	181
A2.2	GRÁFICAS COMPARATIVAS DE VELOCIDAD TURBULENTA ADIMENSIONAL FRENTE A CALADO RELATIVO	195

ANEJO 3. ANEJO FOTOGRÁFICO.	205
APÉNDICE 1. FLUJO GRADUALMENTE VARIADO EN CANAL. 208	
AP1.1 Ecuación dinámica de flujo gradualmente variado.	208
AP1.2 Características de los perfiles de flujo.	213
AP1.3 Clasificación de los perfiles de flujos.	216
AP1.4 Análisis previo al cálculo de la superficie libre del agua.	224
APÉNDICE 2. INFORMACIÓN ADICIONAL SOBRE RESALTOS.	229
AP2.1 Saltos Hidráulicos en Canales con Pendiente	229
AP2.2 Localización del resalto.	233
AP2.3 El resalto como disipador de energía.	235
BIBLIOGRAFÍA:	240

AGRADECIMIENTOS:

Han sido varias las personas que, de un modo u otro, contribuyeron a que este proyecto fin de carrera saliera adelante:

- Dr. Luis G. Castillo. Ha demostrado ser un gran profesional de la enseñanza, sabiendo motivar en los momentos en que el proyecto se estancó sin ningún avance en largo tiempo. Gracias a su total disposición, incluso en su época de vacaciones, este trabajo ha podido finalizarse con éxito.
- D. José Fco. García Cascales. Gracias por su ayuda en el tema informático, disponiendo un ordenador compatible con el equipo de muestreo, y por toda su colaboración.
- A Patricia, que me ha apoyado en todo momento, haciendo más llevadero el trabajo.
- A Juan Antonio, empleado del SAIT, que tan rápida y eficientemente construyó el soporte e hizo que el laboratorio estuviese menos solo.
- A los departamentos de Ingeniería Térmica y de Fluidos; Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica; e Ingeniería Química y Ambiental por prestarme material para la realización de determinadas partes del proyecto.
- A Javier Zamora, con quien realicé el aforo volumétrico, que me ha resuelto algunas dudas que surgieron.
- A Salvador Saura, que me enseñó el funcionamiento del canal.
- A mi hermano Pablo, que tantas veces me ha tenido que ceder el ordenador para que yo trabajase.
- A una madre, familia y amigos algo abandonados.

I RESUMEN

El contenido de este proyecto fin de carrera está dividido en tres partes fundamentales:

1. Una parte teórica inicial, que sirve de base para comprender los distintos apartados en que se divide este proyecto fin de carrera.
2. Una parte experimental en la que se contrastan los resultados obtenidos con la bibliografía y estudios afianzados.
3. Parte didáctica de toma fotográfica y videos para apoyar la labor docente de temas relacionados con este proyecto fin de carrera.

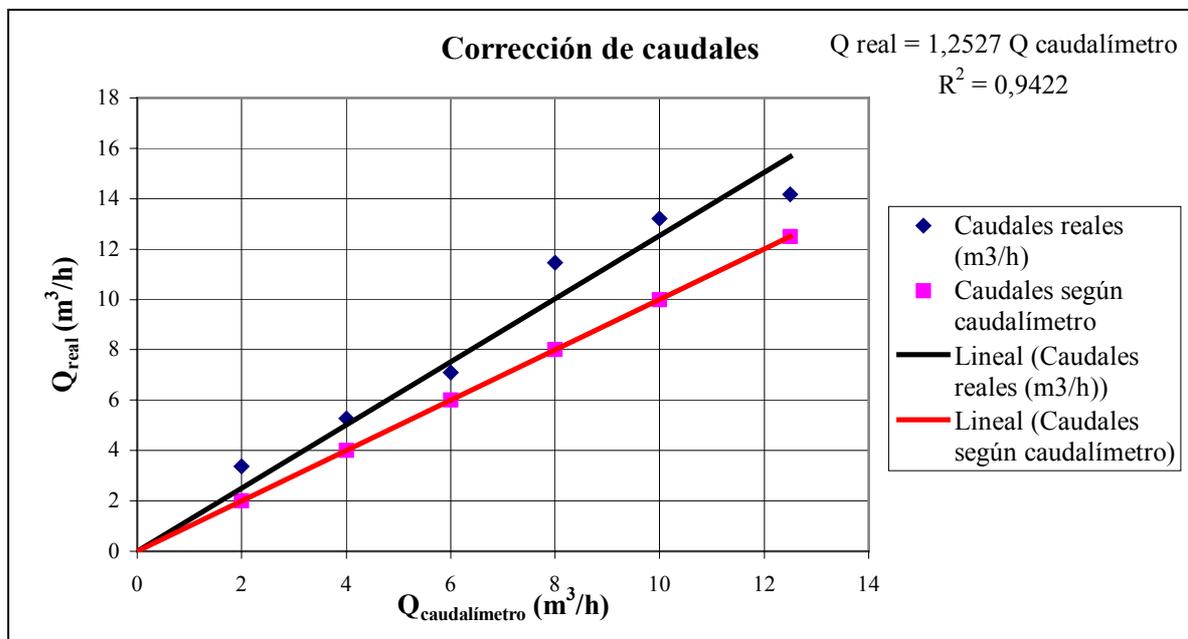
Inicialmente, el estudio de este proyecto fin de carrera estaba encaminado hacia la medición general de resaltos hidráulicos y curvas de remanso, aunque el devenir de los resultados hizo que finalmente se centrara en el estudio de los perfiles de velocidad dentro del resalto hidráulico. Pese a tal, se incluyó la parte teórica correspondiente a flujo variado en canales, que ya se había finalizado, como apéndice de este proyecto fin de carrera para su consulta, al ser parte también del flujo en canales.

En la realización del proyecto, los puntos más importantes han sido:

- Puesta a punto del canal.

Inicialmente hubo que realizar una corrección del caudal medido por el caudalímetro analógico suministrado con el canal ya que los resultados de anteriores proyectos originaban serias dudas sobre su fiabilidad. Por estos motivos se realizó un aforo volumétrico para obtener el caudal realmente trasegado por la bomba.

El ajuste de regresión, obtenido con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,94$, fue el siguiente:



Gráfica I-1. Recta de regresión del aforo volumétrico.

Como factor de corrección medio de los caudales analizados se obtuvo $F_c = 1,25$, pudiendo obtenerse la relación:

$$Q_{\text{real}} = F_c \cdot Q_{\text{caudalímetro}}$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Además de esto, se debe considerar la deflexión que sufre el canal en ambos lados provocada por el peso del agua contenida en los depósitos de cabecera y final del mismo. Para evitar la deflexión se buscaron los sitios del canal donde su aparición era inapreciable, marcando los puntos de las campañas de muestreo en ellos.

En la siguiente fotografía se pueden apreciar las deflexiones del canal.



Fotografía I-1. Canal de estudio en el que se aprecian las deflexiones existentes en los extremos.

- Puesta a punto de la instrumentación ADV.

Antes de poner en funcionamiento el instrumental de medición, tuvieron que resolverse los distintos problemas de logística que fueron apareciendo, ya que el ordenador inicial no fue compatible para realizar las mediciones con el ADV.

La verticalidad de la sonda para realizar las mediciones se obtuvo a partir de un soporte, de altura regulable, diseñado para tal objetivo. Como se observa en las siguientes fotografías, el soporte sujeta a la sonda de forma vertical mediante una abrazadera ajustable que permite el montaje y desmontaje de una forma rápida y sencilla. Además, existen dos tornillos que permiten ajustar el movimiento vertical y horizontal de la sonda de la forma deseada.



Fotografías I-2. Soporte para la sonda ADV

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

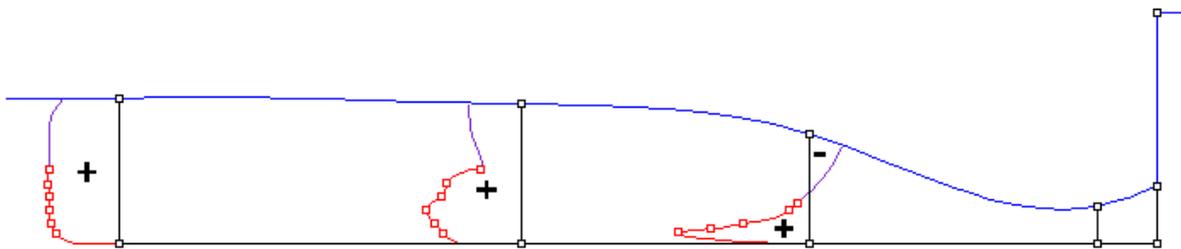
- Principales resultados obtenidos.

Tras el análisis de los datos obtenidos en las diversas campañas de muestreos y la comparación con distintos trabajos experimentales, se obtuvieron perfiles similares a los teóricamente esperables.

Los muestreos se realizaron en resaltos estables y sumergidos aguas abajo de una compuerta y tras un aliviadero WES. A continuación se muestran las fotografías de los resaltos, acompañadas por los perfiles de velocidad obtenidas en cada caso para el máximo caudal.



Fotografía I-3. Resalto clásico tras compuerta.

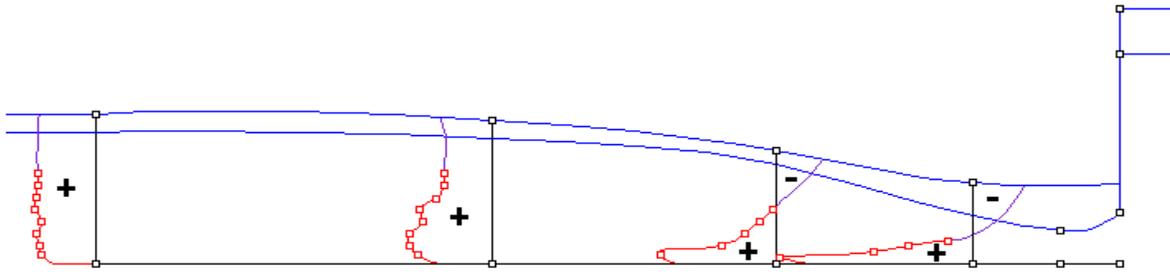


Gráfica I-2. Perfiles obtenidos en distintos puntos de un resalto no rechazado tras compuerta.

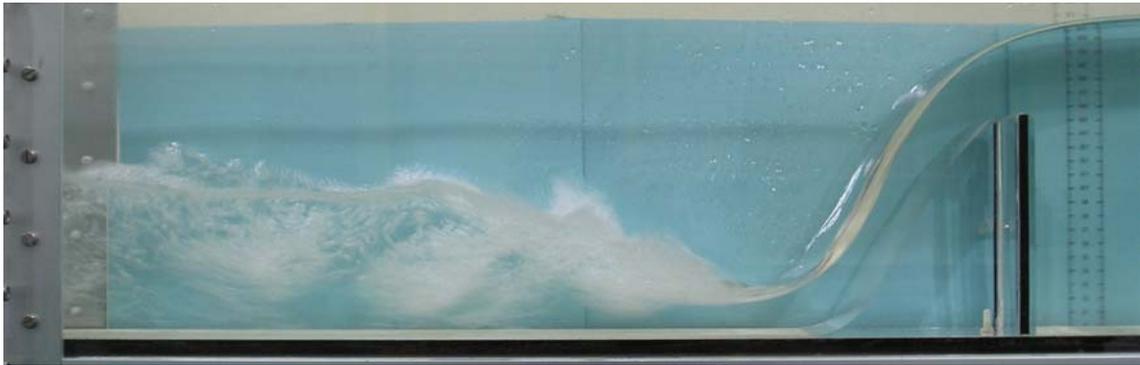


Fotografía I-4. Resalto sumergido tras compuerta.

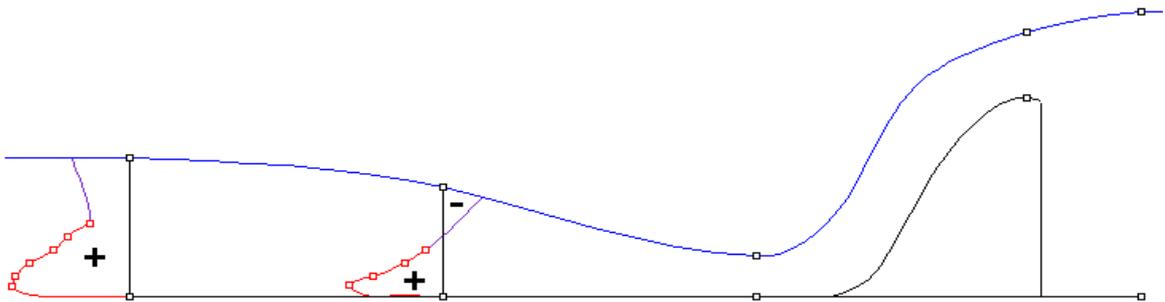
Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos



Gráfica I-3. Perfiles de velocidades distintos puntos de un resalto sumergido tras compuerta.



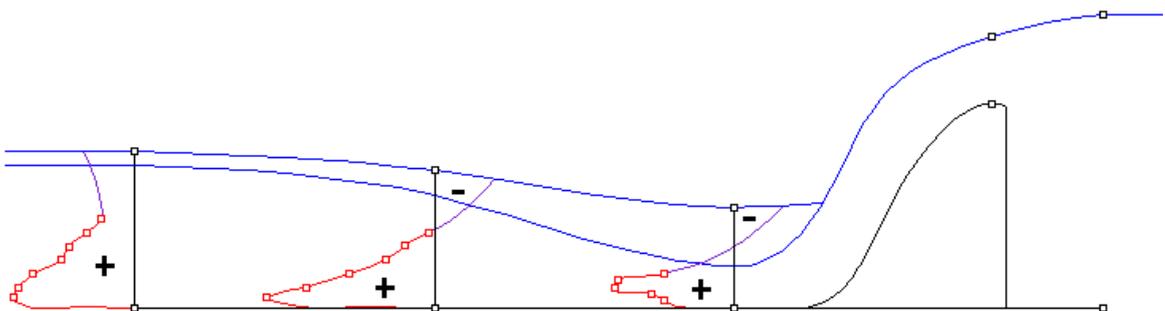
Fotografía I-5. Resalto no rechazado tras aliviadero WES.



Gráfica I-4. Perfiles obtenidos en un resalto clásico tras aliviadero.



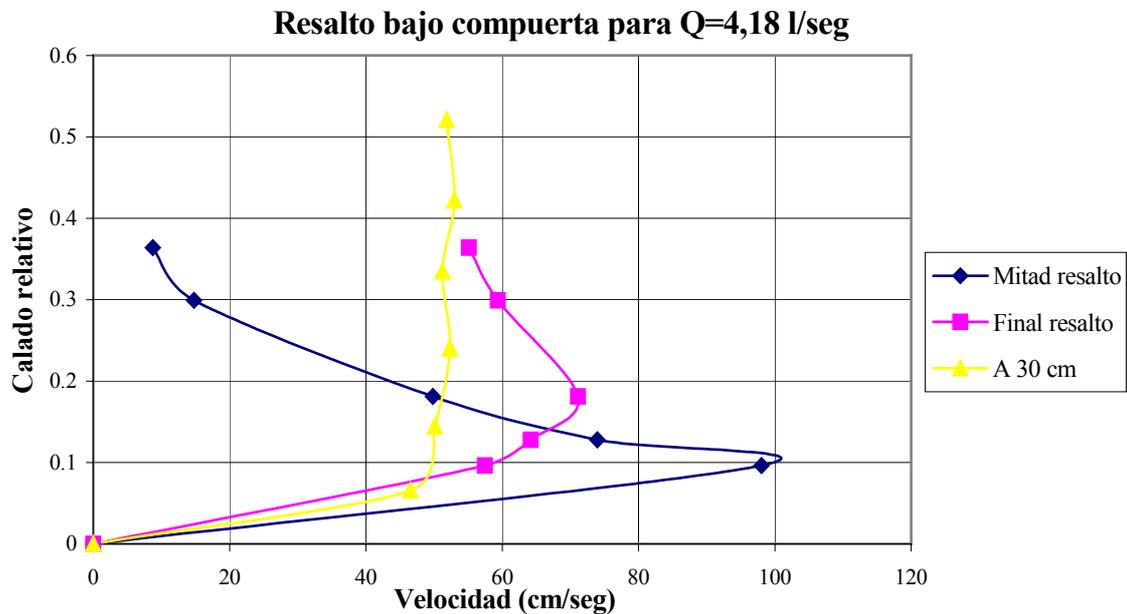
Fotografía I-6. Resalto sumergido tras aliviadero WES.



Gráfica I-5. Perfiles obtenidos en un resalto sumergido tras aliviadero.

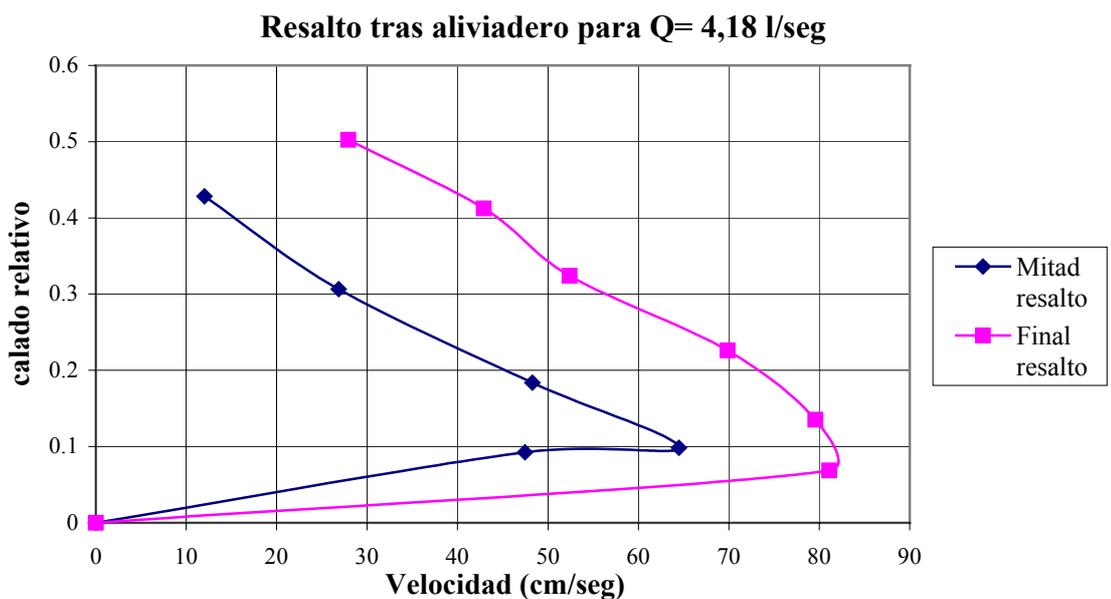
Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En las siguientes gráficas se presenta una selección de los perfiles obtenidos en los muestreos realizados, para distintas partes de los resaltos, representando los obtenidos con el máximo caudal utilizado:



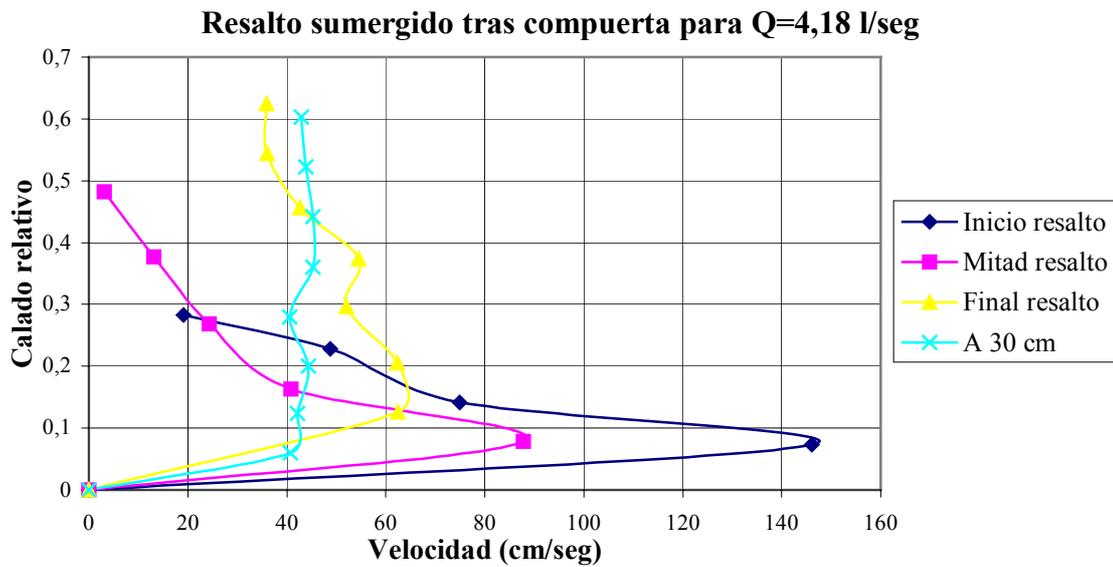
Gráfica I-6. Representación de los perfiles obtenidos, bajo una compuerta, en la mitad, el final y a 30 cm del final del resalto, empleando un caudal trasegado de 4,18 l/seg.

Se ha observado que, en los resaltos clásicos tras aliviadero, se producen mayores velocidades en la parte final que en la central, debido a los efectos de distorsión que provoca la entrada del flujo; se produce un torbellino en la solera del canal tras el aliviadero WES. En la gráfica I-7 se puede observar este fenómeno.



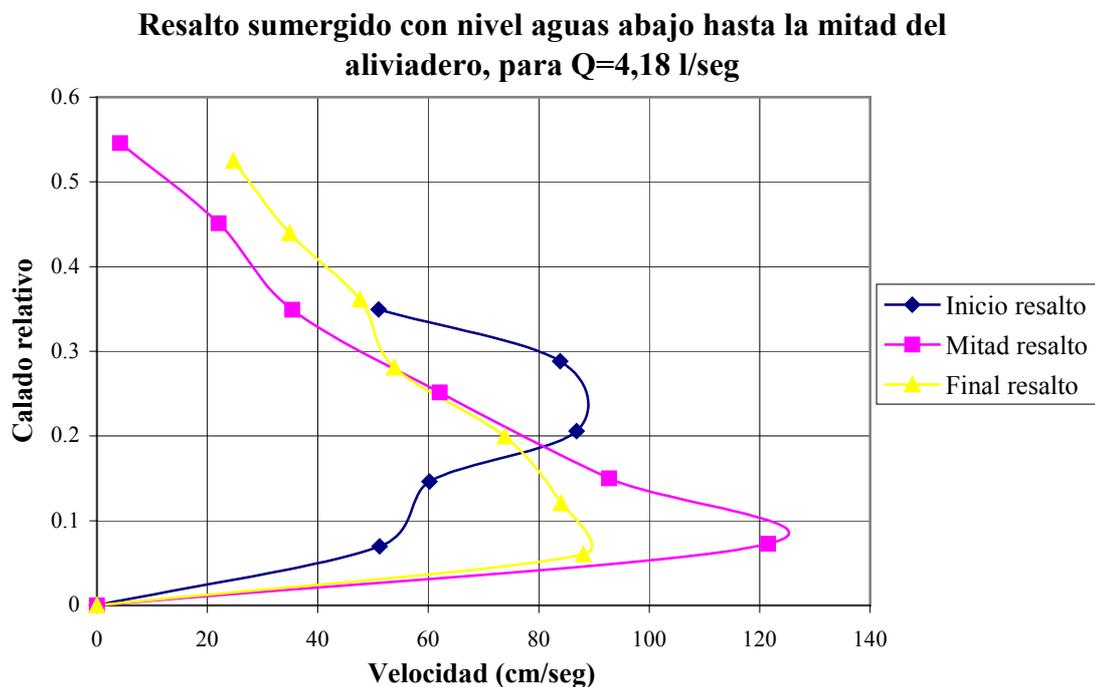
Gráfica I-7 Representación de los perfiles de la parte central y final de un resalto aguas abajo de un aliviadero WES.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos



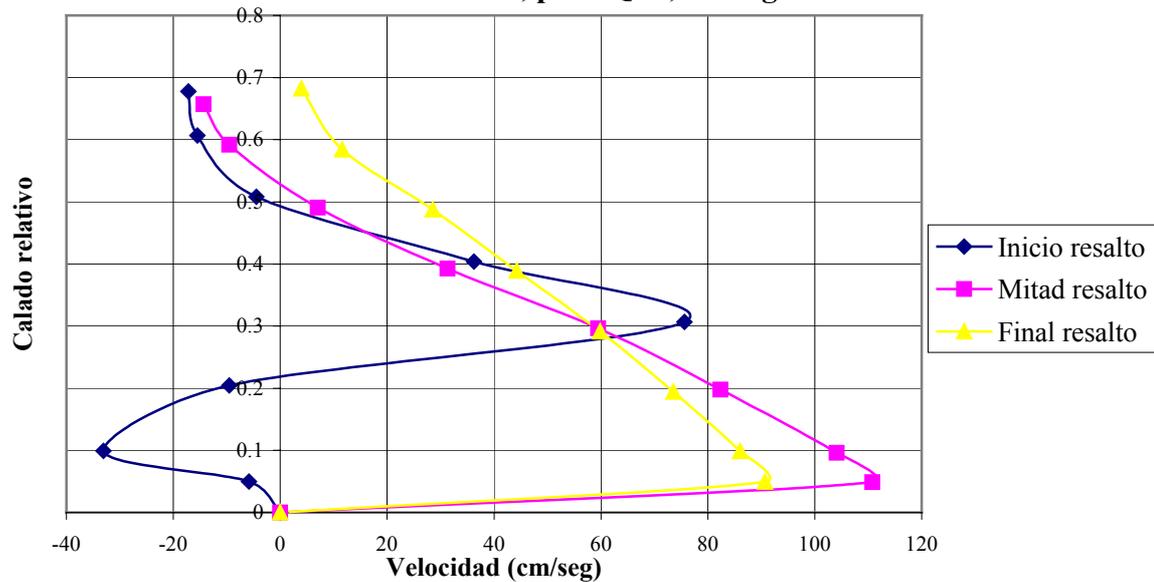
Gráfica I-8. Representación de cuatro perfiles de velocidad obtenidos en distintas partes de un resalto sumergido tras compuerta.

En las dos figuras siguientes, están graficados los perfiles de velocidad en distintas zonas de resaltos sumergidos tras un aliviadero, con distintas profundidades de sumergencia.



Gráfica I-9. Perfiles de resalto sumergido, con sumergencia hasta la mitad del aliviadero.

Resalto sumergido con nivel aguas abajo hasta coronación del aliviadero, para $Q=4,18$ l/seg



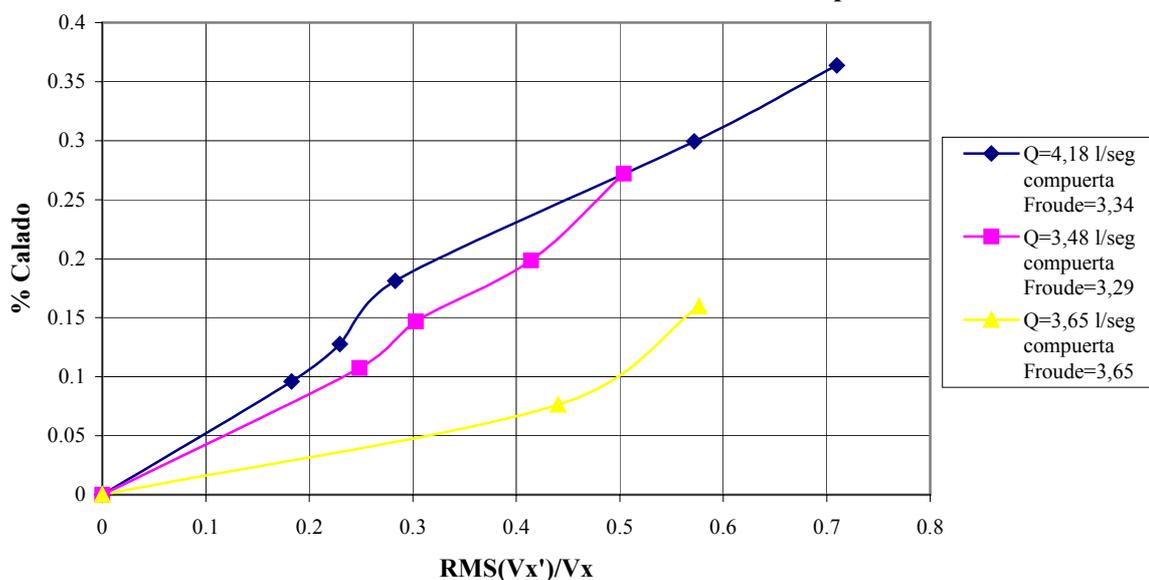
Gráfica I-10. Perfiles de resalto sumergido, con sumergencia hasta la coronación del aliviadero.

En las gráficas I-9 y I-10 se puede observar el efecto que produce un torbellino al inicio del resalto sumergido, producido por la entrada del flujo con aliviadero. Se observa en ambos casos una disminución de velocidades en la parte más cercana a la solera del canal, desplazándose el pico de velocidades hacia calados superiores.

Además, se graficaron las velocidades fluctuantes del flujo en la parte central de los resaltos, obtenidas tras una revisión de los datos del muestreo. Algunos ejemplos de estas gráficas se muestran a continuación.

La gráfica I-11 representa las velocidades fluctuantes en la parte central de un resalto producido aguas abajo de una compuerta.

Perfiles de velocidad central del resalto tras compuerta

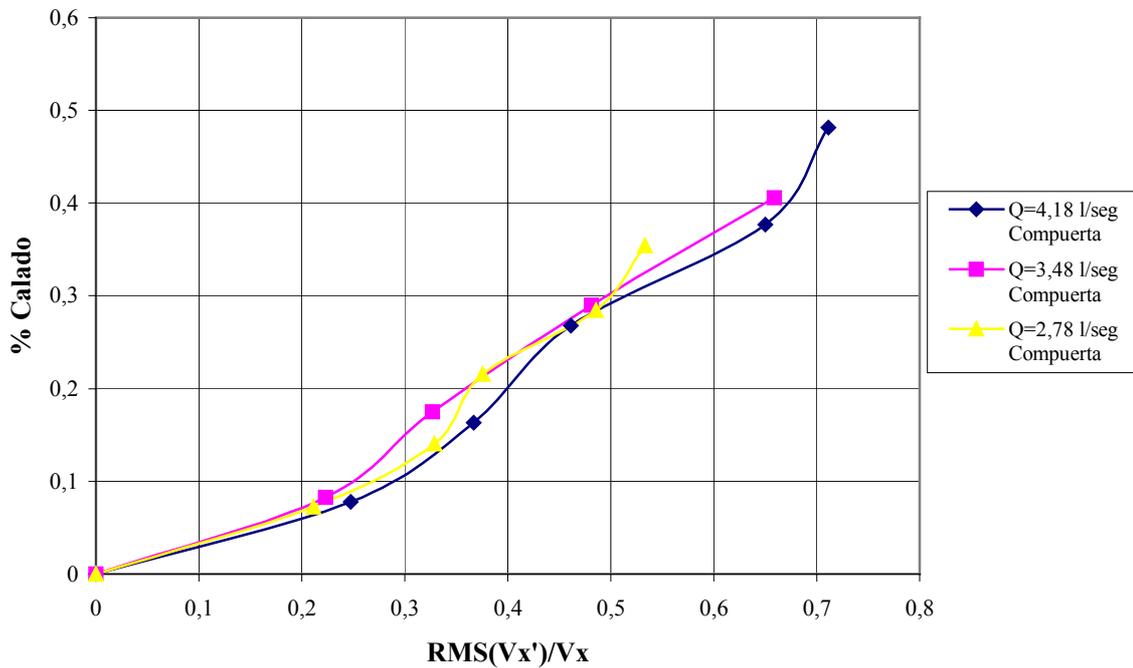


Gráfica I-11. Perfiles centrales de velocidades turbulentas en un resalto clásico.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

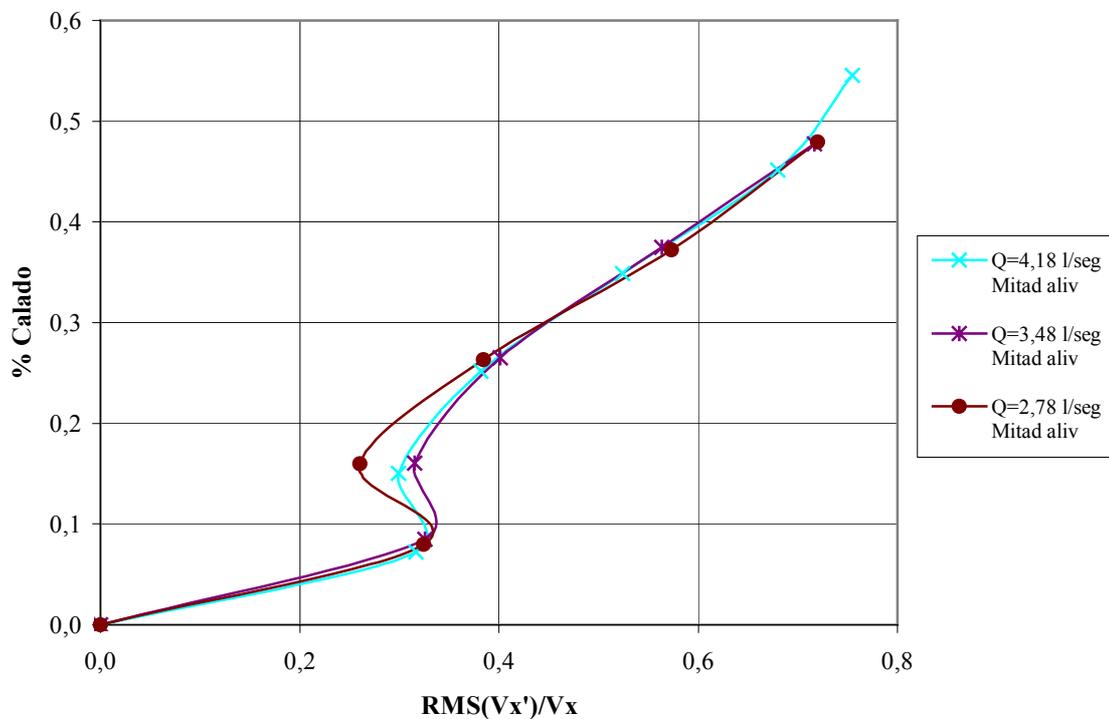
Las dos siguientes gráficas muestran los perfiles de velocidades turbulentas en la parte central de resaltos sumergidos, para flujos tras compuerta y aliviadero, respectivamente.

Perfiles a mitad del resalto sumergido tras compuerta



Gráfica I-12. Perfiles centrales de velocidades turbulentas en un resalto sumergido tras compuerta.

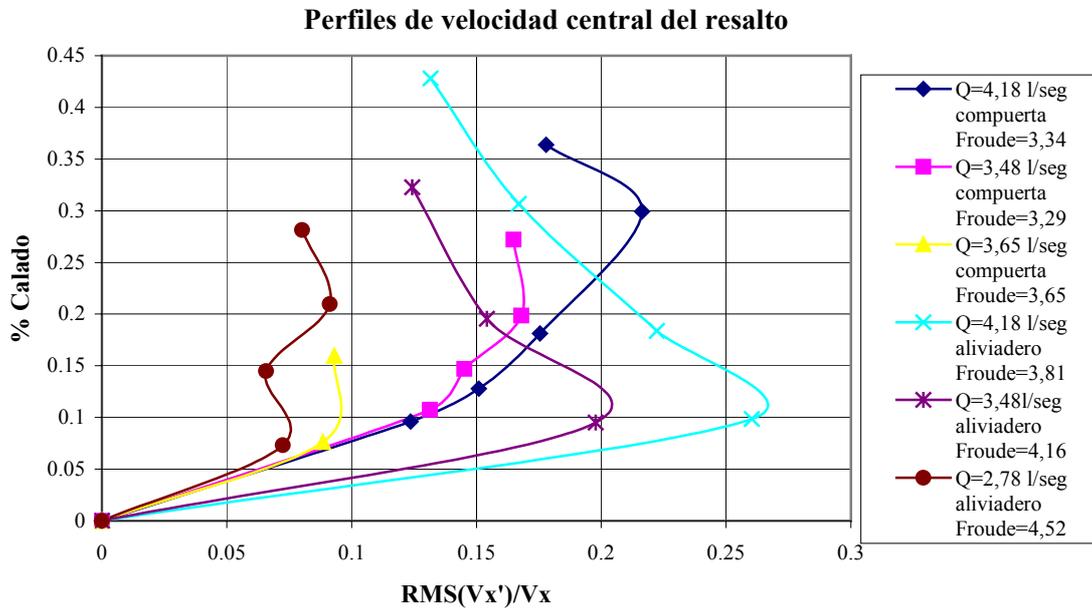
Perfiles a mitad del resalto sumergido hasta mitad del aliviadero



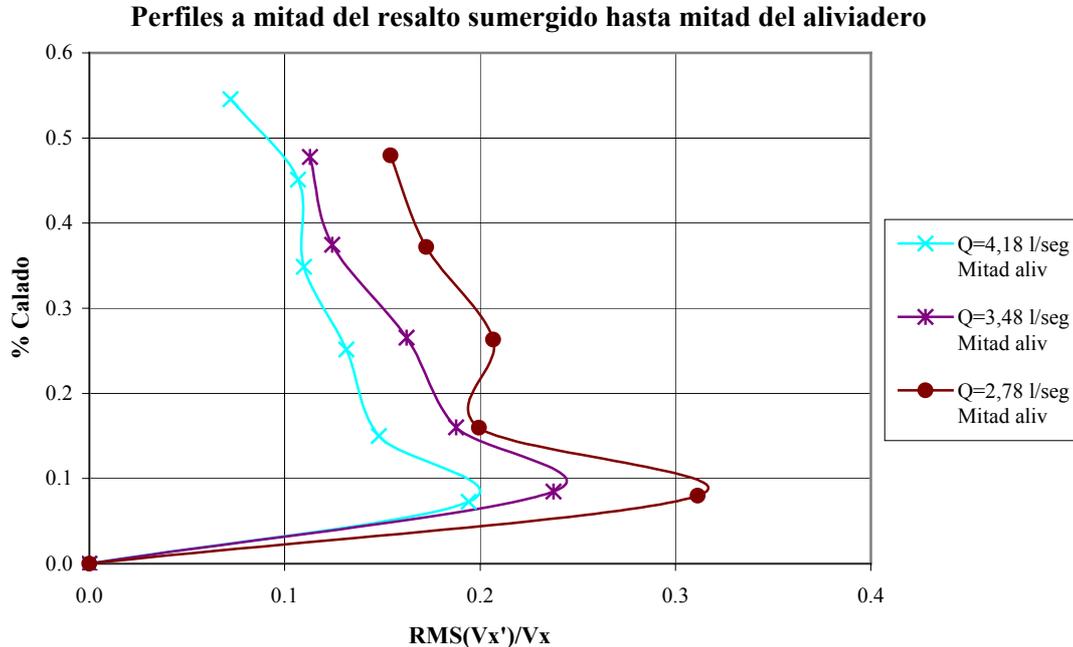
Gráfica I-13. Perfiles centrales de velocidades turbulentas en un resalto sumergido tras aliviadero.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Al observar la disparidad que se obtuvo en los perfiles de RMS con los teóricamente esperados se realizaron nuevas gráficas, dividiendo el valor obtenido de RMS entre la velocidad considerando un balance de masa únicamente con la sección en que se realizaron los muestreos. Algunos de los ejemplos de estas gráficas se muestran a continuación:



Gráfica I-14. Perfiles de velocidades turbulentas en la parte central del resalto.



Gráfica I-15. Perfiles en la parte central de un resalto sumergido tras aliviadero.

En estas dos gráficas se muestran valores mas acordes con los suministrados en la bibliografía.

Las distintas gráficas se discuten más detenidamente en los respectivos apartados de este estudio experimental.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

II INTRODUCCIÓN.

II.1 Clasificación de flujos.

En este proyecto fin de carrera se realiza el estudio del comportamiento del agua en un canal rectangular. Para facilitar dicho estudio se clasifican los distintos tipos de flujo en que se producen en una canal.

Existen dos grandes tipos de flujo atendiendo al cambio en la profundidad de flujo respecto al espacio y el tiempo:

A) **Flujo Permanente:** Ocurre cuando la profundidad del flujo no cambia o se supone constante durante el tiempo considerado.

Los tipos de flujos permanentes son:

1. **Flujo uniforme:** La profundidad de flujo es la misma en cada sección del canal.
2. **Flujo variado:** El calado varía en cada sección del canal.

Además, dentro del flujo variado, se distinguen tres grupos:

- **Flujo espacialmente variado:** Cuando el flujo variado es permanente a lo largo de todo el canal.

Cuando el flujo variado no es permanente a lo largo de todo el canal, se pueden desarrollar otros dos tipos:

- **Flujo rápidamente variado:** Cuando el cambio de calado se produce de forma abrupta en distancias relativamente cortas. En uno de estos tipos de flujo se desarrolla el fenómeno hidráulico conocido como *resalto hidráulico*.
- **Flujo gradualmente variado:** Cuando el cambio de calado se produce paulatinamente. En él se desarrollan las *curvas de remanso*.

B) **Flujo no Permanente o Variable:** Este se desarrolla cuando la profundidad cambia con el tiempo.

Los tipos de flujos variables que se pueden desarrollar son los mismos que para Flujo Permanente, pero con la excepción de que no es posible desarrollar un **Flujo Uniforme “variable”**, son:

- **Flujo variado “variable”.** Dentro de él están:
 - **Flujo espacialmente variado “variable”.**
Cuando el flujo variado “variable” no es permanente a lo largo de todo el canal:
 - **Flujo rápidamente variado “variable”.**
 - **Flujo gradualmente variado “variable”.**

Este proyecto fin de carrera estudia el fenómeno de salto hidráulico, por tanto, se centra en el flujo rápidamente variado, ya que en él se desarrolla dicho fenómeno hidráulico.

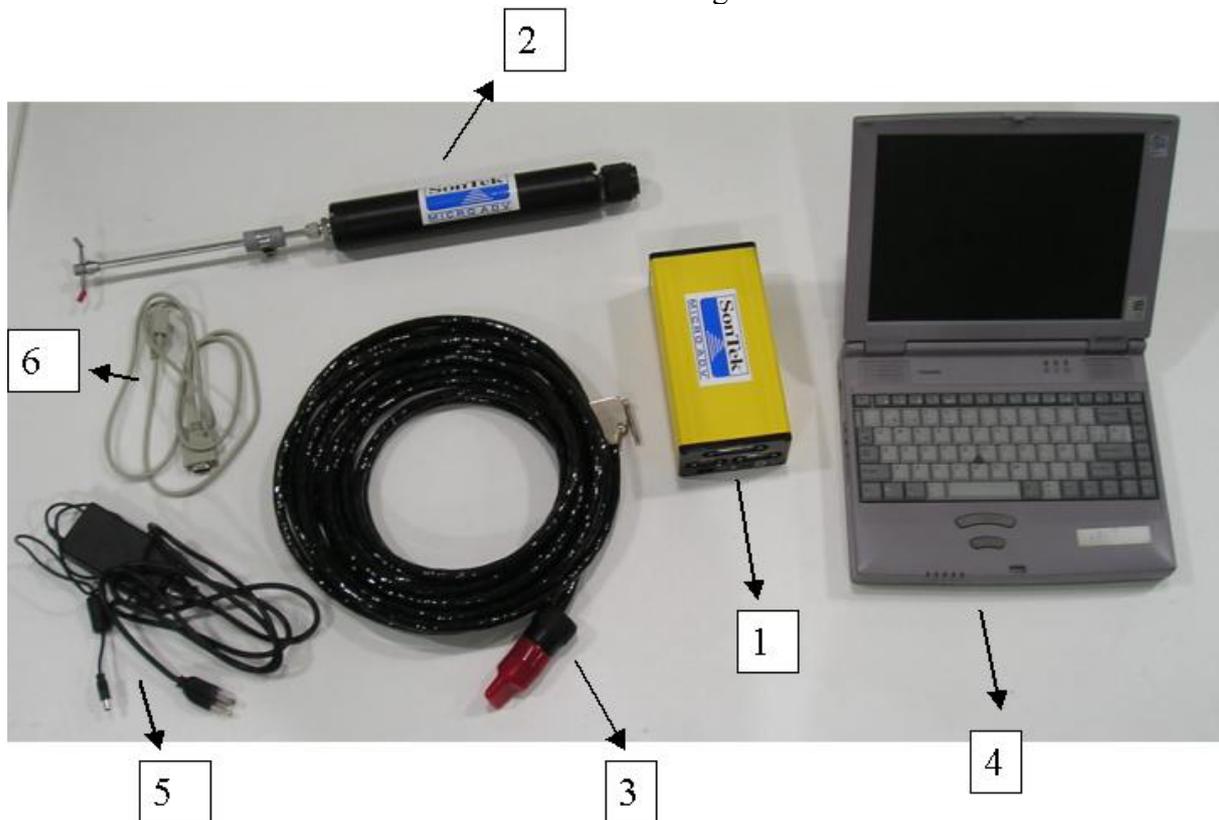
Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

9. Sección de trabajo del canal de 80 x 250, y 5000 mm de longitud.
10. Soporte con regulación de altura.
11. Depósito tranquilizador.
12. Regulador del calado del agua en el canal.
13. Solera del canal.

Nota: La moto-bomba de que dispone el equipo posee un caudal máximo teórico $Q_t = 580$ l/min = $34,8$ m³/h, aunque en la realidad no se cumple, siendo el caudal máximo real (Q_{mr}) medido en el caudalímetro de unos $12,5$ m³/h.

II.2.3 Descripción de los elementos del medidor de velocidad acústico por Doppler ADV.

Los distintos elementos del ADV se indican en la Fotografía II-2 :



Fotografía II-2. Principales elementos del ADV.

Siendo:

1. Módulo de procesamiento ADVfield a prueba de salpicaduras.
2. Sonda 2D de 16 MHz MicroADV.
3. Cable de unión entre la sonda y el procesador.
4. Ordenador con programa operativo Windows 98.
5. Cable de alimentación del procesador.
6. Cable para comunicar el módulo de procesamiento con el ordenador.

En la figura II-1 se pueden distinguir los principales elementos de la sonda.

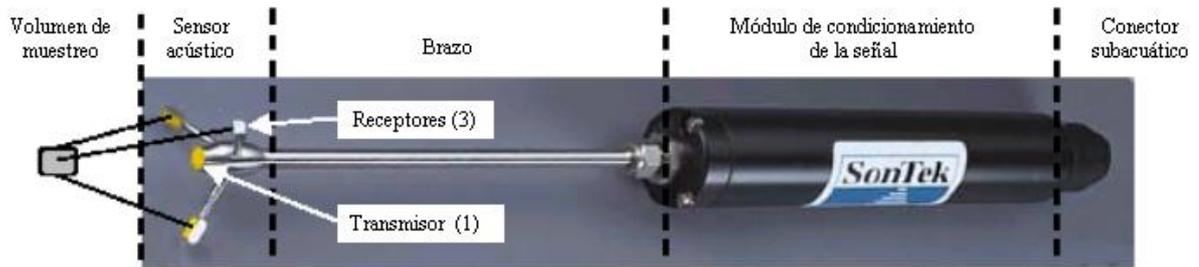


Figura II-1. Elementos de la sonda.

Nota: para una sonda 2D el dibujo sería el mismo, salvo que tendría un receptor menos.

III OBJETIVOS

Los principales objetivos de este proyecto fin de carrera son:

- a) Un primer objetivo es la puesta a punto de la instrumentación Doppler y la comparación y contraste teórico-experimental de las distribuciones de velocidad e índices turbulentos de Reynolds; así como las principales variables características de diferentes tipos de resaltos hidráulicos, como son: calados, longitudes, velocidades y pérdidas de energía.
- b) Un segundo objetivo de tipo didáctico, en el que se obtienen fotos y vídeos digitales de las principales mediciones experimentales, para la edición de este material en ordenador, destinados al apoyo de la labor docente cuando se explican los temas tratados en este proyecto.

IV BASES TEÓRICAS

En este apartado se tratarán una serie de conocimientos útiles para el estudio del flujo y resalto hidráulico en un canal.

IV.1 Flujo en un canal. Conceptos fundamentales

En canales prismáticos sin ningún tipo de estructura incorporada u otras causas de perturbación, el flujo estacionario uniforme se puede presentar sólo cuando el canal es suficientemente largo. Si el canal tiene pendiente suave, lo que significa que el flujo normal es subcrítico, el flujo variado se presenta, por lo general, en la parte final del canal; si el canal tiene una pendiente fuerte, es decir, que el flujo normal es supercrítico, el flujo variado se produce en la parte superior del canal. Para el caso de un canal no prismático con estructuras adicionales, bifurcaciones, etc., el que siempre se presenta es el flujo variado.

Se denomina flujo bruscamente variado a aquel flujo en el cual la superficie libre de agua varía en tramos cortos; en forma básica, la aceleración o el retardo de la masa de agua provoca tal variación. En estos casos, las pérdidas de energía pueden ser consideradas en forma global, de tal modo que para el cálculo del flujo son suficientes las ecuaciones de la energía y del impulso. Por contra, el flujo gradualmente variado se caracteriza porque las variaciones en la ubicación de la superficie libre del agua ocurren en tramos largos; la resistencia del fondo y las paredes determinan dichas variaciones. En estos tipos de flujo se puede dejar de considerar los efectos de la aceleración; para su cálculo es necesario una estimación correcta del valor adecuado de la resistencia al flujo y de las pérdidas por rozamiento.

El flujo gradualmente variado es el flujo permanente cuya profundidad varía de manera gradual a lo largo de la longitud del canal. Esta definición establece dos condiciones:

1. El flujo es permanente; es decir, las características hidráulicas de flujo permanecen constantes para el intervalo de tiempo considerado.
2. Las líneas de corriente son paralelas; es decir, prevalece la distribución hidrostática de presiones sobre la sección del canal.

El desarrollo de la teoría del flujo gradualmente variado se remonta al siglo XVIII. Muchos de los primeros ingenieros hidráulicos contribuyeron a este desarrollo (Se cree que Bélanger es el constituyente más destacado y dentro de los primeros contribuyentes están Bernoulli, Bresse, Poncelet, Saint-Venant y Boussinesq entre otros). Todas las teorías así desarrolladas en general giran alrededor de la siguiente suposición básica:

- A. La pérdida de altura en una sección es la misma que para un flujo uniforme que tiene la velocidad y el radio hidráulico de la sección.

De acuerdo con esta suposición, la ecuación de flujo uniforme puede utilizarse para evaluar la pendiente de energía de un flujo gradualmente variado en una sección de canal determinada, y el coeficiente de rugosidad desarrollado en principio para flujo uniforme se aplica al flujo variado. Esta suposición nunca ha sido confirmada de manera precisa por experimentos o por teoría, pero los errores que surgen de ella se creen que son pequeños

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

comparados con los que se incurren comúnmente durante el uso de una ecuación de flujo uniforme y en la selección del coeficiente de rugosidad. A través de los años esta suposición ha demostrado ser una base confiable para el diseño. La suposición es sin duda más correcta para flujos variados donde la velocidad se incrementa que para aquellos en los cuales la velocidad disminuye, debido a que en un flujo en que se incrementa la velocidad, la pérdida de altura es causada casi en su totalidad por efectos friccionales, en tanto que en un flujo con velocidad decreciente pueden existir pérdidas por remolinos grandes.

El cálculo de las pérdidas por rozamiento, expresadas como la pendiente de la línea de energía S_e , para el caso de flujo uniforme, generalmente se realiza en canales con la ayuda de la ecuación de Gauckler-Manning-Strickler:

$$Q = A \cdot \bar{u} = A \cdot n_s \cdot R^{1/3} \cdot S^{1/2} \quad (\text{III-1})$$

donde:

Q = caudal

A = área de la superficie transversal del flujo

\bar{u} = velocidad promedio espacial dada, en la dirección x , por

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \iint_A u \cdot dA$$

pudiendo también aplicarse de igual forma en las dos direcciones restantes, y y z .

$R = A/P$ = radio hidráulico

P = perímetro mojado

n_s = constante empírica que depende del material del canal

S = pendiente del canal

Esta ecuación sirve también como base para deducir las ecuaciones fundamentales del flujo gradualmente variado. Para poder utilizar esta ecuación básica de cálculo en el caso del flujo gradualmente variado, se requiere la hipótesis fundamental siguiente:

- Los cambios en la profundidad de agua “ y ” y la velocidad media del flujo “ \bar{u} ” son tan graduales a lo largo del canal, que en el cálculo de la pendiente de la línea de energía S_e se puede utilizar una fórmula del caudal (por ejemplo, Manning).

La aproximación es tanto mejor cuanto más gradual sea la variación de “ y ” y de “ \bar{u} ”, y cuanto menor sea la longitud del intervalo Δx seleccionado a lo largo del canal. La formulación matemática de esta hipótesis se expresa, con la ayuda de las definiciones en la figura III-1, de la siguiente forma:

$$Q \cong A_m \cdot \bar{u}_m = A_m \cdot n_s \cdot R_m^{2/3} \cdot S_e^{2/3} \quad (\text{III-2})$$

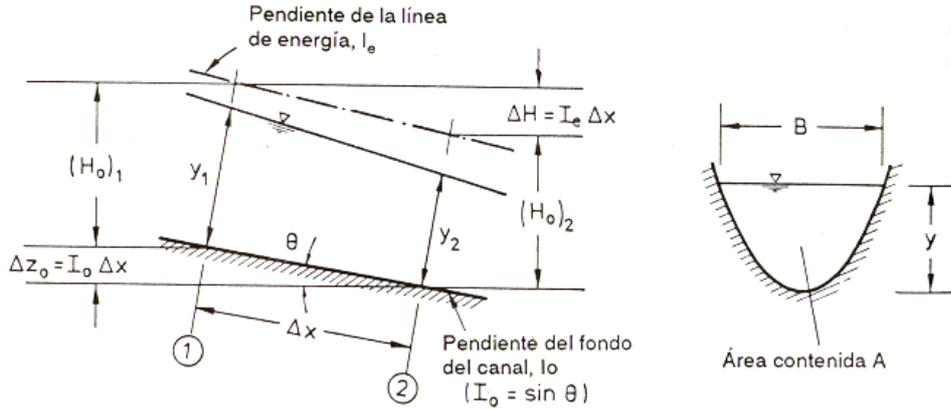


Figura III-1. Esquema de definiciones para calcular por intervalos la superficie libre del agua.

Según esta ecuación, se puede calcular la pendiente de la línea de energía S_e en el tramo Δx cuando se conocen los valores A_m y R_m (valores de A y R para $y = y_m$) además del caudal Q para la sección transversal media del flujo, siendo \bar{u}_m el valor de la velocidad \bar{u} para $y = y_m$. La profundidad para esta sección transversal media en canales prismáticos se puede suponer, con suficiente aproximación, igual a la media aritmética:

$$y_m = \frac{y_1 + y_2}{2} \tag{III-3}$$

siempre que Δx sea suficientemente pequeño.

El cálculo por intervalos de la superficie libre del agua (o bien, el cálculo según el método de las diferencias finitas), requiere formular la ecuación de la energía para las condiciones representadas en la figura III-1.

$$S_0 \cdot \Delta x + (H_0)_1 = S_e \cdot \Delta x + (H_0)_2 \tag{III-4}$$

donde H_0 representa la energía específica en la sección transversal de flujo considerada (figura III-2):

$$H_0 = y \cdot \cos \theta + \alpha \frac{\bar{u}^2}{2g} \tag{III-5}$$

o aproximadamente, $H_0 \cong y + \frac{\bar{u}^2}{2g}$ para valores muy pequeños de θ y para $\alpha \cong 1$.

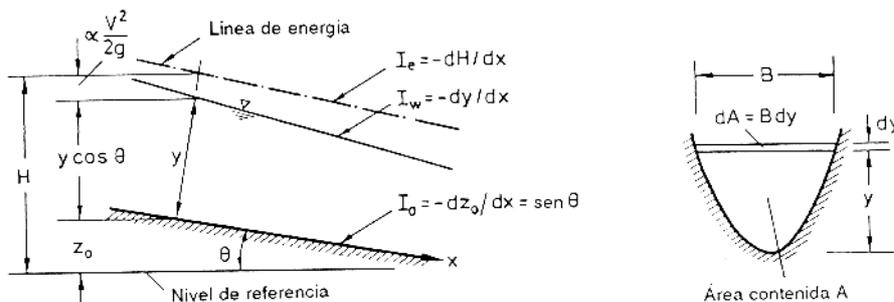


Figura III-2. Esquema de definición para derivar la ecuación diferencial.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

De la ecuación (III-4) se obtiene:

$$\Delta x = \frac{(H_o)_1 - (H_o)_2}{S_e - S_o} = \frac{\Delta H_o}{S_e - S_o} \quad (\text{III-6})$$

Con estas relaciones se puede calcular cualquier perfil de superficie libre del agua en el caso del flujo gradualmente variado. Para ello existen, básicamente, dos metodologías de cálculo en las que se parte de relaciones de flujo conocidas en una de las secciones transversales; se determinan las relaciones de la sección transversal vecina con ayuda de las ecuaciones (III-2) y (III-6). Con el método de las diferencias finitas, en el que se tiene la ventaja de que se eliminan las iteraciones, se elige una profundidad de agua para la sección vecina, con ésta se calculan los valores de y_m , A_m y R_m (ecuación III-3), se sustituyen en la ecuación (III-2) para determinar S_e y, finalmente, con la ecuación (III-6), se evalúa la distancia Δx entre las dos secciones transversales. Si, por otro lado, la longitud Δx de los intervalos está predefinida (por ejemplo casos donde se posee información acerca del canal sólo en pocas secciones transversales de flujo), se ejecutan iteraciones, según el método de las diferencias finitas, hasta satisfacer en forma simultánea las ecuaciones (III-2) y (III-4) para las condiciones de contorno dadas.

Con las consideraciones anteriores quedan presentadas las ecuaciones básicas para el cálculo de flujo gradualmente variado. Resta analizar la manera en que se puede llevar a cabo el cálculo en forma rápida y lo más precisa posible. Sin embargo, en la práctica surgen algunas dificultades relacionadas con la determinación de las secciones de control del flujo, la dirección de avance en el cálculo por intervalos y las operaciones requeridas para el mismo. El problema en estos casos radica en que, si bien las ecuaciones de que se dispone son suficientes para encontrar la solución, no se conoce en principio la forma de utilizarlas. Desde el inicio puede no estar claro si el flujo uniforme en el canal se producirá en régimen subcrítico o supercrítico; tampoco se sabe si el flujo es variado y, en caso de serlo, en qué tramo del canal. Por tanto, antes de iniciar cualquier cálculo, se deben aclarar estas cuestiones realizando una especie de análisis previo del problema.

Para facilitar este análisis previo tan importante, 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 continuación para el caso en que puedan suponerse, además de las anteriormente mencionadas, las siguientes hipótesis:

- B. La pendiente del canal es baja; esto significa que:
 - La profundidad de flujo es la misma sin importar si se utiliza la dirección vertical o normal (al fondo del canal).
 - El factor de corrección de presiones $\cos\theta$, en la formulación $h = d \cos\theta$, es igual a la unidad, ya que la curvatura de las líneas de corriente es insignificante en todo punto, de tal manera que se puede suponer una distribución hidrostática de presiones.
 - No ocurre entrada de aire.
- C. El canal es prismático; es decir, el canal tiene alineamiento y forma constantes.
- D. La distribución de velocidad en la sección de canal es fija. Por tanto, el coeficiente de corrección de energía cinética α es constantes.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

- E. La conductividad del canal K y el factor de sección Z son funciones exponenciales de la profundidad de flujo.
- F. El coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad de flujo y constante a través del tramo del canal bajo consideración.

En el apéndice 1 se puede encontrar la teoría referente al flujo gradualmente variado.

IV.2 El resalto hidráulico o salto hidráulico.

En 1818, el italiano Bidone realizó las primeras investigaciones experimentales del resalto hidráulico. Esto llevó a Bélanger en 1828 a diferenciar entre las pendientes suaves (subcríticas) y las empinadas (supercríticas), debido a que observó que en canales empinados a menudo se producían resaltos hidráulicos generados por barreras en el flujo uniforme original. De ahí en adelante muchos autores han realizado numerosos estudios y han citado sus resultados. Algunos contribuyentes destacados a nuestro conocimiento presente sobre este tema son Bresse (1860), Darcy y Bazin (1865), Ferriday y Merriman (1894), Gibson (1913), Kennison (1916), Woodward y Riegel-Beebe (1917), Koch y Carstanjen (1926), Lindquist (1927), Safranez (1927), Einwachter (1933), Smetana (1934), Bakhmeteff y Matzke (1936), Escande (1938), Citrini (1939), Nebbia (1940), Kindsvater (1944), Blaisdell (1948), Forster y Skrinde (1950), Rouse, Siao y Nagaratnam (1958) y muchos otros.

En principio, la teoría del resalto desarrollada corresponde a canales horizontales o ligeramente inclinados en los que el peso del agua dentro del resalto tiene muy poco efecto sobre su comportamiento y, por consiguiente, no se considera en el análisis. Sin embargo, los resultados obtenidos de este modo pueden aplicarse a la mayor parte de los canales encontrados en problemas de ingeniería. Para canales con pendiente alta el efecto del peso del agua dentro del resalto puede ser tan significativo que debe incluirse en el análisis.

Los saltos hidráulicos ocurren cuando hay un conflicto entre los controles que se encuentran aguas arriba y aguas abajo, los cuales influyen en la misma extensión del canal. Por ejemplo, si el control de aguas arriba causa un flujo supercrítico cuando el control aguas abajo dicta un flujo subcrítico, entonces hay un conflicto que puede resolverse únicamente si existe algún medio por el cual el flujo pase de un régimen a otro. La evidencia experimental sugiere que el cambio del flujo de un régimen supercrítico a uno subcrítico puede ocurrir muy abruptamente mediante un fenómeno conocido como salto hidráulico. El salto hidráulico puede tener lugar ya sea, sobre la superficie libre de un flujo homogéneo o en una interfase de densidad de un flujo estratificado.

Las aplicaciones prácticas del resalto hidráulico son muchas en el campo de flujo de canales abiertos, ya que se utiliza para:

1. Disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas, y prevenir de esta manera la socavación aguas abajo de las estructuras.
2. Recuperar altura o aumentar el nivel del agua en el lado de aguas abajo de una canaleta de medición y mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier estructura para distribución de aguas.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

3. Incrementar el peso sobre la zona de aguas abajo de la estructura y reducir la subpresión bajo la misma aumentando la profundidad del agua en su zona de aguas abajo.
4. Aumentar el caudal por debajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto (este principio lo aplicó Saugey a un aparato interesante conocido como *incrementador de caída*. El aparato se utiliza para incrementar la altura efectiva en una planta de generación hidroeléctrica durante los períodos de creciente manteniendo alejado el nivel de agua del lado de aguas abajo de la salida del tubo de aspiración mediante un resalto hidráulico).
5. La mezcla de sustancias químicas usadas para la purificación o el tratamiento de agua.
6. La aereación de flujos y el desclorinado en el tratamiento de agua.
7. La remoción de bolsas de aire con flujo de canales abiertos en canales circulares y aireación el agua en sistemas de suministros urbanos.
8. La identificación de condiciones especiales de flujo, como la existencia del flujo supercrítico o la presencia de una sección de control para la medición de la relación efectividad-costos del flujo mediante una estación de aforo.

La velocidad de propagación de las ondas es una función de su amplitud. Cuanto mayor sea la amplitud de la onda, tanto mayor será la velocidad de propagación, de tal manera que ondas de mayor altura pueden desplazarse hacia aguas arriba, incluso para flujo supercrítico. Por esta razón, si utilizando una compuerta se embalsa el flujo en el canal hasta alcanzar una profundidad determinada (inferior en régimen supercrítico, como en la figura IV-1a) en la zona de aguas abajo, entonces comienza a desplazarse una onda hacia aguas arriba (denominada onda de sumersión). Si la velocidad del flujo supercrítico es exactamente igual a la velocidad de propagación de las ondas superficiales elementales, de $V_c = \sqrt{g(A/B)}$ (es decir $V_c = \sqrt{gy}$ para canales rectangulares), entonces la velocidad resultante de la onda es nula; es decir, la onda de sumersión permanece en su sitio. Una onda de sumersión de este tipo se denomina salto hidráulico (figura IV-1b).

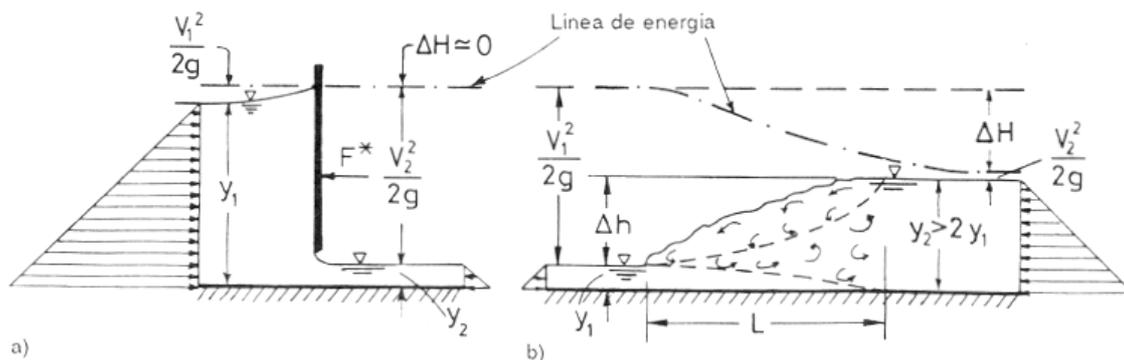


Figura IV-1. Cambio de régimen: a) de subcrítico a supercrítico, b) de supercrítico a subcrítico (salto hidráulico).

Mientras el cambio de régimen de flujo subcrítico a supercrítico (figura IV-1a) 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 IV-1b), 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 internas (fuerzas de viscosidad) ocasionan por lo regular remolinos o vórtices turbulentos con gran disipación

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

de energía. En tanto que en el caso a) las pérdidas de energía pueden ignorarse ($\Delta H \cong 0$), deben tomarse en cuenta sin excepción para el caso b). Las profundidades de agua y_1 e y_2 que están relacionadas entre sí son, por esta razón, totalmente diferentes en los dos casos. Para el caso a) la relación entre las profundidades, resulta de la ecuación de energía con $\Delta H \cong 0$, las profundidades correspondientes tienen la misma energía específica H_0 y se denominan profundidades alternas. En el caso b) se obtiene la relación por medio de la ecuación del impulso (con $F^* = 0$); las profundidades correspondientes tienen la misma fuerza específica S_0 , y se denominan profundidades conjugadas.

La ecuación del impulso aplicada al salto hidráulico de la figura IV-1b, bajo la condición de un canal prismático ligeramente inclinado, se expresa:

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

o bien,

$$P_1 + \rho Q \beta_1 V_1 = P_2 + \rho Q \beta_2 V_2 \quad (IV-1)$$

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_0 :

$$S_0 = P + \rho Q \beta V \quad (I-2)$$

Entonces, la ecuación (I-1) puede escribirse también como $(S_0)_1 = (S_0)_2$.

La fuerza de presión F para un canal con sección transversal cualquiera (figura IV-2) y con distribución hidrostática de presiones es igual a:

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

donde \bar{y} es la distancia desde la superficie libre al centro de gravedad del área A . Las profundidades conjugadas y_1 e y_2 pueden obtenerse, de la sustitución de $V = Q/A$, a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{y}_1 A_1 + \beta_1 \frac{Q^2}{g A_1} = \bar{y}_2 A_2 + \beta_2 \frac{Q^2}{g A_2} \quad (IV-3)$$

si se conoce la relación entre " \bar{y} " e y que depende de la geometría de la sección transversal (figura IV-2)

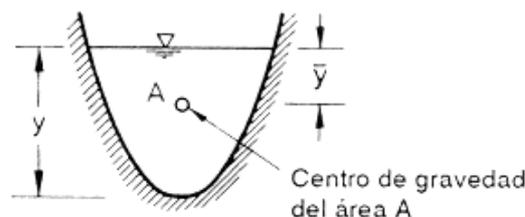


Figura IV-2.

Para un canal con sección rectangular se tiene $\bar{y} = y/2$, $A = B \cdot y$, entonces, de la ecuación (IV-3) bajo el supuesto de que $\beta_1 \cong \beta_2 \cong 1$ (siendo β_1 y β_2 coeficientes de corrección de la cantidad de movimiento) se deriva:

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

$$V_1 = \sqrt{gy_1} \left[\frac{I}{2} \frac{y_2}{y_1} \left(\frac{y_2}{y_1} + I \right) \right]^{1/2} \quad (\text{IV-4})$$

donde se observa que la velocidad de flujo correspondiente a la velocidad de propagación de la onda de sumersión es realmente mayor que la velocidad \sqrt{gy} de una onda elemental y que el factor de incremento depende de la amplitud de la onda $\Delta h = y_2 - y_1$. Para el caso de que $\Delta h \rightarrow 0$ se obtiene de esta ecuación que la velocidad de propagación de una onda elemental V_1 tiende al valor $\sqrt{gy_1}$.

La ecuación (IV-4) se puede escribir también como sigue:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{I}{2} \left(\sqrt{I + 8F_1^2} - I \right) \quad (\text{IV-5})$$

donde $F_1 = V_1 / \sqrt{gy_1}$

La relación entre las profundidades conjugadas, y_2/y_1 , resulta así una función clara y definida de la forma de la sección transversal y del número de Froude.

A continuación se detalla el cálculo de la ecuación (IV-5) con más detalle, obteniéndola a partir de la definición de cantidad de movimiento por medio de los calados conjugados en el canal.

IV.2.1 Definición de cantidad de movimiento específico

Cuando se examina la aplicación de la segunda ley de movimiento de Newton en los problemas básicos de flujo permanente en canales abiertos, se debe comenzar con el caso de un problema general, como se muestra esquemáticamente en la figura IV-3. Dentro del volumen de control definido en esta figura, hay una pérdida desconocida de energía y/o una fuerza actuante sobre el flujo entre las secciones 1 y 2; el resultado es un cambio en la cantidad de movimiento lineal del flujo. En muchos casos, este cambio en la cantidad de movimiento se asocia con un cambio en el tirante del flujo. La aplicación de la segunda ley de Newton (en una forma unidimensional) para este volumen de control es

$$F'_1 + F'_3 - F'_2 - \Sigma f'_f - P'_f = \frac{\gamma}{g} Q (\beta_2 \bar{u}'_2 - \beta_1 \bar{u}'_1) \quad (\text{IV-6})$$

donde

\bar{u} = velocidad promedio espacial dada, en la dirección x, por

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \iint_A u \, dA$$

pudiendo también aplicarse a las otras dos direcciones remanentes de las coordenadas cartesianas.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

F'_1 y F'_2 = componentes horizontales de la presión que actúan en las secciones 1 y 2, respectivamente.

F'_3 = componente horizontal de $W \text{ sen } \theta$.

W = peso del fluido entre las secciones 1 y 2.

γ = peso específico del fluido.

θ = ángulo de la pendiente del canal.

$\Sigma f'_f$ = sumatorio de las componentes horizontales de las velocidades promedio del flujo en las secciones 1 y 2, respectivamente.

P'_f = componente horizontal de la fuerza desconocida que actúa entre las secciones 1 y 2.

β_1 y β_2 = coeficiente de corrección de la cantidad de movimiento.

A = área hidráulica

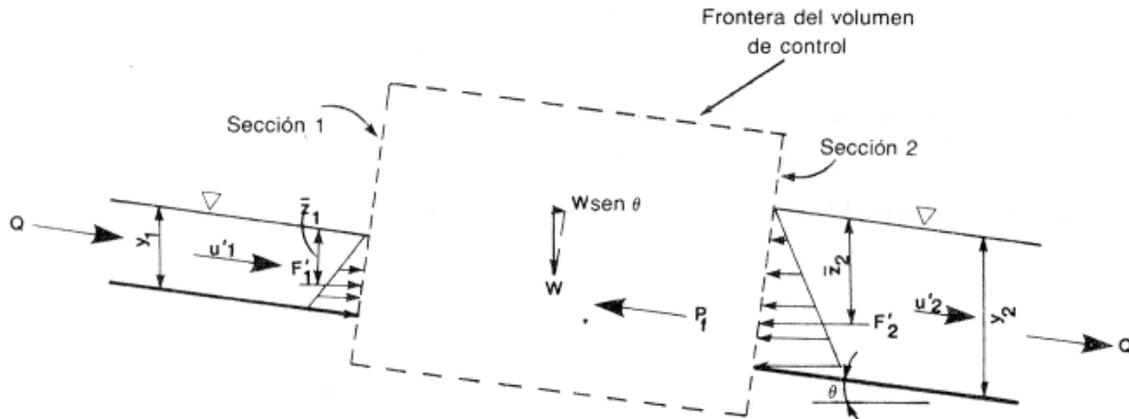


Figura IV-3. Definición esquemática para la cantidad de movimiento específico o momentum.

Si se supone que, θ es pequeña y por tanto $\text{sen } \theta = 0$ y $\text{cos } \theta = 1$; $\beta_1 = \beta_2 = 1$, y, $\Sigma f'_f = 0$, la ecuación (IV-6) será

$$\gamma \bar{z}_1 A_1 - \gamma \bar{z}_2 A_2 - P_f = \frac{\gamma}{g} Q (\bar{u}_2 - \bar{u}_1) \tag{IV-7}$$

donde

\bar{z}_1 y \bar{z}_2 = distancias a los centroides de las respectivas áreas hidráulicas A_1 y A_2 desde la superficie libre

$$F_1 = \gamma \bar{z}_1 A_1$$

$$F_2 = \gamma \bar{z}_2 A_2$$

Al sustituir $\bar{u}_1 = Q/A_1$ y $\bar{u}_2 = Q/A_2$ en la ecuación (IV-7) y, después reagrupar, se obtiene

$$\frac{P_f}{\gamma} = \left(\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{z}_1 A_1 \right) - \left(\frac{Q^2}{gA_2} + \bar{z}_2 A_2 \right) \tag{I-8}$$

o

$$\frac{P_f}{\gamma} = M_1 - M_2 \tag{IV-9}$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

donde

$$M = \frac{Q^2}{gA} + \bar{z}A \tag{IV-10}$$

y M se conoce como la función "momentum"(cantidad de movimiento específico) o fuerza específica.

Cuando se grafica el calado del flujo 'y' contra M se produce una curva de momentum que tiene dos ramas (Figura IV-4). El tramo de abajo AC se aproxima asintóticamente al eje horizontal cuando el tramo, superior BC se extiende indefinidamente hacia arriba y a la derecha. Así, en analogía con el concepto de energía específica y para un valor dado de M , la curva M -y determina dos posibles tirantes del flujo. Estos calados, que se muestran en la figura IV-4, se denominan los calados conjugados o alternos de un salto hidráulico.

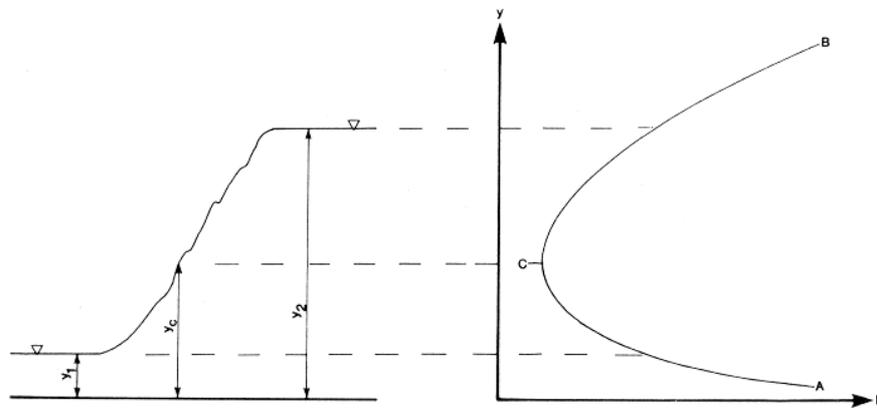


Figura IV-4. Curva de momentum y calados conjugados y_1 e y_2 de un salto hidráulico.

El valor mínimo de la función momentum puede calcularse si se supone que existe un flujo paralelo y una distribución uniforme de velocidad, al tomar la primera derivada de M con respecto a 'y' y al igualar la expresión a cero o

$$\frac{dM}{dy} = -\frac{Q^2}{gA^2} \frac{dA}{dy} + \frac{d(\bar{z}A)}{dy} = 0 \tag{IV-11}$$

y

$$-\frac{Q^2}{gA^2} \frac{dA}{dy} + A = 0 \tag{IV-12}$$

donde

$$d(\bar{z}A) = \left[A(\bar{z} + dy) + \frac{T(dy)^2}{2} \right] - \bar{z}A \approx A dy$$

y cuando se asume que $(dy)^2 \approx 0$, y sustituyendo $dA/dy = T, \bar{u} = Q/A$, y $D=A/T$ en la ecuación (IV-12), siendo D el tirante hidráulico y T el ancho de la superficie libre del agua, se obtiene:

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

$$\frac{\bar{u}^2}{2g} = \frac{D}{2} \quad (\text{IV-13})$$

si se tiene el mismo criterio que es empleado para el cálculo del valor mínimo de la energía específica. Por tanto, para un gasto específico, el momentum mínimo ocurre con la energía específica mínima y corresponde también al calado crítico.

IV.2.2 Calados Conjugados o Alternos

El cálculo del salto hidráulico siempre se inicia con la ecuación (IV-8). Si el salto ocurre en un canal con un fondo horizontal y $P_f=0$, esto es, una estructura hidráulica y no ayuda al salto, entonces la ecuación (IV-9) requiere que

$$M_1 = M_2 \quad (\text{IV-14})$$

o

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{z}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{z}_2 A_2 \quad (\text{IV-15})$$

En el caso de un canal rectangular con un ancho b , si se realizan sustituciones: $Q = \bar{u}_1 A_1 = \bar{u}_2 A_2$, $A_1 = by_1$, $A_2 = by_2$, $\bar{z}_1 = l/2 y_1$ y $\bar{z}_2 = l/2 y_2$ en la ecuación (IV-15) se obtendrá

$$\frac{q^2}{g} \left(\frac{l}{y_1} - \frac{l}{y_2} \right) = \frac{l}{2} (y_2^2 - y_1^2) \quad (\text{IV-16})$$

donde $q = Q/b$ es el gasto por unidad de ancho. La ecuación (IV-16) tiene las siguientes soluciones

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{l}{2} \left(\sqrt{l + 8F_1^2} - l \right) \quad (\text{IV-17})$$

e

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{l}{2} \left(\sqrt{l + 8F_2^2} - l \right) \quad (\text{IV-18})$$

Las ecuaciones (IV-17) y (IV-18) contienen, cada una, tres variables independientes y dos de éstas deben conocerse antes de que se pueda estimar el valor de la tercera. Se debe remarcar que el tirante aguas abajo y_2 no es el resultado de las condiciones aguas arriba, sino que es el resultado del control que se tiene aguas abajo; por ejemplo, si el control aguas abajo produce el calado y_2 , entonces se formará un resalto.

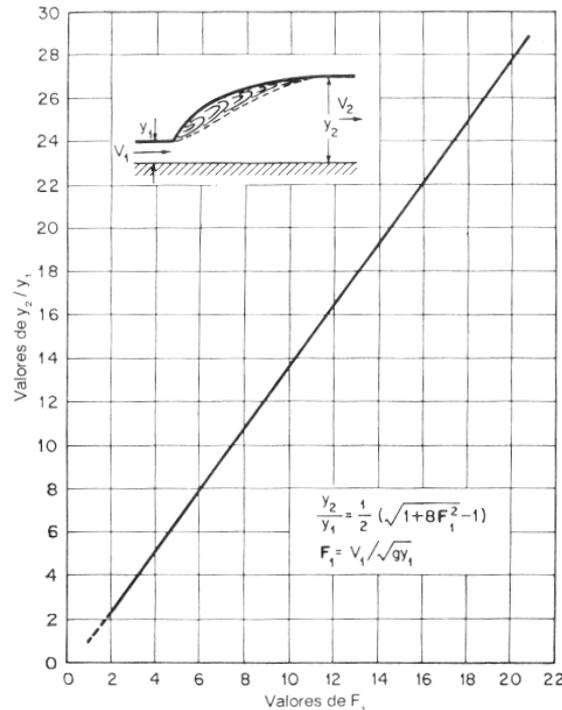


Figura IV-5. Relación entre F_1 e y_2/y_1 para un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal.

El uso de las ecuaciones (IV-17) [=ec. (IV-8)] y (IV-18) para solucionar problemas de salto hidráulico en canales rectangulares es bastante obvio ya que para flujo supercrítico en una canal rectangular horizontal, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo. Un resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad de flujo y_1 y la profundidad y_2 aguas abajo satisfacen las ecuaciones (I-17) y (I-18). Esta ecuación puede representarse mediante la curva mostrada en la figura I-5. Esta curva se ha verificado con muchos datos experimentales y es muy útil para el análisis y el diseño de resaltos hidráulicos.

Sin embargo, en el caso de la ecuación (IV-18) pueden surgir dificultades importantes de cálculo. En esta ecuación, F_2^2 es a menudo pequeño, el término $\sqrt{1 + 8F_2^2}$ se aproxima a 1 y, por tanto, el término $(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1)$ se aproxima a cero. La dificultad se presenta cuando se trata de conservar la precisión en el cálculo, al mismo tiempo que se intenta obtener una diferencia pequeña entre dos números relativamente grandes. Esta dificultad puede evitarse si se expresa el término $\sqrt{1 + 8F_2^2}$ como el desarrollo de una serie binomial, tal y como se describe en French (1988),

$$\sqrt{1 + 8F_2^2} = 1 + 4F_2^2 - 8F_2^4 + 32F_2^6 + \dots \tag{IV-19}$$

Así, al sustituir la ecuación (IV-19) en la (IV-18),

$$\frac{y_1}{y_2} = 2F_2^2 - 4F_2^4 + 16F_2^6 + \dots \tag{IV-20}$$

La ecuación IV-20 puede utilizarse cuando F_2^2 es muy pequeño; por ejemplo, cuando $F_2^2 \leq 0,05$.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En el análisis de saltos hidráulicos en canales prismáticos no rectangulares no hay ecuaciones análogas a las ecuaciones (IV-17) y (IV-18). En estos casos, la ecuación (IV-15) puede resolverse por tanteos, pero también se pueden emplear aproximaciones semiempíricas y analíticas en esta ecuación proporcionada para secciones circulares y otras secciones usuales en canales.

En el caso de canales circulares, una gráfica logarítmica (log-log) de y_c/d frente a $(Q\sqrt{\alpha}/\sqrt{g})^{2.5}$ da una línea recta en el intervalo $0.02 < y_c/d \leq 0.85$. Mediante un análisis de regresión de esta recta se obtiene la ecuación

$$y_c = \frac{1.01}{d_0^{0.264}} \left(\frac{Q\sqrt{\alpha}}{\sqrt{g}} \right)^{0.506} \quad (\text{IV-21})$$

siendo α el coeficiente de corrección de carga de velocidad o de Coriolis, y_c el calado crítico (calado para la energía específica mínima) y $d_0 =$ diámetro de la tubería. Se puede notar que la relación y_c/d sólo raras veces excede, en la práctica a 0,85, cuando es casi imposible mantener el flujo crítico cercano al tope de un canal circular. Así, la ecuación (IV-21) se aplica a la región de interés general.

Straub, en 1978, (información obtenida de French, 1988) notó que en conductos circulares, el número de Froude F_1 aguas arriba del resalto, puede aproximarse mediante

$$F_1 = \left(\frac{y_c}{y_1} \right)^{1.93} \quad (\text{IV-22})$$

donde $y_1 =$ tirante del flujo aguas arriba e y_c se estima por la ecuación (IV-21). Straub (1978) también notó que para $F < 1,7$ el tirante conjugado y_2 puede estimarse por

$$y_2 = \frac{y_c^2}{y_1} \quad (\text{IV-23})$$

y para $F > 1,7$

$$y_2 = \frac{c^{1.8}}{y_1^{0.73}} \quad (\text{IV-24})$$

Estas ecuaciones proveen una base práctica para estimar parámetros de salto hidráulico en un canal de sección circular.

Para otros canales de sección prismática, como los triangulares, parabólicos y trapeziales, se requiere generalmente una solución gráfica o por tanteo de la ecuación (IV-15). Silvester (1964, 1965) [citado en French, 1988] notó que para cualquier canal prismático, la distancia a los centroides de las áreas hidráulicas \bar{z}_i puede expresarse como

$$\bar{z}_i = k'_i \cdot y_i \quad (\text{IV-25})$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

en donde el subíndice i indica la sección, y es el calado mayor del flujo en la sección especificada y k' es un coeficiente. La ecuación de un salto hidráulico en un canal horizontal es

$$A_1 \kappa'_1 y_1 - A_2 \kappa'_2 y_2 = \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) \tag{IV-26}$$

Si se reagrupa la ecuación (IV-26), dará

$$\kappa'_2 \frac{A_2}{A_1} \frac{y_2}{y_1} - \kappa'_1 = F_1^2 \frac{A_1}{y_1 T_1} \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right) \tag{IV-27}$$

donde el parámetro F_1^2 lo definió Silvester (1964) como $F_1^2 = Q^2 / g A_1^2 y_1$ y, posteriormente (Silvester, 1965) encontró que $F_1^2 = Q^2 / g A_1^2 D_1$ es la definición estándar del número de Froude para canales no rectangulares.

Para canales rectangulares, $k'_1 = k'_2 = 1/2$, $A_1 / A_2 = y_1 / y_2$, y $A_1 / T_1 = D_1 = y_1$. Con estas definiciones, la ecuación (IV-27) será

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 - 1 = 2 F_1^2 \left(1 - \frac{y_1}{y_2} \right) \tag{IV-28}$$

Aunque esta ecuación puede reducirse a la ecuación (IV-17) (con el fin de obtener soluciones gráficas generales de los problemas de calado conjugado) la ecuación dada arriba es satisfactoria. Para poder realizar comparaciones, la solución de esta ecuación se grafica, junto con las otras soluciones en la figura IV-6.

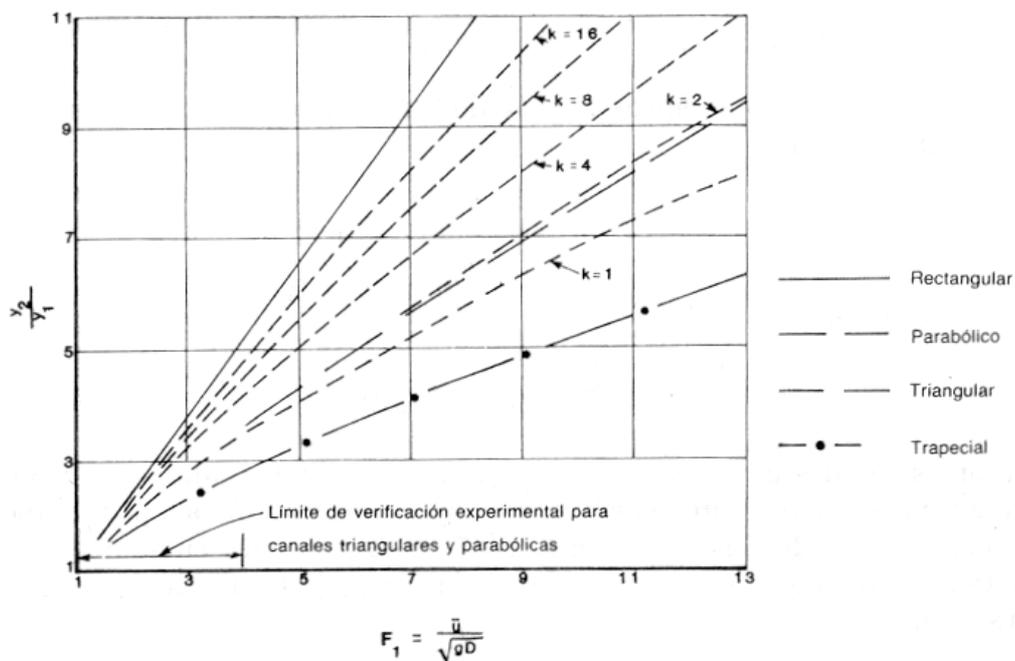


Figura IV-6. Curvas analíticas para y_2/y_1 , contra F_1 . En las curvas de canales parabólicos se muestran distintos valores de k .

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Para canales triangulares, $k'_1 = k'_2 = 1/3$, $A_1/A_2 = y_1^2 / y_2^2$, y $A_1/T_1 = D_1 = Y_1/2$. Con estas definiciones la ecuación (IV-27) será

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - 1 = 1.5 F_1^2 \left[1 - \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^2 \right] \quad (\text{IV-29})$$

Para canales parabólicos cuyos parámetros pueden definirse por $y = aT^2/2$, en donde a es una constante, $k'_1 = k'_2 = 2/5$, $A_1/A_2 = (y_1/y_2)^{1.5}$, y $A_1/T_1 = D_1 = 2y_1/3$. Con estas definiciones, la ecuación (IV-27) será

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{2.5} - 1 = 1.67 F_1^2 \left[1 - \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^{1.5} \right] \quad (\text{IV-30})$$

Esta ecuación se grafica en la figura IV-6.

Para canales trapeciales, la ecuación (IV-27) debe resolverse directamente. Silvester (1964), definió un factor de forma

$$k = b/zy_1 \quad (\text{IV-31})$$

donde b es el ancho del fondo del trapecio y z es el talud del trapecio. Con el uso de este factor de forma, la ecuación (IV-27) puede resolverse para este tipo de canal, de la cual resulta una familia de curvas de solución (Figura IV-6).

Silvester (1964, 1965) verificó los resultados teóricos graficados en la figura IV-6 con datos de laboratorio tomados del trabajo de Argyropoulos (1957, 1961), Hsing (1937), Sandover y Holmes (1962) y Press (1961). En los resultados de laboratorio para canales triangulares, el valor de F_1 no excedió a 4, asimismo se notó dispersión de los datos. Para este caso, todos los datos experimentales se agruparon en un canal simple que incluía un ángulo de 47,3 grados, en consecuencia fue más angosto y profundo. Para canales parabólicos, la coincidencia entre los resultados experimentales y de laboratorio resultó generalmente, excelente. También en este caso, el valor de F nunca excedió a 4. Para los canales trapeciales hubo un favorable grado de dispersión de los datos; aunque Silvester (1964) atribuyó la desviación entre los resultados de laboratorio y los teóricos a varios problemas y limitaciones que se presentaron en la experimentación. En general, las curvas graficadas en la figura 6 proveen un adecuado método para estimar el valor de y_2/y_1 si se conoce F_1^2 .

IV.2.3 Tipos de resalto.

Los resaltos hidráulicos en fondos horizontales se clasifican en varias clases. De acuerdo con los estudios del U. S. Bureau of Reclamation éstos pueden clasificarse convenientemente según el número de Froude F_1 del flujo entrante (figura IV-7), como sigue:

- Para $F_1 = 1$, el flujo es crítico y por consiguiente no se forma resalto.
- Para $F_1 = 1$ a 1.7, la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el *resalto ondulante*.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

- Para $F_1 = 1.7$ a 2.5 , se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta entonces el *resalto débil*.
- Para $F_1 = 2.5$ a 4.5 , existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a lo largo de varios kilómetros causando daños a bancales de tierra y escolleras de protección. Se produce entonces el *resalto oscilante*.
- Para $F_1 = 4.5$ a 9.0 , la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70%. Se presenta entonces el *resalto estable*.
- Para $F_1 = 9.0$ y mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que discurren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Se produce entonces el *resalto fuerte*.

Se debe recalcar que los rangos del número de Froude dados arriba para los diferentes tipos de resalto no están claramente demarcados sino que se traslapan en cierto modo según las condiciones locales.

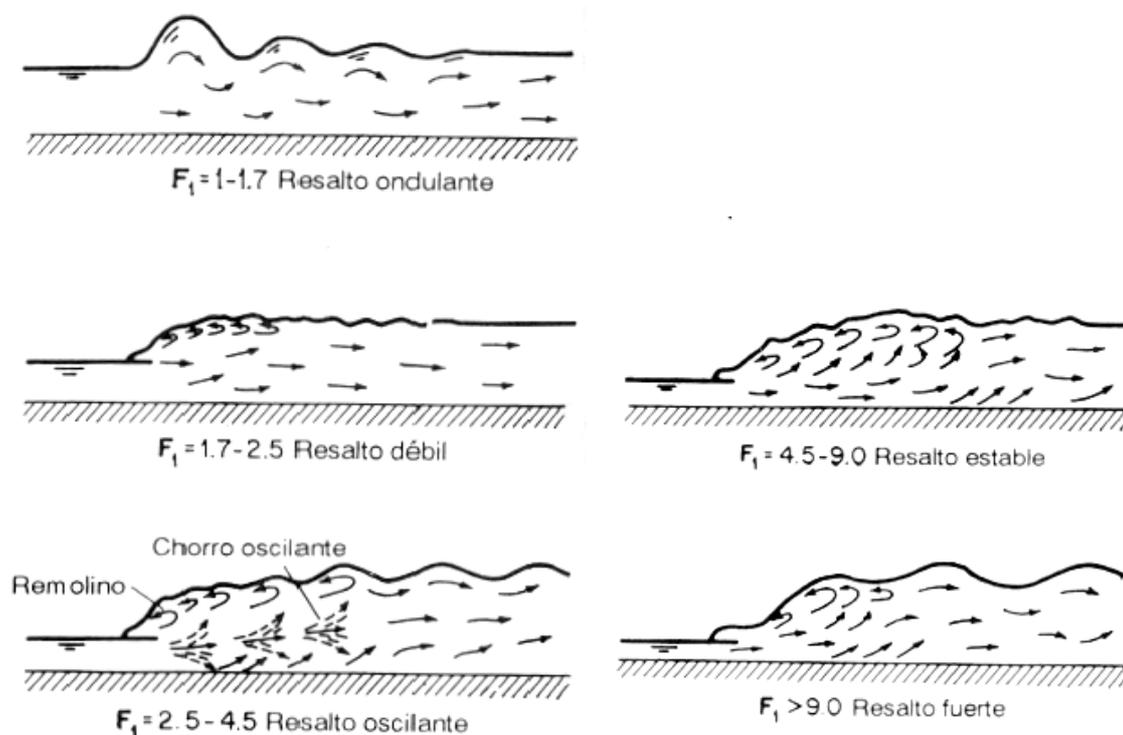


Figura IV-7. Diferentes tipos de resallos hidráulicos.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resallos hidráulicos

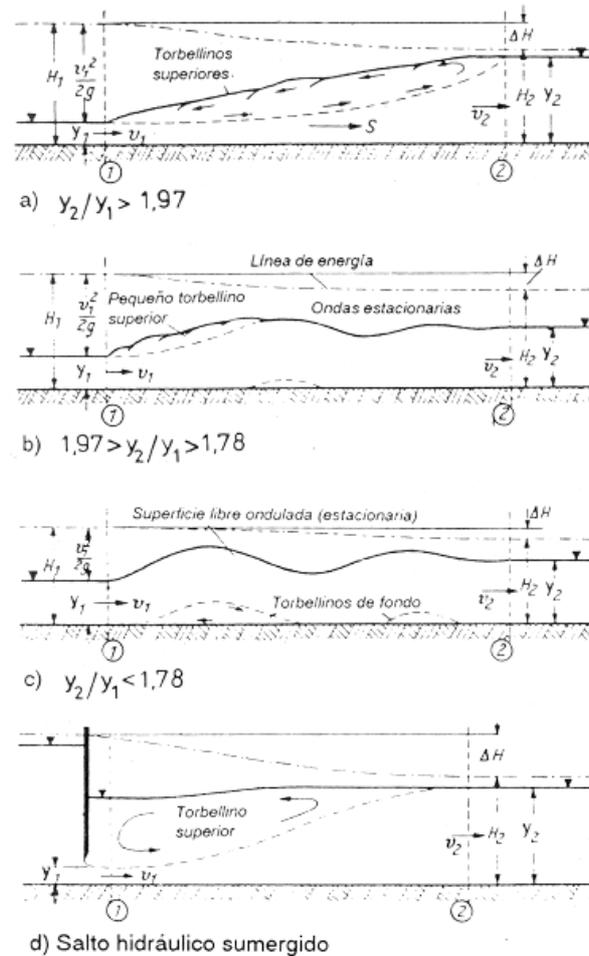


Figura IV-8. Formas del salto hidráulico según Schröder.

En la Figura IV-8 se observan distintas formas de resaltos atendiendo a la relación entre los calados conjugados:

- Cuando $y_2/y_1 > 1,97$, se forman torbellinos superiores en el perfil superficial del resalto.
- Para $1,97 > y_2/y_1 > 1,78$, aparecen pequeños torbellinos en el perfil superficial y se producen ondas estacionarias aguas abajo del resalto.
- Con $y_2/y_1 < 1,78$ se produce una superficie libre ondulada, apareciendo torbellinos en la solera del canal.
- En el caso del resalto hidráulico sumergido, se muestra la forma del torbellino superior que se produce en su interior.

IV.2.4 Pérdida de energía

En muchas aplicaciones la función principal del salto hidráulico es la disipación de energía. En un canal horizontal, el cambio de la energía cercana al salto es

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (\text{IV-32})$$

donde

ΔE = cambio en la energía de la sección 1 a la 2

E_1 = energía específica en la sección 1

E_2 = energía específica en la sección 2

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

La pérdida de energía ΔE en el salto hidráulico (figura IV-1b) se calcula a partir de la ecuación de la energía, suponiendo que $\alpha_1 \cong \alpha_2 \cong 1$; esto es:

$$\frac{q^2}{2gy_1^2} + y_1 = \frac{q^2}{2gy_2^2} + y_2 + \Delta E \quad (\text{IV-33})$$

con lo que se obtiene:

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \frac{(y_2/y_1 - 1)^3}{4 y_2/y_1} \quad (\text{IV-34})$$

La pérdida de energía se expresa comúnmente como una pérdida relativa $\Delta E/E_1$ o como una eficiencia E_2/E_1 .

En el caso de un canal rectangular horizontal, la pérdida de energía es:

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad (\text{IV-35})$$

y por tanto

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{2 - 2(y_2/y_1) + F_1^2 [1 - (y_1/y_2)^2]}{2 + F_1^2} \quad (\text{IV-36})$$

La relación entre la energía específica antes y después del resalto se define como la eficiencia del resalto, siendo la eficiencia:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (\text{IV-37})$$

De la representación en la figura IV-9 de estos resultados analíticos y de otros experimentales se desprende que todos los parámetros característicos del salto hidráulico, incluyendo el valor relativo de la profundidad y_2 con respecto a la longitud L del salto, son funciones del número de Froude $V_1/\sqrt{gy_1}$. En dicha figura se muestra, además, que la concordancia entre el análisis del flujo y el resultado experimental con respecto a y_2/y_1 es sorprendentemente buena a pesar: de las simplificaciones introducidas (por ejemplo, $\alpha = \beta = 1.0$). Se debe notar que a través del análisis unidimensional de flujo se puede, en este caso, evaluar la pérdida de energía y según se muestra en la figura IV-10, con muy buena aproximación. La razón para esto está en el hecho de que la pérdida de energía en el salto hidráulico es originada, en exclusiva, por fuerzas que son efecto de los vórtices (turbulencias en el interior de la masa líquida) y que no necesitan ser tomadas en cuenta en su calidad de fuerzas internas dentro de la ecuación del impulso. De manera diferente se comportan, por ejemplo, las pérdidas por fricción ya que están relacionadas con fuerzas cortantes, que definitivamente deberían introducirse en la ecuación (IV-1) como fuerzas exteriores que actúan sobre los contornos sólidos del flujo. Anteriormente se consideró que estas fuerzas eran pequeñas e insignificantes en comparación con las demás cantidades.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

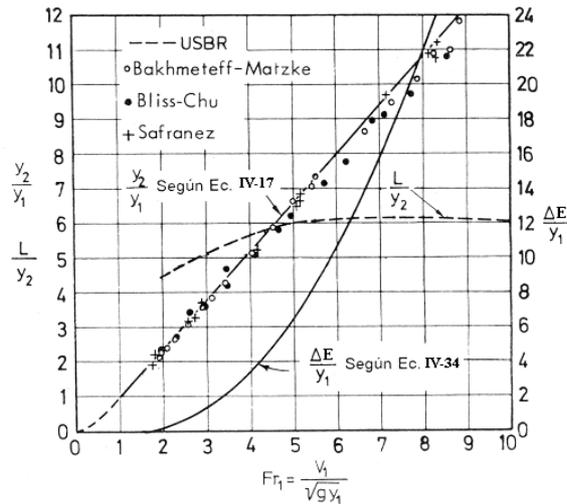


Figura IV-9. Parámetros característicos del salto hidráulico en un canal rectangular.

En la figura IV-10 se muestra la pérdida de energía originada en el salto hidráulico ΔE , en relación con la altura de energía específica en la sección de entrada E_1 , y se compara con los resultados experimentales del *U.S. Bureau of Reclamation* (1964). Según se puede observar, esta pérdida aumenta en forma considerable con el número de Froude y alcanza valores sorprendentemente altos. Así por ejemplo, Δh para un $F_1=5$ llega a ser alrededor del 50% de la altura original de la energía específica. Este comportamiento explica claramente la razón por la cual el salto hidráulico se utiliza con frecuencia para disipar el exceso de energía en infraestructuras de evacuación de avenidas.

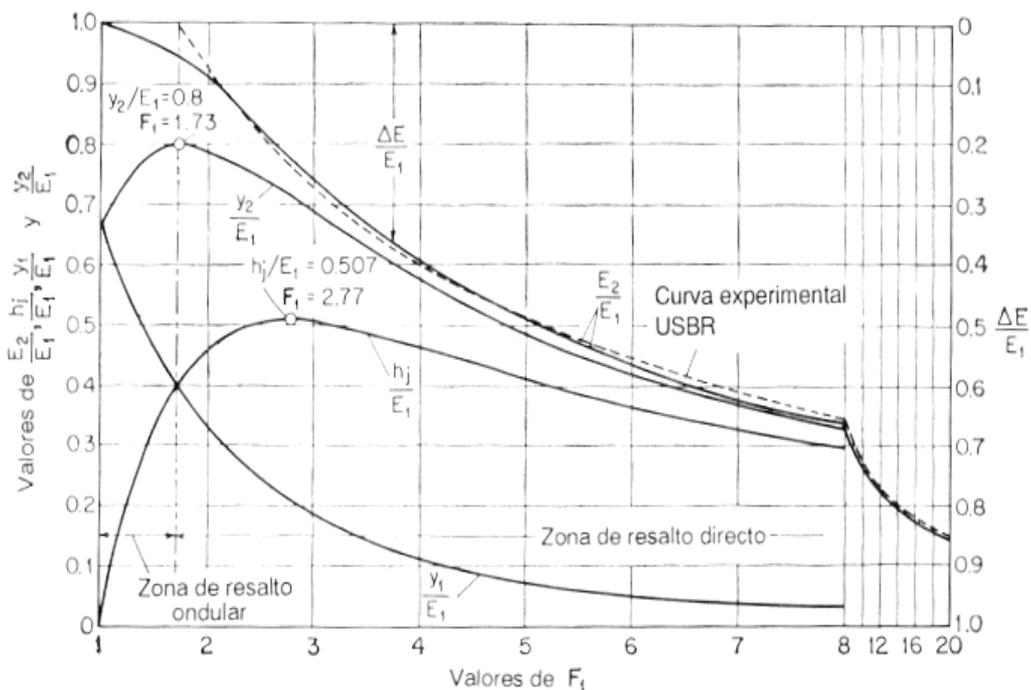


Figura IV-10. Curvas características de resaltos hidráulicos en canales rectangulares horizontales.

Para otros canales de sección prismática, cualquiera de las ecuaciones generales de energía específica puede resolverse analizando caso por caso, o bien obtenerse una solución gráfica general de esta ecuación. En términos de pérdida de energía relativa, la ecuación general de energía específica es

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{y_1 + (\bar{u}_1^2/2g) - y_2 - (\bar{u}_2^2/2g)}{y_1 + (\bar{u}_1^2/2g)} = \frac{y_1 - y_2 + (Q^2/2g)[(1/A_1^2) - (1/A_2^2)]}{y_1 + (Q^2/2gA_1^2)} \quad (IV-38)$$

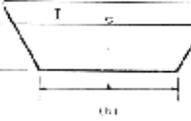
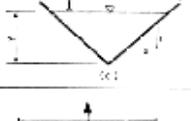
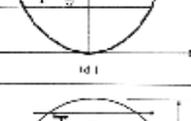
Silvester (1964, 1965) reagrupó la ecuación IV-38 para obtener

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{2y_1/D_1 [1 - (y_2/y_1)] + F_1^2 [1 - (A_1/A_2)^2]}{(2y_1/D_1) + F_1^2} \quad (IV-39)$$

Los valores de y_2/y_1 para cualquier F_1 especificado, pueden obtenerse de la figura IV-6, los valores del parámetro $[1 - (A_1/A_2)^2]$ de la tabla IV-1, y los valores del tirante hidráulico D , de la tabla IV-2. Con estos valores se puede encontrar una solución gráfica generalizada de la ecuación (IV-39) véase la figura IV-11. En ésta se grafica la pérdida de energía relativa para un salto hidráulico en un canal rectangular, con el objeto de realizar comparaciones. No obstante que se puede obtener una solución gráfica general para un canal circular de la ecuación (IV-39), en muchas ocasiones, es más simple resolver para la pérdida de energía, al resolver caso por caso.

Sección prismática del canal	Tirante (formulación dependiente de) $1 - (A_1/A_2)^2$
Triangular	$1 - (y_1/y_2)^4$
Parabólica	$1 - (y_1/y_2)^3$
Trapezoidal (con $k = b/zy_1$)	$1 - [(k + 1)/(k + y_2/y_1)] \cdot (y_1/y_2)^2$

Tabla IV-1. Formulaciones del término $[1 - (A_1/A_2)^2]$ para usarse en la ecuación (IV-39)

Canal tipo	Área A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Área superficial T	Tirante hidráulico D	Factor de sección Z
	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y	$by^{1.5}$
	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$	$\frac{[(b + zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$
	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$	zy	$\frac{\sqrt{z}}{9} zy^{2.5}$
	$\frac{3}{8}Ty$	$T + \frac{8}{3} \frac{y^{3/2}}{T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{3}{2} \frac{A}{y}$	$\frac{8}{3}y$	$\frac{8}{9}\sqrt{6}Ty^{1.5}$
	$\frac{1}{8} (d_c - \text{sen } \theta) d_c^3$	$\frac{3}{8} d_c$	$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta}\right) d_c$	$2\sqrt{y}(d_c - y)$	$\frac{1}{8} \left(\frac{\theta - \text{sen } \theta}{\text{sen } \theta}\right) d_c$	$\frac{\sqrt{2}(d_c - \text{sen } \theta)^{1.5}}{32\sqrt{\text{sen } \theta}} d_c^3$

* Aproximación satisfactoria cuando $0 < 4y/T \leq 1$.

Para $4y/T > 1$ $P = \frac{T}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{4y}{T}\right)^2} - \frac{T}{4y} \ln \left(\frac{4y}{T} + \sqrt{1 + \left(\frac{4y}{T}\right)^2} \right) \right]$

Tabla IV-2. Elementos geométricos de secciones en canales

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Con respecto a la figura IV-11, puede notarse que todas las demás formas de canal darán una mayor pérdida de energía relativa que la que se obtiene en un canal rectangular, para un número específico de Froude. Este resultado no se espera obtener cuando los canales con taludes proporcionan un grado de circulación secundaria y, por tanto, se incrementa la disipación de energía. Silvester (1965) notó que para un caudal dado, con velocidades aguas arriba y calados iguales, el canal triangular suministra la máxima disipación de energía.

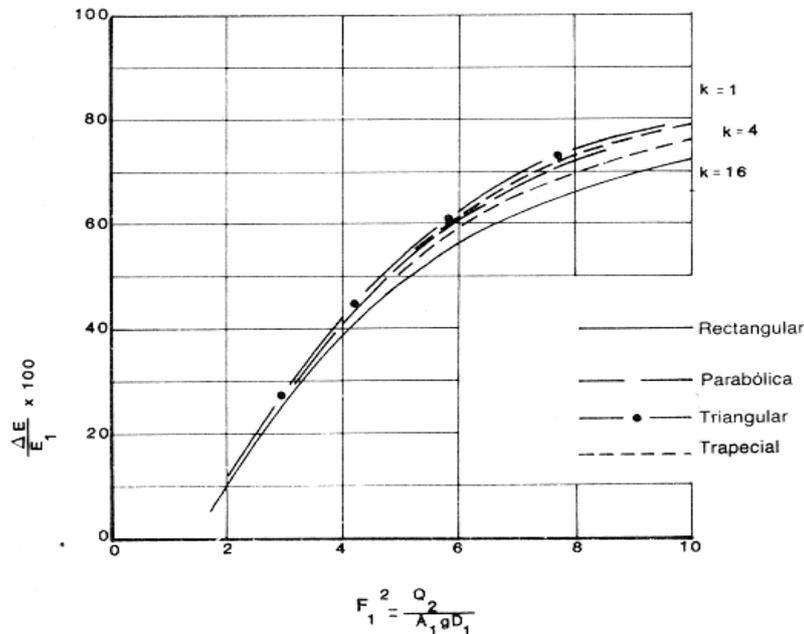


Figura IV-11. Pérdida de energía relativa en un salto hidráulico para varias secciones transversales.

La diferencia entre las profundidades antes y después del resalto es la altura del resalto, o $\Delta h = y_2 - y_1$.

Al expresar cada término como la relación con respecto a la energía específica inicial,

$$\frac{\Delta h}{E_1} = \frac{y_2}{E_1} - \frac{y_1}{E_1}$$

donde $\Delta h/E_1$ es la altura relativa, y_1/E_1 es la profundidad inicial relativa, e y_2/E_1 es la profundidad seciente relativa. Puede demostrarse que todas estas relaciones son funciones adimensionales de F_1 . Por ejemplo,

$$\frac{\Delta h}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3}{F_1^2 + 2} \tag{IV-40}$$

Como la pérdida relativa, la eficiencia, la altura relativa y las profundidades inicial relativa y seciente relativa de un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal son funciones de F_1 , pueden graficarse contra F_1 , dando como resultado un conjunto de curvas características (figura IV-10). Con referencia a estas curvas, nótese los siguientes aspectos:

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

- El valor máximo de la diferencia de altura relativa en el salto $\Delta h/E_1 = (y_2 - y_1)/E_1$ es 0.507 y es alcanzado para $F_1 = 2.77$.
- El valor máximo de la profundidad relativa de aguas abajo y_2/E_1 es 0.8 y corresponde a un valor y_1/E_1 de 0.4 para $F_1 = 1.73$.
- En, aproximarse, $F_1 = 1.73$, se encuentra el límite entre el salto hidráulico ondulado y un salto hidráulico con remolino superior, según las investigaciones del U.S. Bureau of Reclamation (1964); para $F_1 > 1.73$, se puede empezar a medir la disipación de energía.
- Para un $F > 1.73$ se introduce al pie del remolino superior mayor cantidad de aire para mayores números de Froude.
- Para un número de Froude mayor que 2 y hasta 3, permanece aproximadamente constante el perfil longitudinal del salto hidráulico, normalizado con la altura del salto $\Delta h = y_2 - y_1$. Respecto a la dificultad de determinar la longitud del remolino superior, se puede suponer que para $F > 4$ esta longitud L_D difiere muy poco del valor $6y_2$ (figura I-9).
- Cuando $F_1 = 1$, el flujo es crítico e $y_1 = y_2 = 2/3 E_1$.
- Cuando F_1 aumenta, los cambios en todas las relaciones características se vuelven graduales.

Desde el punto de vista práctico es muy importante la observación de que en el intervalo $1 < F_1 < 1.7$, el salto hidráulico se produce en forma ondulada, según se indica en la figura IV-8c, y disipa una insignificante cantidad de energía cinética. (Ondas permanentes semejantes se presentan en el caso del flujo perturbado en un canal con profundidades de agua escasamente mayores a y_c . Así, por ejemplo, la línea de superficie libre aguas abajo del estrechamiento, sería en realidad ondulada. Además se tiene que las ondas permanentes se extienden un buen tramo hacia aguas abajo. Por esta razón debe evitarse este intervalo de número de Froude, si se desea utilizar el salto hidráulico en una estructura de disipación de energía. La zona más favorable para satisfacer este objetivo está comprendida entre los números de Froude 4.5 a 9, según los estudios del U.S. Bureau of Reclamation (1964). En la parte inferior de este intervalo, el salto hidráulico oscila, si es que no se logra estabilizar con medidas adecuadas; y para mayores números de Froude, particularmente para $F \cong 13$, las condiciones del flujo aguas abajo son totalmente turbulentas y las medidas necesarias para proteger el fondo del canal resultan más costosas.

Las curvas características darán al diseñador una idea general del rango de condiciones en las cuales la estructura debe operarse. Por ejemplo, en el diseño de una compuerta deslizante que involucre un resalto por debajo de la compuerta, estas curvas mostrarán con claridad la formación del resalto para diferentes aberturas de la compuerta bajo una altura determinada. El análisis anterior se aplica a canales horizontales rectangulares y no rectangulares.

Bakhmeteff y Matzke verificaron experimentalmente las curvas teóricas para y_2/E_1 y $\Delta h/E_1$ y encontraron que estas curvas dan valores de y_2/E_1 y $\Delta h/E_1$ alrededor de un 3% al 4% mayores que los valores experimentales (es posible que al menos parte de esta discrepancia se deba al efecto de escala del modelo de prueba). Las curvas características también fueron verificadas por el U. S. Bureau of Reclamation con datos obtenidos en seis canales de prueba. Se encontró concordancia perfecta entre la curva y_1/E_1 y los datos. La correspondencia entre las curvas E_2/E_1 o $\Delta E/E_1$ y los datos fue razonablemente buena excepto para $F_1 < 2$. La curva experimental para $\Delta E/E_1$ recomendada por el Bureau se

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

muestra mediante la línea punteada (figura IV-10). La correspondencia entre las curvas y_2/E_1 y $\Delta h/E_1$ y los datos fue buena para valores altos de F_1 , pero los datos dispersos no lograron definir con exactitud las curvas para $F_1 < 3$.

IV.2.5 Resalto sumergido

En la sección anterior, se analizaron las metodologías para determinar el calado aguas abajo que debe prevalecer si se forma un salto hidráulico, cuando se conoce una condición que se especificó en términos supercríticos aguas arriba. Si el tirante aguas abajo es menor que el tirante conjugado y_2 , entonces no se formará el salto, por lo que se mantendrá el flujo supercrítico. Si el tirante aguas abajo es mayor que y_2 , se formará un salto sumergido (Fig. IV-12). Los saltos sumergidos suelen formarse aguas abajo de compuertas o esclusas en sistemas de riego, así que la incógnita crucial en dichas situaciones es el tirante sumergido y_3 .

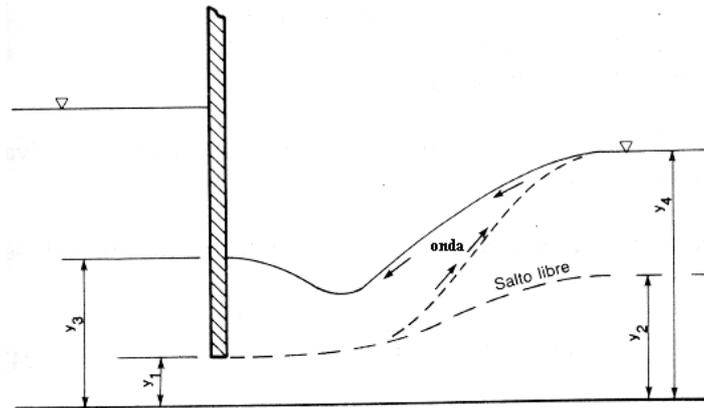


Figura IV-12. Definición esquemática para salto sumergido.

Mediante los principios de conservación de la cantidad de movimiento y de masa Govinda Rao (1963) [citado en French, 1988] demostró que en canales rectangulares horizontales

$$\frac{y_3}{y_1} = \left[(I + S)^2 \phi^2 - 2F_1^2 + \frac{2F_1^2}{(I + S)\phi} \right]^{1/2} \quad (\text{IV-41})$$

donde

$$S = \frac{y_4 - y_2}{y_2} \quad (\text{IV-42})$$

$$\phi = \frac{y_2}{y_1} = \frac{I}{2} \left(\sqrt{I + 8F_1^2} - I \right) \quad (\text{IV-43})$$

e y_2 es el calado conjugado subcrítico del salto libre correspondiente a y_1 y F_1 . Govinda Rao verificó la ecuación (IV-41) con datos obtenidos en numerosos experimentos de laboratorio. Para esta misma situación, Chow (1959) dio la siguiente ecuación:

$$\frac{y_3}{y_4} = \left[I + 2F_4^2 \left(I - \frac{y_4}{y_1} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{IV-44})$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

La ecuación (IV-44) proporciona estimaciones de y_3 que son comparables con las obtenidas a partir de la ecuación (IV-41).

IV.2.6 Longitud del resalto hidráulico.

Aunque la longitud de un salto hidráulico es un parámetro crucial en el diseño, en general ésta no puede establecerse de consideraciones teóricas; los resultados de algunas investigaciones experimentales han arrojado resultados en cierto sentido contradictorios. La longitud del salto hidráulico L_j se define como la distancia que hay desde la cara frontal del salto hasta un punto inmediato sobre la superficie del flujo aguas abajo de la onda asociada con el salto (Fig. IV-13).

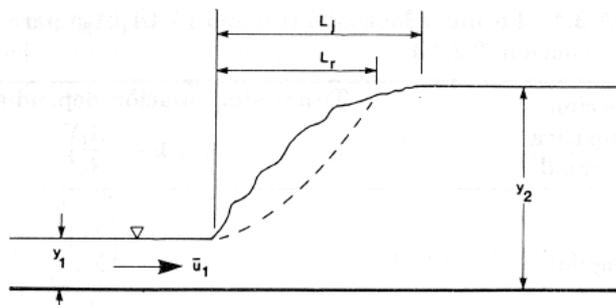


Figura IV-13. Definición esquemática del salto y longitud de la onda.

Existen diversas gráficas para el cálculo de esta longitud, mostrándose a continuación tres de las más usadas.

Los datos experimentales sobre la longitud del resalto pueden graficarse mediante el número de Froude F_1 contra una relación adimensional $L/(y_2 - y_1)$, L/y_1 o L/y_2 . La gráfica de F_1 versus L/y_1 es tal vez la mejor, debido a que la curva resultante es la que mejor definen los datos. Sin embargo, para propósitos prácticos, la gráfica de F_1 versus L/y_2 es conveniente, debido a que la curva resultante muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos bien establecidos. En la estimación de esta longitud, deben considerarse los siguientes casos especiales.

En el caso de un clásico salto hidráulico que ocurre en un canal rectangular horizontal, la distancia L_j suele estimarse a partir de la curva de Bradley y Peterka (1957a) que es una gráfica de F_1 contra L_j/y_2 (Figura IV-14). Esta curva tiene una sección plana cuando toma los valores de los números de Froude y además proporciona el mejor funcionamiento, asimismo su validez está avalada por los datos de Rajaratnam (1965). Se puede notar que no existen marcadas diferencias entre esta curva y la derivada de los datos de Bakhmeteff y Matzke (1936). Tanto Bradkey y Peterka (1957a) como Chow (1959) atribuyen esta diferencia a los efectos de la escala involucrada en los datos de Bakhmeteff y Matzke (1936), pudiendo ser derivadas de que el modelo utilizado por estos investigadores no reprodujo con exactitud el comportamiento del prototipo.

Los datos para la longitud de la onda L_r dan como resultado tres curvas que son marcadamente diferentes una de otra (Fig. IV-14). A partir de esta figura se puede concluir que L_r es siempre menor que L_j y la curva derivada a partir de los datos de Rajaratnam

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

(1965) se ubica entre las curvas definidas por los datos de Rouse et. al (1959) y por los de Safranez (1934) (curva inferior).

Silvester (1964) demostró que para canales rectangulares horizontales la proporción L_j/y_1 es una función del número de Froude supercrítico aguas arriba. Aunque esta relación funcional ya se observó en el trabajo original de Bradley y Peterka (1957a), no ha sido utilizada, ya que resulta más conveniente la figura IV-14.

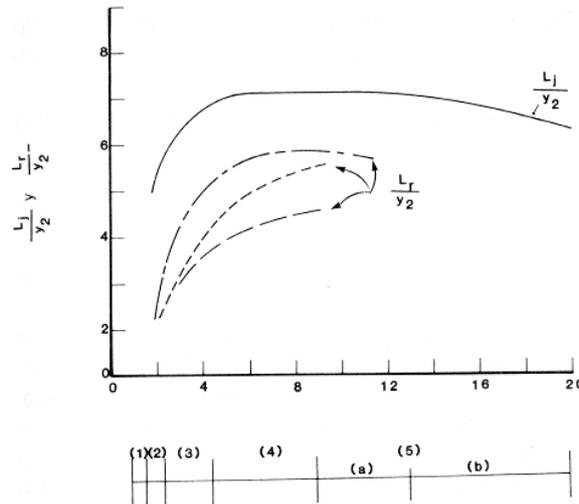


Figura I-14. Longitud del salto hidráulico como función del tirante conjugado y del número de Froude aguas arriba. Leyenda: 1, salto ondular; 2, salto débil (sólo superficie turbulenta); 3, salto oscilante (ondulado); 4, salto permanente (mejor rendimiento) 5, salto fuerte -a) rendimiento aceptable, b) depósito de solera extensiva y condiciones de superficie rugosa. L_j = longitud del salto; L_r = longitud de la onda (Bradley y Peterka, 1957a; Rouse et al., 1959, Rajaratnam, 1967,- Safranez, 1934).

Una curva de F_1 versus L_r/y_2 (figura IV-15) basada en los datos experimentales de seis canaletas de prueba la preparó el Bureau of Reclamation. Al comparar esta curva con la de Bakhmeteff-Matzke, se encontró una discrepancia muy importante. La investigación sobre este tema ha llevado a la creencia de que esta discrepancia se debe al efecto de escala involucrado en los datos experimentales de Bakhmeteff y Matzke. Este efecto de escala significa que la acción del prototipo no se reprodujo con fidelidad en el modelo. La curva mostrada en la figura IV-15 se desarrolló ante todo para resaltos en canales rectangulares. En ausencia de datos adecuados, esta curva puede aplicarse aproximadamente a resaltos formados en canales trapezoidales.

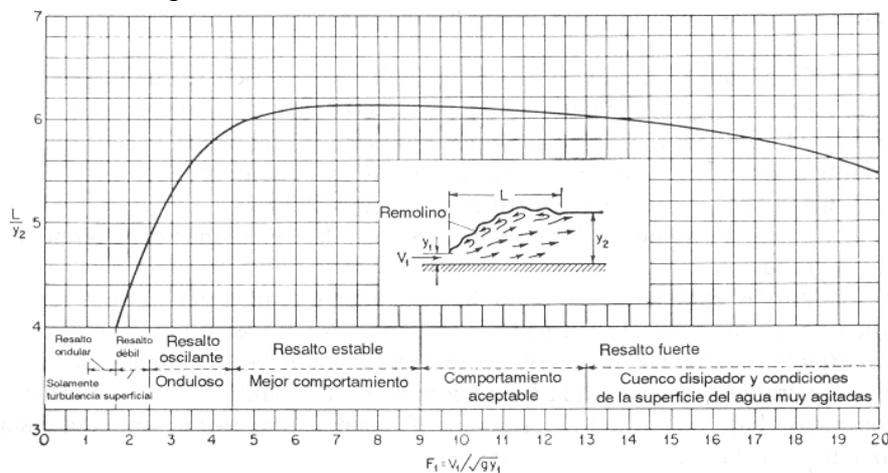


Figura I-15. Longitud en términos de la profundidad secante y_2 de resaltos en canales horizontales (con base en los datos y recomendaciones del U. S. Bureau of Reclamation).

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

El esquema de la figura IV-16 muestra, además de la longitud del salto hidráulico L , la longitud $L_D = L_r$ del remolino superior del mismo ($L_D < L$) y la distancia $L^* = L_j$ desde el pie del salto hidráulico hasta una determinada sección transversal aguas abajo ($L^* > L$), en la que ha desaparecido el efecto del salto hidráulico sobre la distribución de velocidades. La longitud del remolino superior crece desde $L_D \approx 0.4L$ para $F_1 = 3$ hasta $L_D \approx 0.7L$, para $F_1 = 9$ y es, al igual que L , prácticamente independiente de las condiciones del flujo de aproximación. Esto último no corresponde a la longitud L^* , según se indica en la figura IV-16. Según las investigaciones de Leutheusser y Kartha (1972) la relación L^*/y_2 en el salto hidráulico aguas abajo de una compuerta es alrededor de un 25% menor que la de un salto hidráulico similar aguas abajo de una rápida. Hughes y Flack (1984) informan de la influencia de la rugosidad en el fondo.

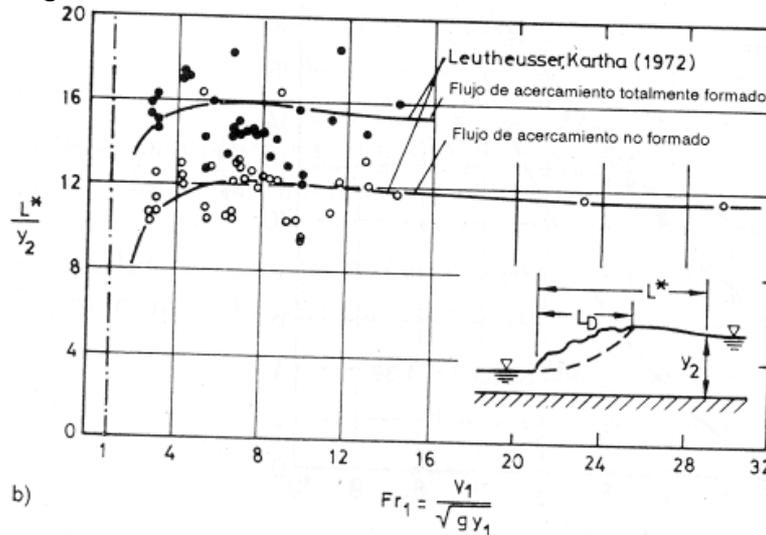


Figura IV-16. Parámetros característicos del salto hidráulico en un canal rectangular.

Como ecuación empírica de la longitud del resalto, se puede emplear la obtenida, tras muchas pruebas de laboratorio, por el Bureau of Reclamation:

$$L = 5,9 (y_2 - y_1) \tag{IV-45}$$

Para el caso de secciones no rectangulares Silvester (1964) ha propuesto la hipótesis de que existe una relación funcional entre la relación L_j/y_1 para canales prismáticos de cualquier forma o

$$\frac{L_j}{y_1} = \sigma (F_1 - 1)^{\Gamma} \tag{IV-46}$$

donde σ y Γ son factores de forma. Aunque las relaciones presentadas en el siguiente material no se han verificado mediante pruebas de laboratorio y de campo extensivas, proveen un método aproximado para estimar L_j para varias formas de canales.

Para canales triangulares, la relación desarrollada por Silvester (1964) es

$$\frac{L_j}{y_1} = 4.26 (F_1 - 1)^{0.695} \tag{IV-47}$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Esta ecuación está basada en datos de un canal simple que incluye un ángulo de 47,3° (Argyropoulos, 1957); probablemente no sea válida en canales triangulares cuyos taludes sean fuertes o suaves.

Para canales parabólicos, el análisis de Silvester de los datos de Argyropoulos (1957) dio

$$\frac{L_j}{y_1} = 11.7(F_1 - 1)^{0.832} \quad (\text{IV-48})$$

Esta ecuación proporciona un deficiente ajuste de los datos disponibles cuando F_1 excede de 3.

Para el caso de secciones trapeciales, Silvester, Hsing (1937), Sandover y Holmes (1962), y Press (1961), proporcionaron conjuntos de datos distintos. Anteriormente, se demostró que para canales trapeciales la relación y_2/y_1 depende no únicamente de F_1 , sino también del factor de forma k . Así, puede esperarse que para cada valor de k exista un conjunto único de valores ϕ y Γ . En el caso de los datos de Press (1961), esto fue verdadero y los resultados para este conjunto de datos se resumen en la tabla IV-3. En el caso de los datos de Hsing (1937), los valores de ϕ no tienen un efecto aparente, asimismo todo parece sugerir que el valor de z afecta a estos datos. Los datos de Hsing muestran variaciones en el valor de F_1 para valores constantes de L_j , lo cual fue, probablemente, el resultado de dificultades experimentales al medir la distancia L_j bajo condiciones controladas. Sandover y Holmes (1962) no encontraron correlación entre los datos L_j y F_1 . Así, los valores de ϕ y Γ utilizados para estimar L_j en el caso de canales trapeciales se basan, por completo, en los datos de Press (1961).

Una notoria característica de los saltos hidráulicos, que tanto Hsing (1937) como Press (1961) observaron fue que el flujo opuesto de la onda ocasiona un incremento del calado en los lados del canal y un correspondiente decremento en el calado del flujo a lo largo del eje del salto. Esta variación transversal en el tirante del flujo pudiera ocasionar problemas en la adecuada determinación de la longitud del salto.

Talud z	Factor de forma k	σ (ft)	Γ
2	16	17.6	0.905
1	8	23.0	0.885
0.5	4	35.0	0.836

con $k=b/zy$

Tabla IV-3. Definición de parámetros ϕ y Γ de longitud del salto hidráulico para canales trapeciales (según Press, 1961)

Los resultados obtenidos por Kindsvater (1936) para canales circulares son limitados y no bastan para colegir conclusiones útiles.

En el caso de un salto hidráulico sumergido (Fig. IV-12), la distancia L_j se estima mediante la ecuación empírica

$$\frac{L_j}{y_2} = 4.9S + 6.1 \quad (\text{IV-49})$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

donde S = factor de sumersión definido por la ecuación (IV-42) (Govinda Rao, 1963). La ecuación (IV-49) demuestra que la longitud de un salto sumergido excede la longitud del correspondiente salto libre por un término de $4.9S$ y, por tanto, L_j es directamente proporcional a S . Stepanov (1959) encontró que la longitud de la onda en el caso de un salto sumergido puede calcularse por

$$\frac{L_r}{y_c} = \frac{3.31}{[(y_4 - y_3/y_3 F_1)]^{0.885}} \quad (\text{IV-50})$$

Se ha mostrado que esta ecuación es válida para $S \leq 2$ y $1 \leq F \leq 8$ (Rajaratnam, 1967).

IV.2.7 El perfil superficial.

El conocimiento del perfil superficial de un resalto es necesario en el diseño del borde libre para los muros laterales del cuenco disipador donde ocurre el resalto. También es importante para determinar la distribución de presiones que debe utilizarse en el diseño estructural, puesto que la presión vertical en el piso horizontal bajo un resalto hidráulico es prácticamente la misma que indicaría el perfil de la superficie del agua.

Con base en sus datos experimentales, Bakhmeteff y Matzke, encontraron que el perfil superficial de un resalto hidráulico puede representarse mediante curvas adimensionales para varios valores de F_1 , como se muestra en la figura IV-17. Moore desarrolló curvas similares para resaltos por debajo de una caída libre. Los perfiles mostrados por Moore al principio aumentan con mayor rapidez que los perfiles de Bakhmeteff y Matzke. Se supone que se debe a la distribución no hidrostática de presiones en el resalto, que las mediciones piezométricas en los datos de Bakhmeteff y Matzke no se registraron de manera adecuada. Además, la longitud del resalto dada por Moore fue alrededor de un 20% mayor que la mostrada por las curvas de Bakhmeteff-Matzke, debido a que el resalto en este último caso se formó aguas abajo de una compuerta deslizante, existiendo una diferencia en el perfil de velocidad del flujo supercrítico que entra al resalto.

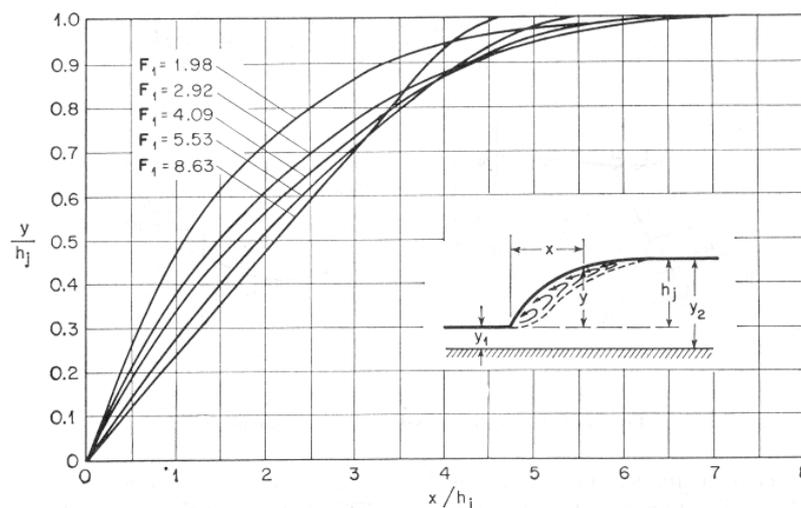


Figura IV-17. Perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos en canales horizontales (con base en los datos de Bakhmeteff-Matzke).

IV.2.8 Ecuaciones fundamentales del flujo turbulento y distribución de velocidades en un canal

En la práctica, la mayoría de los flujos de canales abiertos presentan un número de Reynolds mayor de 1000, siendo por tanto el régimen del flujo turbulento. La aparente naturaleza aleatorio de la turbulencia llevó a muchos investigadores a suponer que este fenómeno puede ser descrito en términos estadísticos. Con base en esta suposición, es conveniente definir la velocidad instantánea en términos de una velocidad de tiempo medio y una fluctuación de componente aleatoria. Para un sistema de coordenadas cartesianas, las velocidades instantáneas en las direcciones x , y , z , son respectivamente,

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \quad (\text{IV-51})$$

Las velocidades medias descritas pueden ser determinadas promediando respecto al tiempo en un punto del espacio. En este estudio se emplea una simbología en la que \bar{u}_T indica un promedio en el tiempo mientras que \bar{u} indica un promedio en el espacio. En adelante, las estadísticas se definirán únicamente en la dirección x ya que, estas mismas definiciones, se aplican también a las otras dos direcciones de las coordenadas cartesianas. La velocidad de tiempo medio se define como:

$$\bar{u}_T = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (\text{IV-52})$$

en donde T indica una escala de tiempo que es mucho mayor que la escala de tiempo de la turbulencia. La velocidad media espacialmente está dada por:

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \int_A u dA \quad (\text{IV-53})$$

Para fluctuaciones de la velocidad turbulenta aleatorias en términos de un tiempo medio,

$$\bar{u}' = \frac{1}{T} \int_0^T u' dt \quad (\text{IV-54})$$

Por tanto, los parámetros estadísticos de interés son:

1. Raíz cuadrática media (rcm) del valor de las fluctuaciones de velocidad

$$rcm(u') = \left[\frac{1}{T} \int_0^T (u')^2 dt \right]^{1/2} \quad (\text{IV-55})$$

2. Energía cinética promedio (EC) de la turbulencia por unidad de masa

$$\frac{(EC)_{\text{promedio de turbulencia}}}{Masa} = \frac{1}{2} \left[\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2} \right] \quad (\text{IV-56})$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

3. Correlaciones entre variables que miden el grado en que dos variables son interdependientes. En el caso de las fluctuaciones de velocidad en el plano xy , el parámetro

$$\overline{u'v'} = \frac{1}{T} \int_0^T u'v' dt \quad (\text{IV-57})$$

mide la correlación que existe entre u' y v' . En un flujo cortante turbulento, $u'v'$ es finito: por lo tanto, se llega a la conclusión de que u' y v' están correlacionados.

▪ **Conservación de la masa**

Independientemente de que un flujo sea laminar o turbulento, todo flujo de fluido debe satisfacer la ecuación de conservación de la masa, o ecuación de continuidad. Substituyendo las expresiones de las velocidades instantáneas definidas en la ecuación (IV-51) dentro de la ecuación estándar de continuidad (se supone que la densidad es constante) se obtiene

$$\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial z} = 0$$

o

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (\text{IV-58})$$

La forma de la ecuación de continuidad a partir de la que se derivan las empleadas en hidráulica de canales abiertos es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{y_0}^{y^*} u dy + \frac{\partial}{\partial z} \int_{y_0}^{y^*} w dy + \frac{\partial y^*}{\partial t} = 0 \quad (\text{IV-59})$$

donde y_0 es la elevación del fondo desde un plano de referencia e y^* es la elevación de la superficie libre sobre el plano de referencia.

En el caso de un canal rectangular prismático se deduce de la ecuación (IV-59) que:

$$Q = \bar{u}A(t) = (y^* - y_0)b\bar{u}$$

donde b es el ancho del canal. Dado que el canal es prismático, el flujo puede ser considerado unidimensional, y por tanto

$$\frac{\partial}{\partial x} [(y^* - y_0)\bar{u}] + b \frac{\partial y^*}{\partial t} = 0 \quad (\text{IV-60})$$

o

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b \frac{\partial y^*}{\partial t} = 0 \quad (\text{IV-61})$$

▪ **Conservación de la cantidad de movimiento**

En un canal rectangular prismático, donde la ecuación de continuidad está dada por la ecuación (IV-60), la ecuación de conservación de cantidad de movimiento es

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial y^*}{\partial x} = g(S_x - S_f) \quad (\text{IV-62})$$

donde g es la gravedad; $S_x = \text{seno } \theta$, siendo θ el ángulo formado por el eje x con el fondo del canal; S_f es la pendiente de la línea de gradiente de energía o pendiente de fricción.

La conservación de cantidad de movimiento en un flujo turbulento está gobernada por un conjunto de ecuaciones conocidas como las ecuaciones de Reynolds que pueden derivarse a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes por la sustitución de la ecuación (IV-51). El resultado en un sistema general de coordenadas cartesianas es:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial}{\partial x} (\bar{p} + \gamma h) + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial}{\partial y} (\bar{p} + \gamma h) + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial}{\partial z} (\bar{p} + \gamma h) + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (\text{IV-63})$$

donde h es la distancia vertical, ρ es la densidad, p la presión y μ la viscosidad absoluta o dinámica.

Esta ecuaciones, junto con la ley de conservación de masa permiten gobernar todos los flujos turbulentos; pero sin una suposición para cuantificar las fluctuaciones de velocidad, no es posible una solución de este conjunto de ecuaciones.

Un método popular para cuantificar los términos de fluctuación turbulenta en la ecuación (IV-63) es la suposición de Boussinesq que define el remolino de viscosidad de tal forma que las ecuaciones anteriores se convierten en

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial}{\partial x} (\bar{p} + \gamma h) + (\mu + \eta) \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial}{\partial y} (\bar{p} + \gamma h) + (\mu + \eta) \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial}{\partial z} (\bar{p} + \gamma h) + (\mu + \eta) \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{IV-64})$$

donde η es el remolino de viscosidad. Debe notarse que la suposición de Boussinesq considera a η como si fuera una propiedad del fluido similar a μ ; ya que, η no es una

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

propiedad del fluido pero es un parámetro función del flujo y la densidad. En la práctica, en flujos turbulentos, μ es despreciado cuando es mucho más pequeño que η .

Prandtl (obtenido de French, 1988), en un esfuerzo para relacionar el transporte de la cantidad de movimiento con las características medias del flujo, introdujo una longitud característica que se denomina la *longitud de mezcla*. Prandtl sostuvo que

$$u' \sim v' \sim l \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (\text{IV-65})$$

donde l es la longitud de mezcla. Entonces

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \quad (\text{IV-66})$$

donde τ es el esfuerzo cortante. Comparando de las teorías de turbulencia de Boussinesq y Prandtl se obtiene una interrelación entre el remolino de viscosidad y la longitud de mezcla

$$\eta = \rho l^2 \frac{d\bar{u}}{dy}$$

y

$$\frac{\eta}{\rho} = l^2 \frac{d\bar{u}}{dy} = \varepsilon \quad (\text{IV-67})$$

donde η/ρ es un factor de turbulencia cinemática similar a la viscosidad cinemática. ε es una medida directa de la capacidad de transporte o mezcla de un flujo turbulento. En un flujo homogéneo, ε se refiere a todos los procesos de transporte (cantidad de movimiento, calor, salinidad y sedimentación).

▪ Distribución de velocidades

Dentro de una capa límite turbulenta, Prandtl (citado en French, 1988) demostró que el perfil de velocidad vertical es aproximadamente logarítmico. La ecuación (IV-66) establece el esfuerzo cortante en cualquier punto del flujo, donde despejando se obtiene:

$$du = \sqrt{\frac{\tau}{\rho l^2}} dy \quad (\text{IV-68})$$

Se supone generalmente que

$$l = ky \quad (\text{IV-69})$$

donde k fue inicialmente llamada la constante de turbulencia de von Karman; por lo tanto es más apropiado llamar al término k como un coeficiente cuando hay alguna evidencia de que k puede variar sobre un rango de valores como una función del número de Reynolds. Suponiendo que k es aproximadamente 0,4 (constante de Karman), al sustituir la ecuación (IV-69) en la ecuación (IV-68) se obtiene, después de integrar,

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

$$\bar{u} = 2,5 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln \frac{y}{y_0}$$

o

$$\bar{u} = 2,5u^* \ln \frac{y}{y_0} \quad (\text{IV-70})$$

donde se supone que $\tau = \tau_0$ es el esfuerzo cortante sobre el contorno del fondo, u es la velocidad turbulenta media a una distancia y sobre el fondo [Ec. (IV-51)] e y_0 es una constante de integración. La ecuación (IV-70) es conocida como la ley universal de distribución de velocidad de Prandtl-von Karman. La constante de integración y_0 es del mismo orden de magnitud que el espesor de la subcapa viscosa y es función de que el contorno sea hidráulicamente liso o rugoso. Si el contorno es hidráulicamente liso, entonces y_0 depende únicamente de la viscosidad cinemática y de la velocidad cortante

$$y_0 = \frac{mv}{u^*} \quad (\text{IV-71})$$

donde m es un coeficiente aproximadamente igual a 1/9 para superficies lisas (Chow, 1959) y, al sustituir la ecuación (IV-71) en la ecuación (IV-70) se obtiene

$$\bar{u} = 2,5u^* \ln \frac{9yu^*}{v} \quad (\text{IV-72})$$

Cuando la frontera de la superficie es hidráulicamente rugosa, y_0 depende únicamente de la rugosidad ponderada es

$$y_0 = mk_s \quad (\text{IV-73})$$

donde en este caso m es un coeficiente aproximadamente igual a 1/30 para rugosidades de granos de arena equivalentes. Sustituyendo la ecuación (IV-73) en la ecuación (IV-70) se obtiene

$$\bar{u} = 2,5u^* \ln \frac{30y}{k_s} \quad (\text{IV-74})$$

Las ecuaciones (IV-72) y (IV-74) representan adecuadamente el perfil vertical de velocidad que existe en un canal ancho llevando un flujo no estratificado.

Keulegan, 1938 (citado en French, 1988) llegó a las siguientes conclusiones para cuantificar la velocidad media del flujo en un canal:

Para canales hidráulicamente lisos

$$\bar{u} = u^* \left(3,25 + 2,5 \ln \frac{Ru^*}{v} \right) \quad (\text{IV-75})$$

Para canales hidráulicamente rugosos

$$\bar{u} = u^* \left(6,25 + 2,5 \ln \frac{R}{k_s} \right) \quad (\text{IV-76})$$

donde R es el radio hidráulico.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Estas ecuaciones de distribución de velocidades en flujo de canales abiertos son unidimensionales; por ejemplo, consideran únicamente la variación de la velocidad en la dimensión vertical. Muchos de los canales encontrados en la práctica muestran distribuciones de velocidad que son por lo general rigurosamente bidimensionales y en varios casos tridimensionales. Por ejemplo la ley de distribución de velocidad de Prandtl-von Karman predice que la velocidad máxima ocurre en la superficie libre; sin embargo las medidas en laboratorios y en el campo demuestran que la velocidad máxima por lo común ocurre bajo la superficie libre, no obstante en flujos superficiales, rápidos y anchos o en flujos que ocurren en canales muy lisos la velocidad máxima puede estar en la superficie libre. Estas observaciones demuestran que una ley de distribución de velocidad unidimensional no puede describir completamente flujos que son bidimensionales y tridimensionales. En general, la distribución de velocidad en un canal de forma arbitraria se cree que depende de la forma de la sección transversal, de la rugosidad del contorno, de la presencia de escalones y de cambios en la forma de la sección transversal. Las corrientes secundarias causadas por escalones y cambios en las formas del canal, son denominadas *corrientes secundarias fuertes*. La forma de la sección transversal y la distribución de la rugosidad del contorno ocasionan una distribución uniforme de los esfuerzos de Reynolds en el flujo y origina corrientes secundarias débiles. *Corriente o flujo secundario* se refiere a un movimiento circular del fluido alrededor de un eje que es paralelo al flujo o corriente primario, que a su vez es una traslación del fluido en la dirección longitudinal.

IV.2.9 Significado y características del flujo turbulento en el resalto

Las suposiciones realizadas al derivar la ecuación (IV-5) pueden ser una ventaja para la medida de los campos de velocidad y las presiones medias dentro del resalto así como las diversas cantidades turbulentas. Rajaratnam realizó medidas de los campos de velocidad y presión medios dentro del resalto, que se discuten en este apartado.

En la Figura IV-18 se muestra la variación de la presión p en un punto P dentro del resalto en una forma adimensional para dos números de Froude diferentes. Las medidas pertenecen a verticales diferentes a lo largo del resalto. Obviamente, $p/\rho g(h - y)$ podría ser la unidad de todas las elevaciones si la distribución de presión fuese hidrostática como se asumió (para las dos secciones finales) al derivar la ecuación (IV-5). Esto no es así excepto muy cerca de la solera del canal como se muestra claramente en la Figura IV-18. La desviación del valor hidrostático es apreciable con números de Froude altos. También, la desviación es grande con valores pequeños de x/h_2 pero la distribución tiende a ser hidrostática hacia aguas abajo al final del resalto. La presión es generalmente menor que el valor hidrostático y muestra un máximo de $y = 0,2h$ a $0,5h$ con números de Froude grandes. Con la Figura IV-18 se puede concluir que es razonable la suposición de distribución de presión hidrostática aguas abajo del final del resalto. La hipótesis es cuestionable aguas arriba del final, pero cualquier desviación de la distribución hidrostática en esta sección no es probable que cause grandes errores ya que la contribución del término de presión correspondiente a esta sección en la ecuación de momentum es relativamente pequeña.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

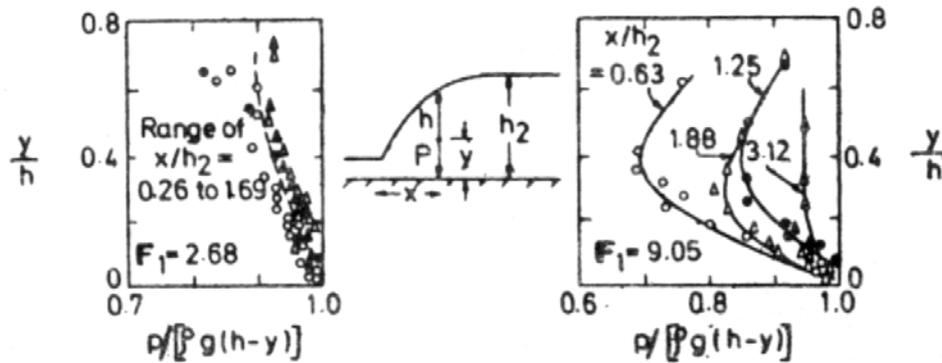


Figura IV-18. Distribución de presión sobre la vertical en el resalto.

Las medidas de las fluctuaciones de presión en la solera dentro del resalto indican que la intensidad máxima de la fluctuación ocurre alrededor de $8h_1$ a $16h_1$ desde el inicio del resalto. El valor máximo de $\sqrt{p'}$ es mayor que $0.085\rho U_1^2/2$.

Los perfiles de velocidad medios en diferentes secciones dentro del resalto se muestran para una serie en la Figura IV-19. La distribución de velocidad dentro del resalto muestra la considerable disparidad, aunque el flujo tiende a tener menor desigualdad conforme se aproxima hacia aguas abajo al final del resalto. La hipótesis de que el factor de corrección de momentum β sea igual a la unidad aguas arriba del final del resalto es acertada aún cuando el flujo esté totalmente desarrollado en esta sección (cuando la capa límite alcance todo el perfil del flujo). La Figura IV-19 indica, sin embargo, que β puede ser apreciablemente mayor a la unidad aguas abajo del final del resalto pero, asumiendo $\beta=1,0$ en esta sección no se producen grandes errores, en relación con la participación de otras cantidades en la ecuación de momentum.

Las mediciones de las fluctuaciones de velocidad turbulentas y presiones de corte fueron llevadas a cabo por Resh y Leutheusser (1978) usando un anemómetro de hilo caliente. Las medidas fueron realizadas en resaltos hidráulicos aguas abajo de una compuerta de esclusa para flujos potenciales (aquellos en los que la capa límite no alcanza toda la sección) y desarrollados en la sección de entrada. La variación de las cantidades del dimensionamiento $\sqrt{u'^2}/U_1$ y $u'v'/U_1^2$ respecto a la altura en diferentes localizaciones dentro del resalto se muestra en la figura IV-20 para $F_1 = 6,0$. En ella puede verse que las intensidades de turbulencia en el caso de flujo potencial son considerablemente menores que en los resaltos hidráulicos que presentan un flujo completamente desarrollado en todas las secciones. En ambos casos las presiones turbulentas de corte son prácticamente cero en la mayor parte de la profundidad para $x/h_2 > 5,0$. Además, las grandes ondas superficiales causan mayores intensidades de turbulencia cerca de la superficie que cerca de la solera del canal; en los casos habituales de flujo en canales las intensidades de turbulencia cerca de la solera son más altas.

Toso y Browers (1987,1988) encontraron que el flujo desarrollado se produce a una distancia mayor de cincuenta veces la apertura de la compuerta, en lugar de doscientas como consideran Leutheusser y Kartha (1972).

Lopardo, et al. (1987) comparó las características de presión turbulentas para tres condiciones de flujo diferentes, según como fue generado el resalto clásico, por compuerta de esclusa vertical, y un aliviadero con la transición circular o con una transición abrupta al canal horizontal. Estos dos últimos generaron resultados comparables, siendo la relación

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

de la amplitud de fluctuación r.m.s. de la velocidad turbulenta un 20% mayor a la obtenida para la compuerta de esclusa vertical.

Rouse et al. (1959) simularon el resalto hidráulico en un túnel aerodinámico cuyos límites estaban dispuestos según el perfil del resalto, y realizaron las primeras mediciones conocidas de las características turbulentas dentro del resalto. Usaron este artificio para superar las dificultades de realizar medidas de turbulencia precisas en flujo con gran cantidad de aire debida a la acción de un resalto hidráulico. Sus medidas con un número de Froude de 6,0 concuerdan sólo cualitativamente con las medidas de Resh y Leutheusser. Las diferencias cuantitativas son debidas a la diferencia en el número de Reynolds en los dos experimentos o debidas a una simulación incompleta del resalto en un modelo aireado.

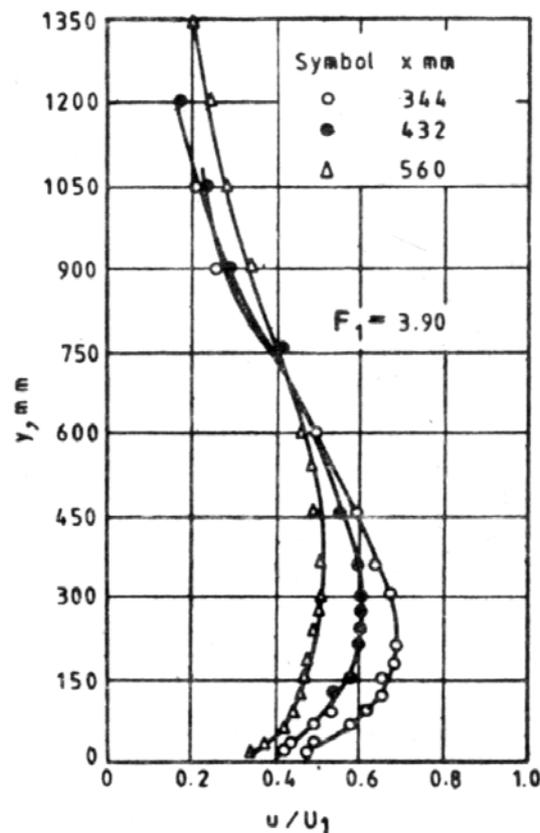


Figura IV-19 Distribución de velocidad dentro del resalto hidráulico.

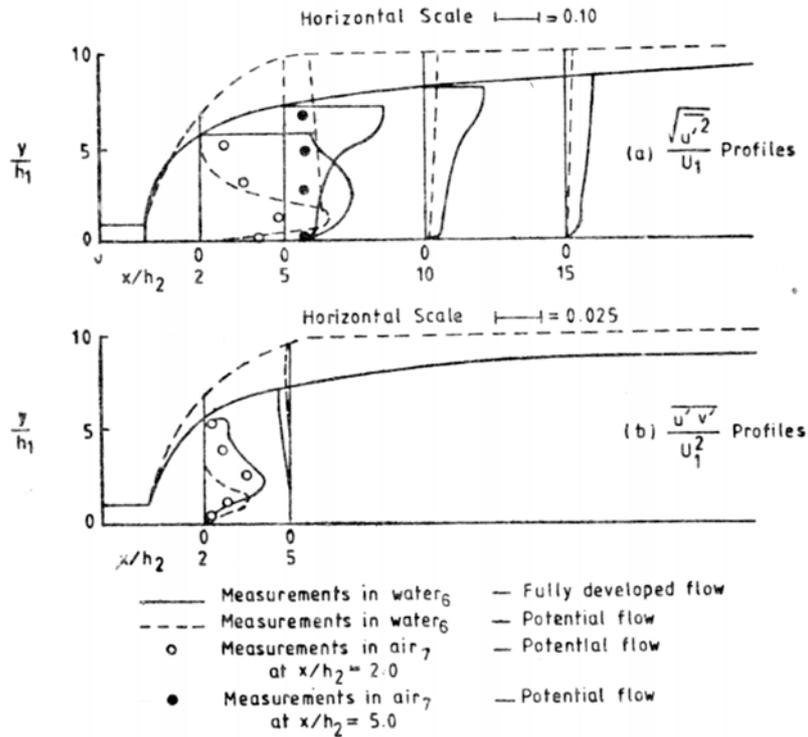


Figura IV-20. Características turbulentas en el resalto hidráulico.

En la Figura IV-21, se muestran los perfiles de velocidad dentro de distintos tipos de resaltos hidráulicos bajo una compuerta.

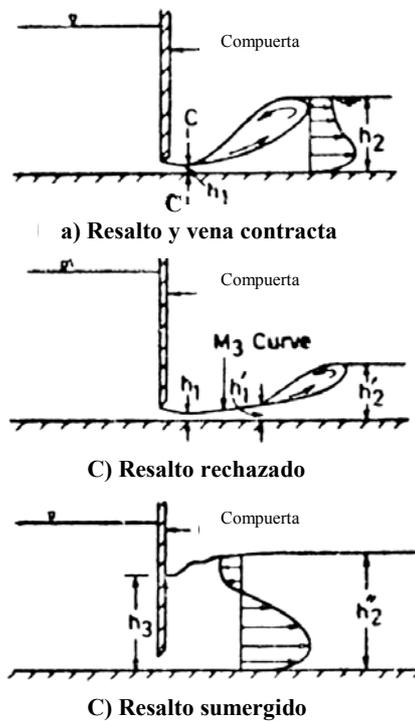


Figura IV-21. Resaltos libres y sumergidos.

En el apéndice 2 se incluye información acerca de resaltos en canales con pendiente, localización del resalto y la función de los resaltos como disipadores de energía.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

IV.3 Estructuras de control

IV.3.1 Estructuras con flujo inferior

IV.3.1.1 Compuertas de flujo inferior con nivel libre aguas arriba y descarga libre

La descarga bajo una compuerta puede ser libre o sumergida. La descarga libre se caracteriza por un chorro aireado que fluye por debajo de la compuerta sujeto a la condición de borde $p = cte$ (figura V-1a). Esta condición de borde conduce a que el coeficiente de contracción C_c dependa del número de Froude. Esta dependencia no se conoce con fiabilidad, aun cuando la variación de C_c puede ser considerable como se aprecia en la figura V-2. Para números de Froude >10 ($F \equiv V_c / \sqrt{gC_c s} > 10$), el valor de C_c ya es independiente de F , y toma valores que corresponden a los de la condición de borde $V = cte$ a lo largo del chorro (figura V-1b), condición de borde que caracteriza tanto el caso del chorro sumergido, como el caso del chorro libre para $F \rightarrow \infty$. En el caso de las compuertas de alta carga, el número de Froude es normalmente mayor de 10, de modo que no es necesario considerar el efecto de la gravedad (es decir, el efecto de F). Los datos de la figura V-2 provienen de una investigación basada en la teoría del potencial (Rouvé, Khader, 1969) y están libres de la influencia de la viscosidad. Estos valores concuerdan mejor con las relaciones en prototipos o en la naturaleza (en lo que se refiere al efecto de la viscosidad), ya que en esos casos se presentan números de Reynolds muy grandes ($Re \rightarrow \infty$).

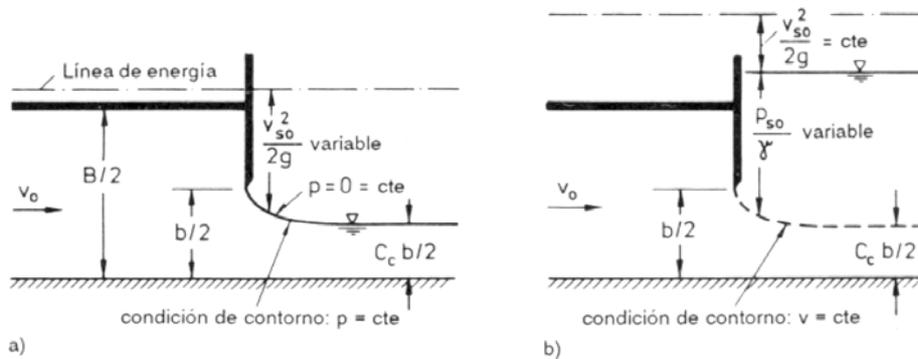


Figura V-1. Condiciones de contorno de la superficie superior de un chorro de salida de un orificio: a) para el chorro libre con números de Froude pequeños y b) para el chorro sumergido.

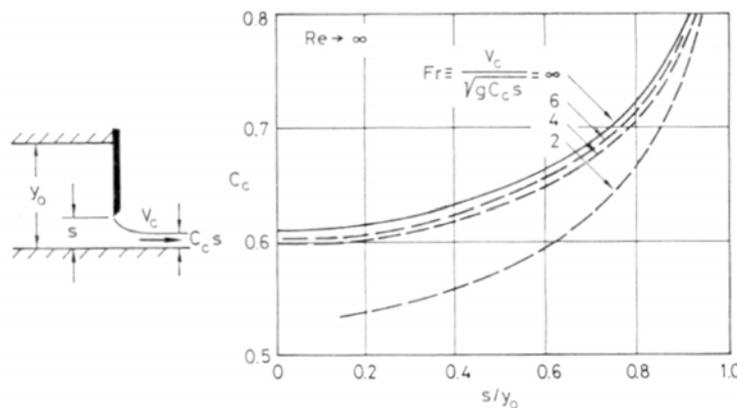


Figura V-2. Coeficiente de contracción C_c en una compuerta de borde delgado, para descarga libre sobre fondo horizontal (condiciones de flujo ideal).

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Si se compara la red de flujo para el flujo inferior bajo una compuerta (figura V-3) con la de una tobera rectangular para $F \rightarrow \infty$ (chorro con eje rectilíneo), se observa una gran coincidencia. Existen, sin embargo, tres diferencias básicas: en primer lugar, la condición de borde a lo largo del chorro en el caso de que la compuerta sea diferente a la condición de borde de la tobera; en segundo lugar, se ha reemplazado el contorno superior sólido aguas arriba de la compuerta por una superficie libre; y, en tercer lugar, se tiene ahora un fondo sólido donde antes se encontraba el plano axial del chorro. Las consecuencias de la primera diferencia en la red de flujo bajo la compuerta se comentaron anteriormente. La segunda diferencia, en cambio, significa una interrelación definida entre la apertura relativa de la compuerta s/y_0 , y el número de Froude, F . Por tanto, el número de Froude deja de ser una variable independiente, de modo que el coeficiente de contracción C_c depende claramente de s/y_0 , siempre que se suponga la condición de flujo ideal; es decir, que el efecto del fondo (figura V-4) sea insignificante.

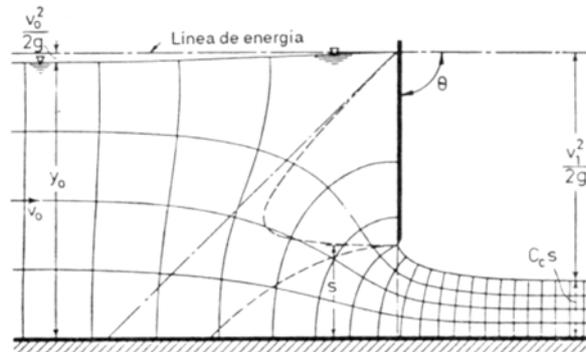
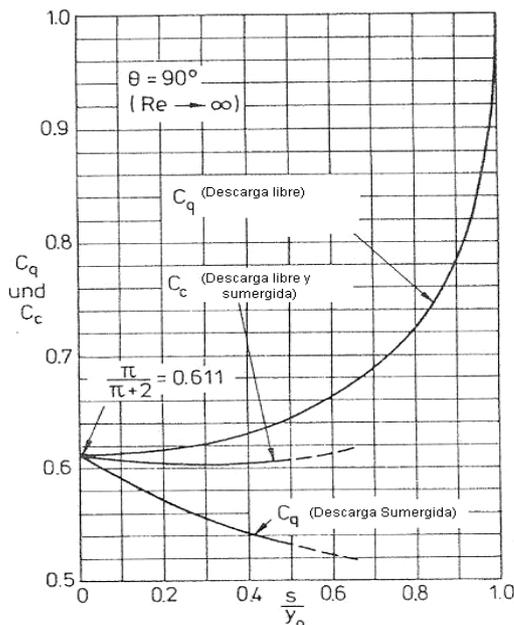


Figura V-3. Flujo libre de salida bajo una compuerta y distribución de presiones en la sección de salida. (De Engineering Hydraulics, Rouse, 1950.)

En la figura V-4 se define el coeficiente de descarga como sigue:

$$C_q = \frac{q}{s\sqrt{2gy_0}} \text{ con } q = \frac{Q}{b} \tag{V-1}$$



En este caso, se sustituye en la ecuación de definición ($C_q = q/L\sqrt{2g\Delta h}$) la profundidad Δh por y_0 y se escribe la apertura de la compuerta s en lugar de la longitud L . También se hubiera podido introducir, en lugar de Δh , la diferencia entre los niveles de agua ($y_0 - C_c s$) o la distancia entre alturas de energía ($y_0 + v_0^2/2g - C_c s$); estas otras definiciones se encuentran, en las publicaciones técnicas. Sin embargo, con la ecuación de definición se tiene una relación funcional bien definida; únicamente los valores numéricos de C_q varían de un caso a otro. Para aplicar estas magnitudes en la práctica es importante que se utilicen en forma consecuente las definiciones que corresponden a los diagramas para C_q .

Figura II-4 Coeficientes de descarga y de contracción para el flujo bajo una compuerta (condiciones ideales). (Según Rouse, Engineering Hydraulics, 1950)

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Las condiciones de flujo ideal en las que se basa la figura V-4 se asemejan mucho a la mayoría de los casos prácticos. Únicamente en las investigaciones con modelos no se puede dejar de considerar, por ejemplo, el efecto del número de Reynolds, que se manifiesta fundamentalmente a lo largo del fondo. Si no se considera esta influencia, a partir de las ecuaciones de la energía y de continuidad, se obtiene la relación siguiente:

$$C_q = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c s / y_0}} \quad (\text{V-2})$$

y de la ecuación de definición para el caso de descarga libre (condición de borde a lo largo de la superficie libre: presión atmosférica):

$$C_q = C_q\left(\frac{s}{y_0}, \theta\right) \quad y \quad C_c = C_c\left(\frac{s}{y_0}, \theta\right) \quad (\text{V-3})$$

En 1937 Pajer determinó de forma analítica por primera vez esta relación funcional para $\theta=90^\circ$. La representación de sus resultados en la figura V-4, muestra que C_c toma un valor aproximadamente constante ($C_c \approx 0,61$) para un amplio intervalo de valores de s/y_0 . Una comparación de estos valores con los obtenidos por Von Mises para un orificio rectangular resulta interesante, dado que éstos pueden ser utilizados con buena aproximación para el caso del flujo sumergido (excepto para pequeñas profundidades de sumersión, en las cuales la superficie libre del agua sobre la vena contracta es ondulada).

Como se muestra en la figura V-4, para $s/y_0 = 0$, C_q toma el mismo valor que $C_c = 0,611$, y decrece conforme aumenta el cociente s/y_0 . El valor extremo $s/y_0 = 1$ corresponde al flujo con la compuerta totalmente abierta (apertura total). En este caso el flujo bajo la compuerta se transforma en un flujo con profundidad crítica $y_0 = y_c = 2(V_0^2/2g)$ debido a que no está sumergido. El coeficiente de descarga correspondiente resulta, para este caso, de 1. En la zona de mayores valores de s/y_0 , cercanos al valor crítico, el flujo bajo la compuerta se vuelve muy inestable. Estos valores de operación de la compuerta tiene, por esta razón, muy poca importancia práctica.

Según las hipótesis, los resultados de la figura V-4 son válidos únicamente para el flujo plano bidimensional; es decir, para anchos del canal muy amplios $b \gg s$. Si el ancho del canal es estrecho, perturban las condiciones del flujo el déficit de velocidad cerca de la superficie libre aguas arriba de la compuerta, el vórtice superficial en la esquina originado por esta causa (figura V-5), así como el efecto de las cadenas de vórtices de eje vertical que se forman en las esquinas de las paredes laterales con la compuerta, lo que, también afecta el coeficiente de descarga. (Naudascher, 1984) Otras perturbaciones pueden originarse también en las guías de las compuertas.

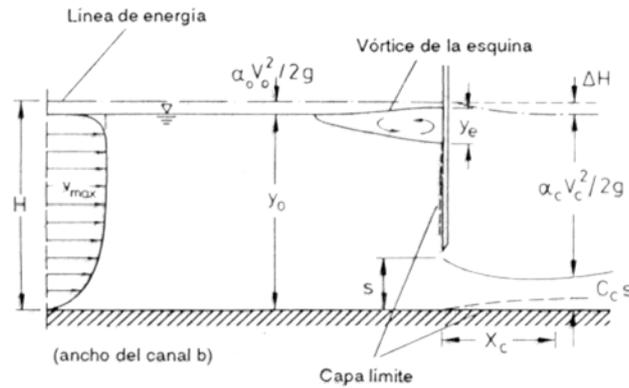
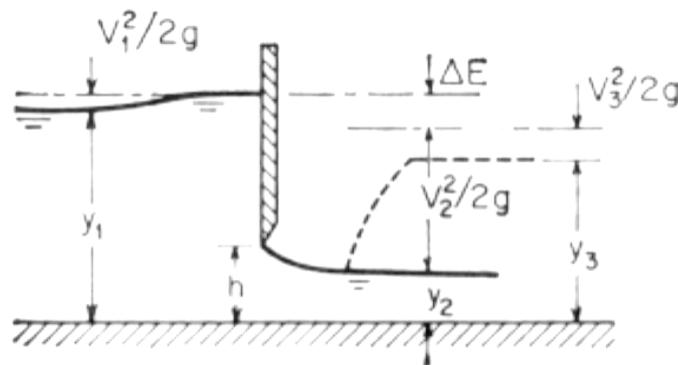


Figura V-5. Flujo bajo una compuerta con descarga libre.

Mediante la ecuación de energía puede demostrarse que el caudal a través de una compuerta de flujo inferior puede expresarse como

$$Q = CLh \sqrt{2g \left(y_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} \right)} \quad (V-4)$$

donde C es el coeficiente de descarga, L es la longitud de la compuerta, h es la altura de la abertura de la compuerta, y_1 es la profundidad de flujo aguas arriba y $\alpha V_1^2 / 2g$ es la altura de velocidad del flujo de aproximación, según la figura V-6. El flujo a la salida de la compuerta puede ser libre o sumergido, según la profundidad de salida. Para flujo sumergido, y_1 en la ecuación anterior debe remplazarse por la altura efectiva o diferencia entre las profundidades de aguas arriba y de aguas abajo.



Compuerta deslizante

Figura V-6. Compuerta con flujo inferior

Para casos prácticos, el término de altura de velocidad en la ecuación (V-4) puede omitirse y su efecto puede incluirse en el coeficiente C , quedando por tanto:

$$Q = CLh \sqrt{2gy_1} \quad (V-5)$$

donde C es un coeficiente que depende de la geometría de la estructura y de las profundidades aguas arriba y aguas abajo. La forma de esta ecuación es igual para flujos libre y sumergido.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Para la compuerta deslizante vertical, en la figura V-7 se muestran curvas que representan el valor de C , que Henry determinó experimentalmente. La línea punteada A representa el resultado obtenido mediante la ecuación (V-4) con base en el principio de energía; la línea punteada B se obtiene por el principio de momentum. El valor de F_0 es el número de Froude de flujo a través de la abertura de la compuerta.

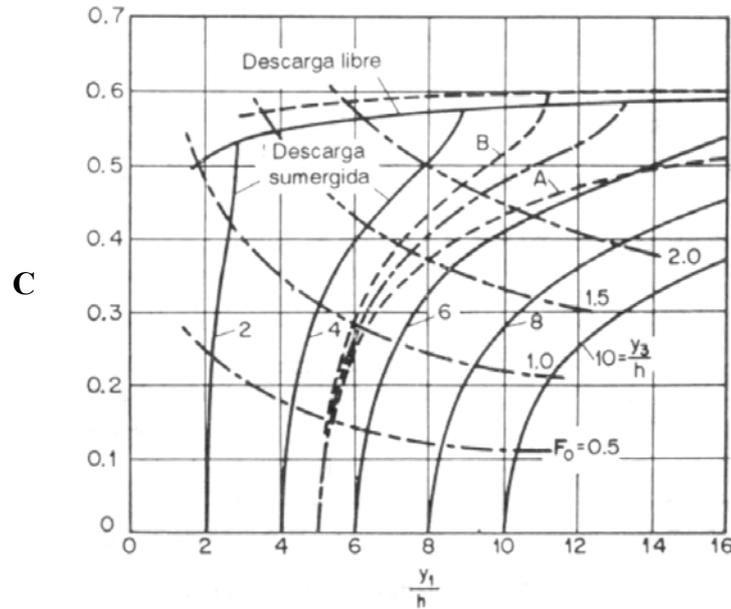


Figura C-7. Coeficientes de descarga para compuertas deslizantes verticales (según H. R. Henry).

IV.3.1.2 Compuertas de flujo inferior con nivel libre aguas arriba y descarga sumergida

El calculo del flujo sumergido bajo una compuerta se realiza con la ayuda de las ecuaciones de continuidad, de energía y del impulso bajo las hipótesis simplificativas $\alpha = \beta = 1$. Según la figura V-8 se pueden escribir las siguientes ecuaciones para las secciones transversales 1, 2 y 3, si es que se supone que en la sección 2 se tiene también una distribución aproximadamente hidrostática de presiones. (Esta hipótesis se justifica debido a que las líneas de corriente son paralelas en el chorro ya contraído y a que la velocidad es pequeña en el remolino superior sumergido).

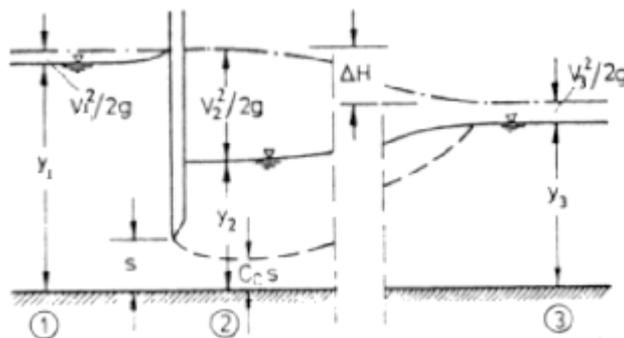


Figura V-8 Flujo sumergido bajo una compuerta

$$q = C_c s V_2 = y_1 V_1 = y_3 V_3; \quad \text{siendo} \quad V_2 = \sqrt{2g(y_0 - y_2 + V_0^2/2g)} \quad (\text{ec. de continuidad})$$

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{ó} \quad y_0 + \frac{q^2}{2gy_0^2} = y_2 + \frac{q^2}{2g(C_c s)^2} \quad (\text{ecuación de energía})$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

$$\gamma \frac{y_2^2}{2} + \rho q V_2 = \gamma \frac{y_3^2}{2} + \rho q V_3 \quad (\text{ecuación del impulso})$$

donde $q = Q/B$, es el caudal por unidad de ancho y C_c , el coeficiente de contracción (figura V-4). Si se define ahora el coeficiente de descarga C_q como:

$$q = Q/B = C_q s \sqrt{2gy_1} \quad (\text{V-6})$$

puede ser obtenido a partir de las ecuaciones anteriores, como función de los parámetros y_1/s y y_3/s de forma general (independientemente de las dimensiones geométricas y de las velocidades reales absolutas):

$$C_q = C_q(y_1/s, y_3/s) \quad (\text{V-7})$$

y representarse esta función en un diagrama como el de la figura V-9. Para una relación de sumersión de $y_3/s = 5$ se dibujan los resultados del cálculo con líneas de segmentos en la figura V-9. De la comparación entre esta línea de segmentos y la línea de trazos y puntos correspondiente a los resultados experimentales según Henry (Rouse, 1950) se obtiene que los valores calculados difieren muy poco de los valores obtenidos en experimentos, y que, específicamente, su variación es tanto mayor cuanto más se acercan a las condiciones de descarga libre. La razón para esta discrepancia se encuentra en que conforme disminuye el efecto del embalse desde aguas abajo, la diferencia entre la distribución real de presiones y la distribución hidrostática supuestas en la sección transversal 2 es mayor, añadiéndose también la influencia del ingreso de aire en el remolino superior.

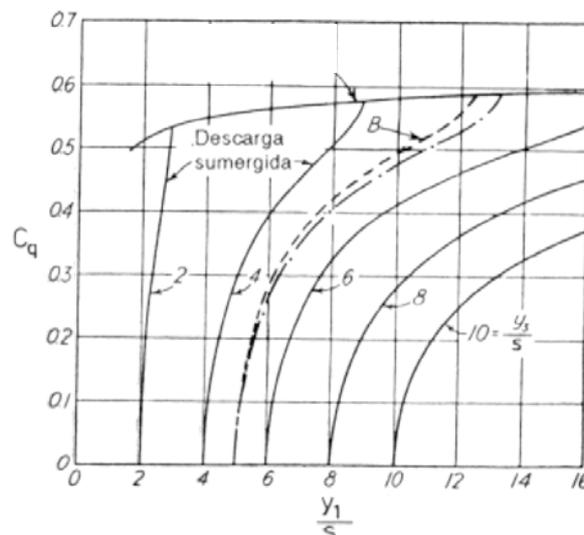


Figura V-9. Coeficiente de descarga C_q para descarga libre y sumergida bajo una compuerta plana, según los experimentos de Henry.

Para la descarga libre, es decir, para $y_2 = C_c s$, el valor de C_q puede ser escrito en forma explícita:

$$C_q = C_c \sqrt{I / (I + C_c s / y_1)} \quad (\text{V-8})$$

Esta relación también está graficada en la figura V-9.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Por tanto, si es que no se consideran, lo que en este caso es totalmente justificable, la influencia de la viscosidad entre las secciones transversales 1 y 2, y las diferencias con la distribución hidrostática de presiones en la última sección transversal (figura V-8), se obtiene una relación para determinar la profundidad y_2 , a partir de la ecuación del impulso:

$$\gamma \frac{y_2^2}{2} + \rho \frac{q^2}{C_c s} = \gamma \frac{y_3^2}{2} + \rho \frac{q^2}{y_3}$$

y el valor C_c puede obtenerse de la figura V-4, con tanto mayor precisión, cuanto más pequeña sea la diferencia entre las superficies libres de agua ($y_1 - y_2$), y, con ello, la ondulación de las mismas.

El cálculo del caudal puede ser efectuado por medio de un proceso iterativo. También se puede realizar mediante el uso del coeficiente de descarga C_q , que depende, además, de la magnitud y_3/s por efecto de la sumersión.

En la figura V-9 se observa esta dependencia del coeficiente de descarga, C_q , a diferentes relaciones geométricas de la estructura de cierre en el caso de compuertas planas. Se puede realizar determinación directa del caudal si la forma de la estructura de cierre está representada en los diagramas. La ventaja de este método radica no sólo en la simplificación del cálculo, sino también en el incremento de la precisión. Esta última ventaja se fundamenta en el hecho de que las curvas para C_q determinadas experimentalmente toman en cuenta los efectos de la distribución no hidrostática de presiones y la presencia de ondulaciones en la superficie libre de la sección transversal 2. Las discrepancias entre los resultados experimentales de Henry (1950) y los resultados del cálculo con las ecuaciones arriba mencionadas no son notables, como se indica en la figura V-9. A partir de las mediciones de Rao y Rajaratnam (1963), se puede lograr una comprobación más del cálculo con las ecuaciones de energía y de continuidad.

Con esto se demuestra, que las ecuaciones fundamentales presentadas en los párrafos anteriores pueden ser utilizadas como una buena aproximación en el cálculo del flujo que varía bruscamente en canales. Por otro lado, se señala que los criterios de diseño hidráulico, como por ejemplo, información sobre coeficientes de descarga, pueden presentarse en forma muy simple y clara siempre que el problema de interés se exprese en función de los principales parámetros adimensionales.

IV.3.2 Estructuras con flujo superior.

IV.3.2.1 Forma del perfil de vertederos de rebose o aliviaderos.

En el diseño del perfil de los vertederos de desborde, de excedencias o aliviaderos, es común que el perfil de la estructura se ajuste al contorno inferior del chorro con descarga libre que se presentaría, para la misma carga, en un vertedero de cresta delgada. Esto se debe a que se desean evitar inestabilidades del flujo, y, sobre todo, para evitar presiones negativas a lo largo del perfil de los vertederos con el consecuente riesgo de cavitación. Se ha demostrado de manera experimental que cuando la forma del perfil de un aliviadero se ajusta a los datos de la carga de diseño H_d sobre el vertedero, se generan presiones iguales a la presión atmosférica a lo largo del contorno (figura V-10). El hecho de que se forme una capa límite a lo largo del perfil, al contrario de lo que sucede en la superficie libre del

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

chorro sobre el vertedor de pared delgada equivalente, no tiene influencia apreciable sobre las condiciones del flujo.

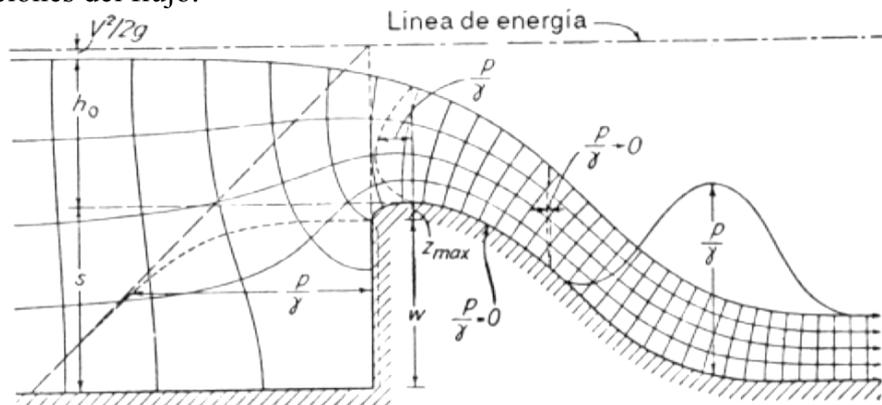


Figura V-10. Caudal y distribución de presiones del flujo sobre un vertedero de desborde (condiciones ideales de flujo). (Según Rouse *Engineering Hydraulics*, 1950.)

Desde 1932 hasta 1948 el U. S. Bureau of Reclamation realizó experimentos extensos sobre la forma de la napa en vertederos de cresta delgada. Con base en los datos experimentales, incluidos los de Bazin, el Bureau desarrolló coordenadas para la superficie de la napa en vertederos verticales y con caras de diferentes pendientes. Esta información es valiosa para el análisis acertado y el diseño preciso de secciones de aliviaderos. Sin embargo, para casos prácticos, esta información puede utilizarse de manera más simple sin grandes pérdidas de exactitud, mediante las modificaciones que se describen a continuación:

Con base en los datos del Bureau of Reclamation, el U. S. Army Corps of Engineers desarrolló algunas formas estándar en su Waterways Experimental Station. Estas formas (figura V-11), designadas como las formas de vertederos estándar WES-5 pueden representarse mediante la siguiente ecuación:

$$X^n = K H_d^{n-1} Y \tag{V-9}$$

donde X e Y son las coordenadas del perfil de la cresta con su origen en el punto más alto de ésta, H_d es la altura de diseño excluida la altura de velocidad del flujo de aproximación, y K y n son parámetros que dependen de la pendiente de la cara de aguas arriba.

Los valores de K y n para una pendiente horizontal de la cara de aguas arriba son $K = 2,000$ y $n = 1,850$.

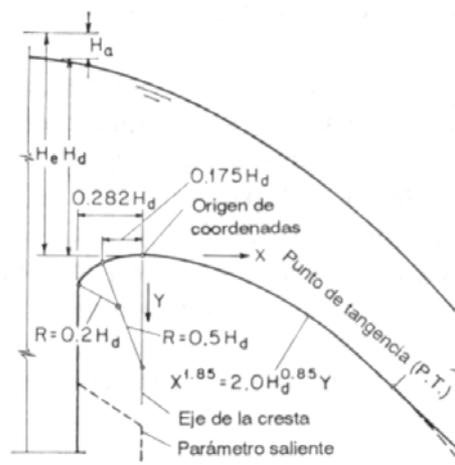


Figura V-11. Forma estándar de vertederos WES (U. S. Army Engineer Waterways Experimental Station).

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

IV.3.2.2 Capacidad de descarga en los aliviaderos.

El caudal a través de un aliviadero puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$Q = C L H^{1.5}$$

donde C es el coeficiente de descarga, L es la longitud de efectiva de la cresta del vertedero y H es la altura medida por encima de la cresta excluida la altura de velocidad.

Para los vertederos diseñados con las formas WES, esta ecuación es:

$$Q = C_d L H_e^{1.5} \tag{V-10}$$

donde H_e es la altura de energía total en pies sobre la cresta, incluida la altura de velocidad en el canal de aproximación. Pruebas en modelos sobre los vertederos han demostrado que el efecto en la velocidad de aproximación es insignificante cuando la altura w del aliviadero es mayor que $1,33H_d$, donde H_d es la altura de diseño excluida la altura de velocidad de aproximación. En estas condiciones y con la altura de diseño (es decir, w/H_d mayor que 1,33 y $H_e = H_d$, para lo cual la altura de velocidad de aproximación es insignificante) el coeficiente de descarga $C_d = 4.03$.

En aliviaderos bajos con $w/H_d < 1,33$, la velocidad de aproximación tendrá un efecto apreciable sobre el caudal o el coeficiente de descarga y, en consecuencia, sobre el perfil de la napa. Puede utilizarse una gráfica adimensional (figura V-12) basada en los datos de la Waterways Experimental Station para mostrar el efecto de la velocidad de aproximación sobre la relación entre H_e/H_d y C/C_d para vertederos diseñados con las formas WES con su cara de aguas arriba vertical. Para vertederos con la cara de aguas arriba inclinada, el valor de C puede corregirse para tener en cuenta el efecto de la pendiente de aguas arriba, multiplicando C por un factor de corrección obtenido del cuadro adjunto en la figura V-12. Esta corrección se desarrolló a partir de los datos del Bureau of Reclamation.

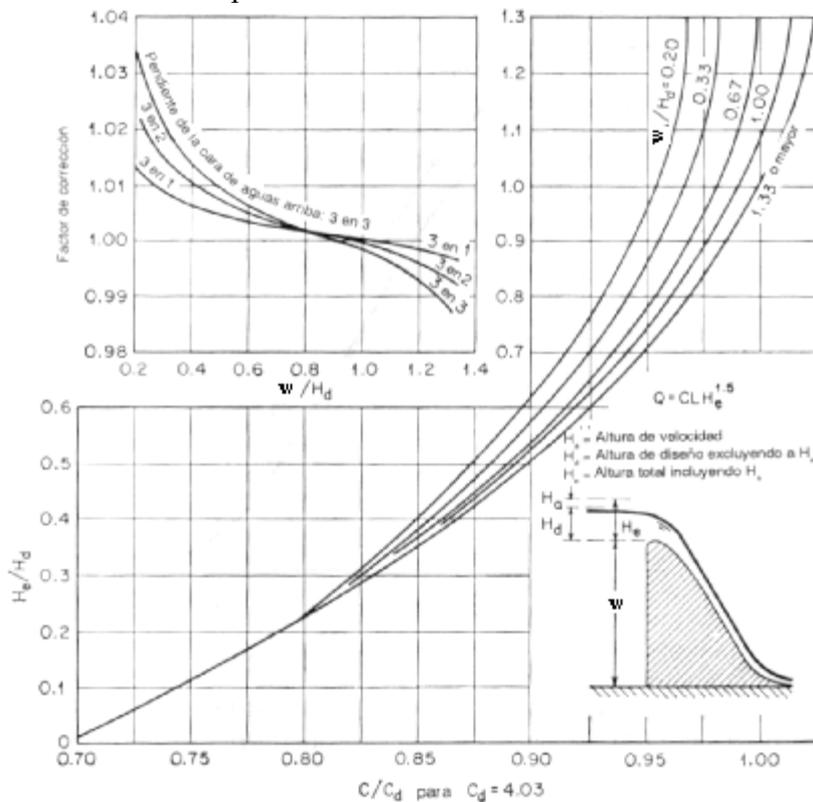


Figura V-12. Relación altura-caudal para las formas estándar de vertederos WES.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

IV.3.2.3 Curva de capacidad de descarga en aliviaderos.

El perfil de un aliviadero puede diseñarse sólo para una altura. Esta altura es la altura de diseño, que generalmente produce una napa de flujo inferior muy similar al perfil del vertedero. Sin embargo, el aliviadero también debe operar con otras alturas, menores o mayores que la altura de diseño. Para alturas menores la presión en la cresta será superior a la atmosférica pero seguirá siendo inferior a la hidrostática. Para alturas mayores la presión será menor que la atmosférica y puede ser tan baja que ocurra separación del flujo. Mediante modelos experimentales se ha demostrado que la altura de diseño con seguridad puede ser excedida hasta un 50%; por encima de esto, pueden desarrollarse fenómenos de cavitación peligrosa.

Para vertederos diseñados con las formas WES, las curvas dadas en la figura II-12 pueden utilizarse para determinar el coeficiente de descarga para alturas diferentes a la altura de diseño. De esta manera puede calcularse una curva de calibración del aliviadero.

IV.3.2.4 Flujo a la salida de los aliviaderos.

La velocidad de flujo teórica a la salida de un aliviadero (figura II-13) puede calcularse mediante

$$V_i = \sqrt{2g(Z + H_a - y_i)} \quad (\text{V-11})$$

donde Z es la caída o la distancia vertical en pies desde el nivel del embalse aguas arriba hasta el nivel del piso en la salida; H_a es la altura de aproximación aguas arriba; e y_i es la profundidad de flujo a la salida. Debido a la pérdida de energía involucrada en el flujo sobre el vertedero, la velocidad real es siempre menor que el valor teórico. La magnitud de la velocidad real depende sobre todo de la altura sobre la cresta del vertedero, la caída, la pendiente y la rugosidad de la superficie del vertedero. Mediante razonamiento y experimentos se demuestra que la desviación de la velocidad real con respecto a su valor teórico se vuelve mayor cuando la carga (H) es menor y la caída (w) es mayor.

Considerando la experiencia, en análisis teóricos y en una cantidad limitada de información experimental obtenida en pruebas sobre prototipos de las presas Shasta y Grand Coulee, el U. S Bureau of Reclamation estudió la relación entre la velocidad real y su valor teórico (velocidad teórica definida por el Bureau es $V_i = \sqrt{2g(Z - 0,5H)}$). A partir de los resultados de este estudio se realizó la figura V-13 para mostrar la velocidad real a la salida de aliviaderos en diferentes alturas, caídas, pendientes de 1 en 0,6 hasta 1 en 0,8, y condiciones de la rugosidad superficial promedio. Se considera que esta información es suficientemente acertada para propósitos de diseño preliminar.

Experimentos hechos por Bauer indican que las pérdidas por fricción durante la aceleración del flujo hacia aguas abajo sobre la cara del aliviadero pueden ser considerablemente menores que las pérdidas por fricción normales en un flujo con una turbulencia bien desarrollada. Por tanto, la pérdida por fricción no es significativa en pendientes empinadas, pero se vuelve muy importante si la pendiente es muy pequeña. Por esta razón, la información mostrada en la figura V-13 no es aplicable a pendientes menores que 1 en 0.6.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Al final de la superficie inclinada del aliviadero, el flujo cambia su dirección de manera abrupta y por tanto produce presiones centrífugas significativas. Para crear una transición de flujo suave y prevenir el impacto del agua que cae para que no socave la cimentación, la superficie de la salida del aliviadero se diseña como una solera curva. Para ser realmente efectiva la cubeta debe ser tangente a la cimentación o muy cercana a esto. El radio R de la solera, medido en pies, puede estimarse aproximadamente mediante la siguiente ecuación empírica:

$$R = 10^{(V + 6,4H + 16)/(3,6H + 64)} \tag{V-12}$$

donde V es la velocidad en pies/s del flujo a la salida y H es la altura en pies, excluida la altura de velocidad de aproximación sobre la cresta del vertedero. La presión de diseño en la cubeta y la máxima presión en los muros laterales deben ser iguales a la presión centrífuga y a la presión hidrostática correspondiente a la profundidad de aguas abajo.

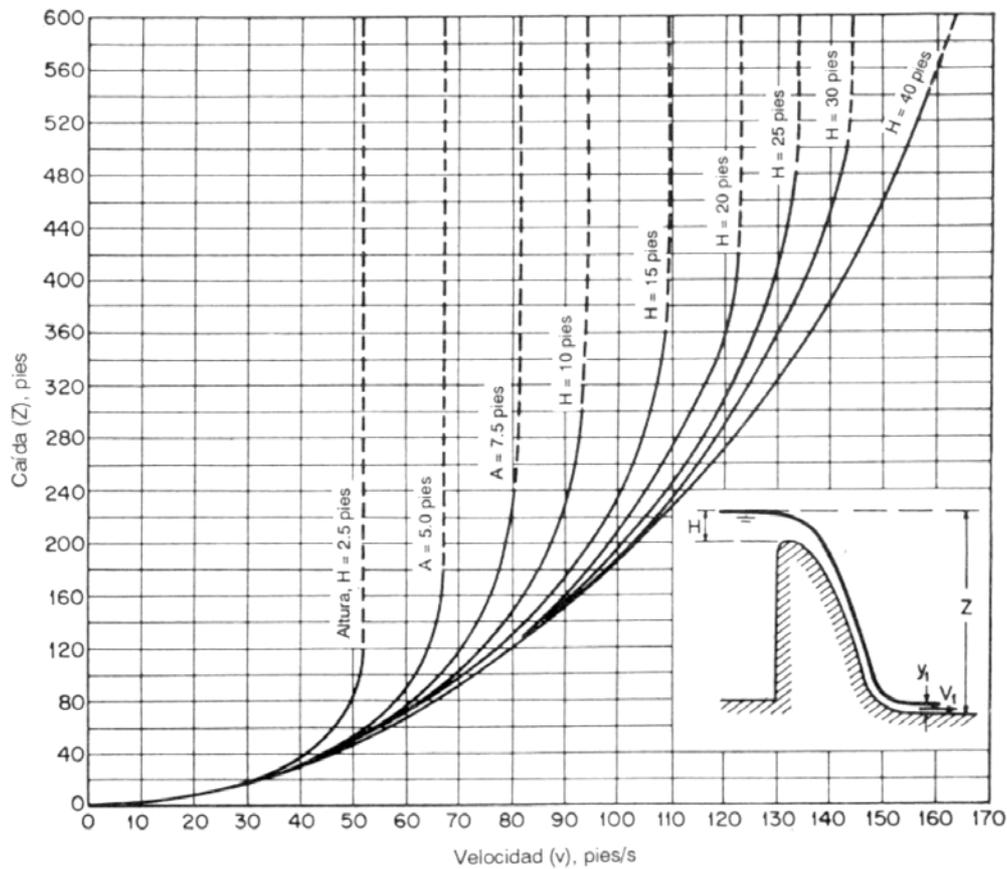


Figura II-13. Curvas para determinación de la velocidad a la salida de vertederos con pendientes de 1: 0,6 hasta 1:0,8.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

IV.3.2.5 Aliviaderos sumergidos.

Los vertederos de cresta delgada están sumergidos cuando la profundidad de aguas abajo es mayor que la altura de la cresta. Debido a que el flujo sumergido a menudo es inestable, y tiene perturbaciones superficiales considerables inmediatamente aguas abajo, estos vertederos o vertederos de cresta delgada no son satisfactorios para mediciones precisas de flujo. Los estudios sobre vertederos de cresta redondeada sumergidos son útiles, sin embargo, debido a que dan información necesaria para el diseño de aliviaderos de baja altura, las cuales ocasionalmente pueden estar sujetas a sumergencia.

El U. S. Bureau of Reclamation ha realizado extensos estudios sobre aliviaderos sumergidos. En estos estudios los flujos se clasifican en cuatro tipos distintos de acuerdo con la condición de flujo en la cara de aguas abajo:

1. Flujo supercrítico.
2. Flujo subcrítico que involucra un resalto hidráulico.
3. Flujo acompañado por un resalto ahogado con un chorro que se sumerge.
4. Flujo que se aproxima a una sumergencia completa.

La sumergencia del aliviadero reducirá el coeficiente de descarga correspondiente a un flujo no sumergido. Los resultados de la prueba del Bureau of Reclamation, sobre esta reducción, expresadas en porcentaje del coeficiente de descarga para el flujo no sumergido (figura V-14), se han presentado en una tabla para los cuatro tipos de flujo antes mencionados. Esta tabla, ligeramente modificada (figura V-14), fue verificada además con el uso de otros datos por el U. S. Army Engineers Waterways Experimental Station. La figura también es aplicable para la determinación de los coeficientes correspondientes a las formas WES en condiciones sumergidas.

En la figura V-14 h_d es la caída desde el nivel del embalse aguas arriba hasta la elevación de la superficie del agua hacia aguas abajo, H_e es la altura total por encima de la cresta y d es la profundidad aguas abajo. El patrón general de las curvas muestra que, para relaciones bajas de $(h_d + d)/H_e$, el flujo es de tipo 1 o supercrítico, y que la reducción en el coeficiente se afecta esencialmente por esta relación y es independiente de h_d/H_e . La sección transversal BB en la parte superior derecha de la tabla muestra la relación de $(h_d + d)/H_e$ en $h_d/h_e = 0,78$. Para valores grandes de $(h_d + d)/H_e$, por otro lado, la reducción en el coeficiente fundamentalmente se afecta por la relación h_d/H_e . En estas condiciones, para valores de h_d/h_e menores de 0,10, el flujo es de tipo 4, el chorro se localiza en la superficie y no ocurre resalto. Para valores de h_d/H_e , superiores a 0,10, el flujo es de tipo 3 o acompañado por un resalto ahogado con un chorro que se sumerge. La sección transversal AA muestra las relaciones de h_d/H_e en $(h_d + d)/H_e$ cercano a 5,0. El flujo subcrítico o flujo tipo 2 ocurre en la región indicada en el cuadro. También se muestran otras regiones para condiciones de flujo transicional.

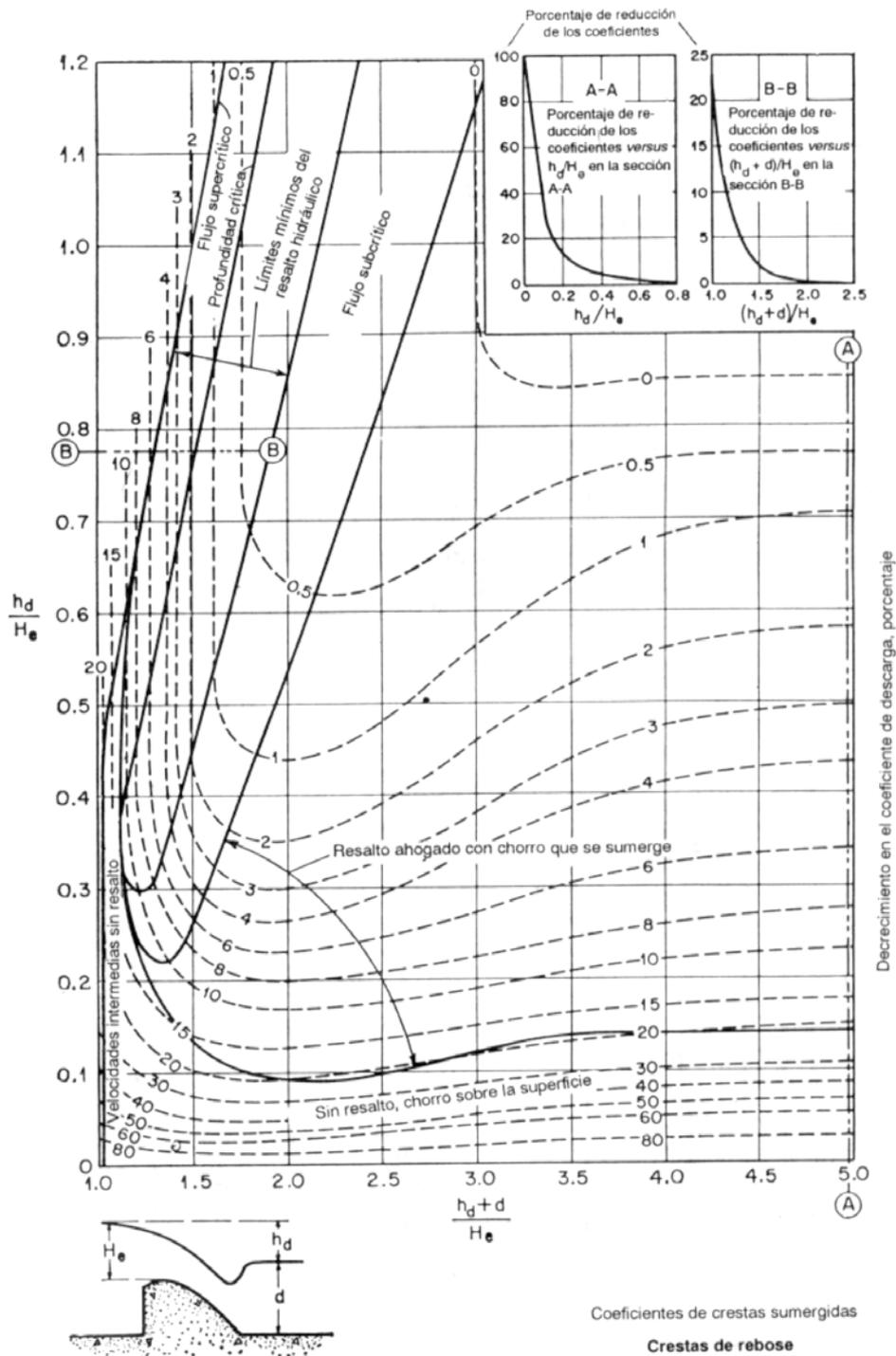


Figura V-14. Disminución del coeficiente de descarga para aliviaderos sumergidos (U. S. Engineers Waterways Experimental Station).

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

IV.4 Metodología ADV

IV.4.1 Introducción

El Velocímetro Acústico Doppler de SonTek/YSI (ADV) es un método de medición Doppler en 3D de un único punto, con alta resolución. Las técnicas usadas por el ADV para el proceso de Doppler proporcionan varias ventajas: exactitud, rapidez, medida de velocidad de 3D en un volumen de muestra distante; calibración de fábrica invariable, por lo que no se requiere ninguna calibración periódica; operación simple; cálculo directo de parámetros turbulentos tales como tensión de Reynolds; y rendimiento excelente en flujos lentos.

De una forma general, los principios y especificaciones de funcionamiento básicas del ADV de SonTek son los siguientes:

IV.4.2 Método habitual biestático y transformación Doppler

El ADV mide la velocidad de agua usando un principio físico llamado efecto de Doppler-Fizeau. Si una fuente de sonido está en movimiento relativo respecto al receptor, la frecuencia del sonido al receptor es transformada de la frecuencia de transmisión por una cantidad:

$$F_{doppler} = - F_{fuente} (V/C)$$

donde

$F_{doppler}$ = cambio en la frecuencia recibida (transformación Doppler)

F_{fuente} = frecuencia de transmisión del sonido

V = velocidad de la fuente relativa al receptor

C = velocidad del sonido

La velocidad V representa la velocidad relativa entre fuente y receptor (por ejemplo, el movimiento que cambia la distancia entre los dos). El movimiento perpendicular a la línea que conecta la fuente y el receptor no introduce un cambio de Doppler. Si la distancia entre los dos objetos está disminuyendo, la frecuencia crece; si la distancia está aumentando, la frecuencia disminuye.

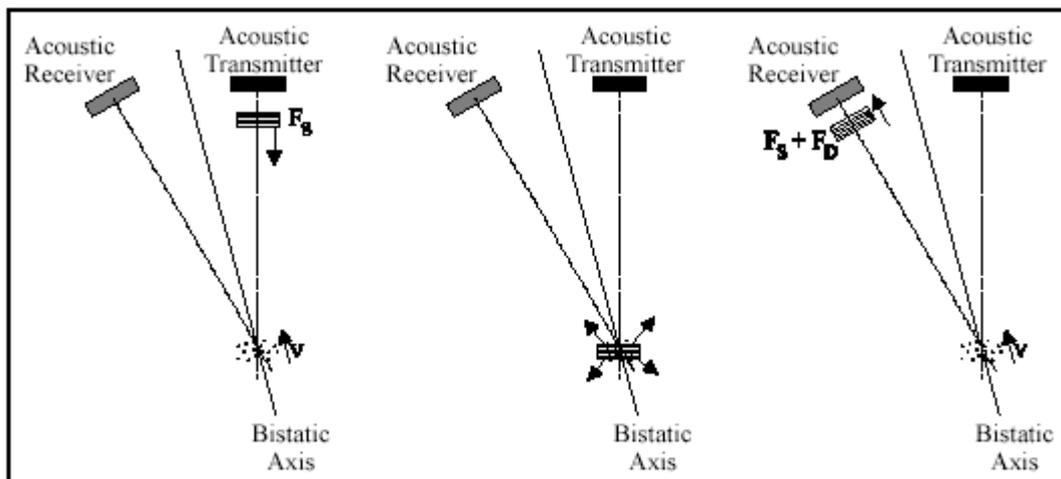


Figura VI-1– Operación básica de un método habitual biestático Doppler

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la Figura VI-1 se muestra la operación de un método habitual biestático Doppler, como es el ADV. El término biestático se refiere al hecho que el ADV usa transductores acústicos distintos para transmitir y para recibir. Tanto los transmisores como los receptores son construidos para generar muestreadores de dimensiones muy reducidas. El transmisor genera sonido con la mayoría de la energía concentrada en un cono estrecho, mientras que el receptor es muy sensible al sonido recibido desde un rango angular muy estrecho. Los transductores están montados de tal forma que la orientación de sus brazos intersecta en un volumen de agua localizado a una cierta distancia.

Esta intersección de los brazos determina la ubicación del volumen de muestra (el volumen de agua en el que se toman las medidas).

El transmisor genera un pulso breve de sonido a una frecuencia conocida, que se propaga por el agua a lo largo del eje de su brazo. Como el pulso pasa por el volumen de muestra, la energía acústica es reflejada en todas las direcciones por las partículas de materia (sedimentos, organismos pequeños, burbujas, etc.). Cierta fracción de la energía reflejada viaja a lo largo del eje del receptor, donde es recogida por el ADV y el proceso electrónico mide el cambio en frecuencia. La variación Doppler medida por un receptor es proporcional a la velocidad de las partículas a lo largo del eje biestático del receptor y transmisor. El eje biestático está localizado en la bisectriz entre los ejes correspondientes a los brazos del receptor y transmisor.

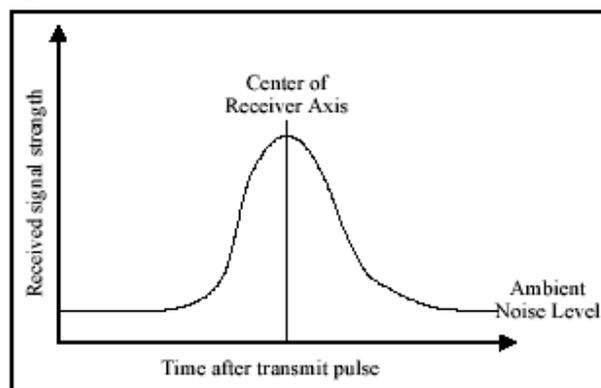


Figura VI-2– Perfil de intensidad de señal de ADV

La Figura VI-2 muestra un perfil típico de intensidad de señal frente al tiempo para un receptor de ADV. El eje horizontal muestra el tiempo después del pulso de transmisión, mientras que el eje vertical muestra la intensidad de señal devuelta medida por el receptor. Como el pulso de transmisión viaja por el agua, cierta fracción de la energía es reflejada en todas las direcciones. Inmediatamente después del pulso de transmisión, las reflexiones que golpean el transductor receptor vienen de un ángulo fuera de su rango de sensibilidad; así el receptor mide sólo el nivel de ruido ambiente. Como el pulso se mueven hacia el volumen de muestra, la señal devuelta empieza a venir de una dirección cerca del pico de sensibilidad del receptor; así, el receptor nota un aumento en la intensidad de señal. La intensidad de señal alcanza un máximo cuando el pulso cruza el centro del brazo receptor; después, las reflexiones se mueven hacia fuera del brazo receptor y la intensidad de señal decae. El pico de la curva en forma de campana ocurre cuando las reflexiones provienen de la intersección de los brazos del receptor y transmisor. Muestreando la señal devuelta en este momento, el ADV realiza las medidas en el volumen de muestra definido por la intersección de los brazos transmisores y receptores.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

IV.4.3 Geometría de los brazos y medida de velocidad 3D

Un par de medidas sencillas del transmisor/ receptor proyecta la velocidad del agua en su eje biestático. El ADV usa un transmisor y dos o tres receptores acústicos (para sondas de 2D o 3D). Los receptores están alineados para intersectarse con el brazo transmisor en un mismo volumen de muestra. El ADV combina las medidas de velocidad de cada receptor, conociendo la orientación relativa de los tres ejes biestáticos, para calcular la velocidad del agua 3D en el volumen de muestreo.

La Figura VI-3 muestra la geometría de un ADV 2D. Los ejes de cada receptor están inclinados 30° respecto al transmisor. El eje biestático para cada receptor está entre los ejes del transmisor y receptor (inclinado 15° respecto al eje del transmisor). Los receptores están enfocados hacia un volumen localizado a 5,10 , o 18 cm debajo del transmisor (la distancia varía en dependencia de la configuración de sonda). Para sondas 3D, cada receptor está inclinado 30° respecto al transmisor y los receptores pueden girarse 120° respecto al ángulo acimut.

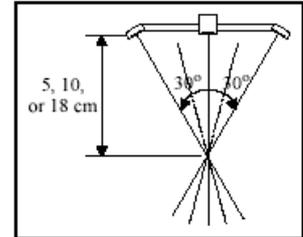


Figura VI-3– Geometría de sonda de ADV

Para analizar los datos de velocidad de ADV, se debe comprender el efecto de la geometría de la sonda. Se define la dirección vertical como el eje del transmisor, y la dirección horizontal como perpendicular a este eje. El ADV mide las velocidades biestáticas, a lo largo de los ejes inclinados 15° respecto al eje verticales, y las convierte a velocidades cartesianas usando la geometría de la sonda. Las velocidades biestáticas son más sensibles al movimiento vertical que al movimiento horizontal en un factor de cuatro aproximadamente ($\tan(15^\circ) = 0,27$). Así, el ruido en las medidas horizontales es 4 veces mayor que en medidas verticales, y la velocidad horizontal máxima que puede ser medida por el ADV es 4 veces mayor que la velocidad vertical máxima.

La velocidad medida por cada receptor está relacionada con la velocidad biestática, y es la proyección del vector de velocidad de 3D en el eje biestático del receptor acústico. Las velocidades biestáticas son salida directas del ADV sólo en las aplicaciones especializadas; normalmente se convierten a velocidades cartesianas (XYZ) usando la geometría de la sonda. Las velocidades cartesianas dan el campo de velocidad 3D relativo a la orientación de la sonda de ADV. Como no siempre es posible controlar la orientación del instrumento, el ADV puede equiparse con una brújula interna y sensor de inclinación. Conocer la orientación del instrumento permite que el ADV comunique los datos de velocidad en un sistema de coordenadas de la Tierra (East-North-Up o ENU), independiente de la orientación de la sonda.

IV.4.4 Definición del volumen de muestreo

El tamaño del volumen de muestreo del ADV está determinado por cuatro factores: muestreo del brazo transmisor, muestreo del brazo recetor, duración del pulso, y la ventana del receptor (período de tiempo sobre el que la señal devuelta es de muestreada). La Figura VI-4 muestra una ilustración 2D del efecto de cada uno de estos factores.

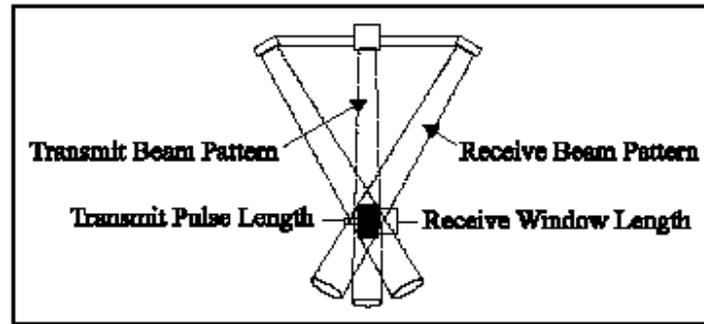


Figura VI-4– Definición del volumen de muestreo de ADV

El volumen de muestreo del ADV no tiene límites horizontales claramente definidos. Estos límites son determinados por la intersección del muestreo de los brazos transmisor y receptor. La definición precisa de la intersección de muestreo de los brazos no se obtiene fácilmente; para nuestro propósito, se aproxima al muestreo del brazo transmisor como un cilindro del tamaño del transmisor cerámico (6-mm para la sonda 10 MHz ADVs). Aunque esto es una simplificación, los resultados son razonablemente exactos especialmente desde los límites verticales del volumen de muestreo que son normalmente los más importantes. Es importante recordar que los límites horizontales del volumen de muestreo no están definidos con precisión y que los objetos cercanos a esos límites pueden interferir potencialmente las medidas de velocidad.

La extensión vertical del volumen de muestreo está definida por la circunvolución de la duración del pulso acústico con la ventana receptora sobre la que la señal devuelta es muestreada. Ambas están controladas por el software de ADV (dentro de los límites del ancho de banda del transductor). La altura total del volumen de muestreo para las sondas de 16 MHz y de 10 MHz ADVs tiene 9 mm. Los bordes verticales del volumen de muestreo pueden ser considerado definidos para ± 0.5 mm en las sondas de 16/10 MHz ADV. Como la duración del pulso y la ventana receptora son controladas por el software, la altura del volumen de muestreo puede reducirse con cambios en el software de adquisición de datos.

Es importante notar que para todas las medidas dadas por el ADV, la ubicación del volumen de muestreo está especificada como el centro vertical del volumen de muestreo. Por ejemplo, si la sonda de 10 MHz ADV muestra el volumen de muestreo para localizarse a 2.0 cm del límite, el borde delantero del volumen de muestreo estará a $[2.0 \text{ cm} - (0.5 * 9 \text{ mm})] \approx 1.5 \text{ cm}$ del límite.

IV.4.5 Procesamiento de pulso-coherente

La descripción de la operación de ADV dada anteriormente es una simplificación del modo en que se mide la velocidad realmente. En el apartado 2 se describió el procesamiento incoherente del Doppler: el transductor envía un pulso sencillo de sonido y mide el cambio de frecuencia de la señal de retornada. En realidad, el ADV usa una técnica llamada procesamiento de pulso-coherente. En esta técnica, el instrumento envía dos pulsos de sonido separados por el tiempo final; se mide la fase de la señal de retorno de cada pulso. El cambio en fase dividido entre el tiempo entre pulsos es directamente proporcional a la velocidad de las partículas en el agua. El procesamiento de pulso-coherente es usado ya que proporciona el mejor resolución posible espacial y temporal.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En este apartado, no se intenta proporcionar una descripción detallada de procesamiento de pulso-coherente, sino presentar una visión general enfocada en cómo afecta a la operación del ADV.

Existe varios aspectos del procesamiento de pulso-coherente que afectan a la operación del ADV. El primero es la limitación inherente en la velocidad máxima que puede medirse. El procesamiento de pulso-coherente mide la fase de señal retornada; la medición de fase está limitada a un rango de $[-\pi, \pi]$. Si la fase excede estos límites, se producirá un ‘wrap around’ (solape de frecuencias) (por ejemplo, si la fase aumenta justo por encima de π , el ADV mide un fase de $-\pi$). Esto se conoce como un salto de ambigüedad, donde (por ejemplo) el ADV medirá una velocidad negativa antes que la verdadera, que es una mayor velocidad positiva.

La velocidad inequívoca máxima es una función del tiempo final entre los dos pulsos. El ADV ofrece al usuario la elección de varios rangos de velocidad prefijados, de los que cada uno corresponde a un tiempo final de pulso particular. Todos los cambios operacionales requeridos por los diferentes rangos de velocidad son manipulados de forma automática por el ADV.

Tal como se discute en los apartados siguientes, el nivel de ruido del instrumento tiene proporción directamente con la configuración de rango de velocidad (los rangos altos de velocidad tienen mayor ruido para cada muestra). Así, siempre se debe escoger el rango de velocidad más bajo que obtenga los requisitos particulares del experimento.

El procesamiento de pulso-coherente afecta la operación de ADV en otras dos situaciones. Al realizar la medición del límite cercano, existe un potencial en el que la reflexión de un pulso en el límite puede interferir con el otro pulso; esto se discute más adelante. Adicionalmente, la habilidad que tiene para ajustar el tiempo final entre los pulsos dan al ADV rendimientos excelentes para aplicaciones con bajas velocidades de flujo.

IV.4.6 Datos de ADV

El ADV registra nueve valores con cada muestra: tres valores de velocidad (uno para cada componente), tres valores de intensidad de señal (uno para cada receptor), y tres valores de correlación (uno para cada receptor). Naturalmente, los datos de velocidad son de mayor interés. La intensidad de señal y correlación se usan para revisar la calidad de los datos y para detectar datos erróneos potenciales.

IV.4.6.1 Velocidad

Los datos de velocidad del ADV pueden ser obtenidos en coordenadas cartesianas (XYZ) relativas a la orientación de la sonda o en las coordenadas de la Tierra (ENU) para sistemas con brújula opcional. Por lo general, la salida de datos de velocidad del ADV puede ser usada directamente sin postprocesado. La calibración del ADV no cambia a menos que la sonda haya sido físicamente dañada. Sólo el tiempo de las correcciones de postprocesado es necesario cuando la velocidad de sonido ha sido especificada incorrectamente.

Varios aspectos de la operación del ADV afectan la calidad de los datos de velocidad. El más importante es la configuración del rango de velocidad. El rango de muestreo del

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

ADV, la precisión de los datos de velocidad, y el ruido generado por el instrumento se ven en los siguientes apartados.

IV.4.6.1.1 Rango de velocidad

Uno de los parámetros más importantes del ADV es la configuración del rango de velocidad. Determina la velocidad máxima que puede ser medida por el instrumento. Las configuraciones del rango de velocidad estándares para la sonda 16/10 MHz ADVs son ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 , y ± 250 cm/s. Por lo general, se debe escoger la configuración del rango de velocidad más baja que cubra la velocidad máxima esperada en un ensayo dado. El ruido generado por el instrumento en los datos de velocidad es proporcional a la configuración de rango de velocidad; altos rangos de velocidad tienen niveles de ruido más altos.

La configuración del rango de velocidad son valores nominales; la máxima velocidad real depende de la dirección del flujo respecto la sonda. El ADV mide velocidades a lo largo del eje de biestático de cada receptor; las limitaciones de velocidad máximas se producen en las velocidades biestáticas. Puesto que los ejes biestáticos tiene una inclinación de 15° respecto al eje vertical de la sonda, el ADV es más sensible al flujo vertical, y tiene una velocidad máxima inferior para flujos verticales. Las tablas siguientes muestran las velocidades máximas que pueden medirse en cada rango de velocidad del ADV para flujos meramente verticales o meramente horizontales.

Rango de velocidad del ADV	Máxima velocidad horizontal	Máxima velocidad vertical
± 3 cm/s	± 30 cm/s	± 8 cm/s
± 10 cm/s	± 60 cm/s	± 15 cm/s
± 30 cm/s	± 120 cm/s	± 30 cm/s
± 100 cm/s	± 300 cm/s	± 75 cm/s
± 250 cm/s	± 360 cm/s	± 90 cm/s

Al operar en flujos altamente turbulentos, el ADV puede mostrar valores de correlación bajos que indican un aumento del ruido en las medidas de velocidad. En flujos turbulentos, el nivel de ruido puede reducirse aumentando el rango de velocidad. La magnitud de las fluctuaciones turbulentas puede aproximarse por la desviación estándar de los datos de velocidad mostrado por el software de adquisición de datos del ADV. Si éstos son 5% o más de la configuración de rango de velocidad (por ejemplo, mayor que 5 cm/s en el rango de velocidad ± 100 cm/s), el rendimiento se debe mejorar cambiando al rango de velocidad mayor más próximo. Este cambio debe aumentar el coeficiente de correlación y reducir el ruido en los datos de velocidad.

IV.4.6.1.2 Muestreo

El ADV está diseñado para medir la velocidad tan rápidamente como sea posible. Una estimación sencilla del campo de velocidad 3D se refiere a *un sonido de impacto*. El ADV registra 150-250 veces por segundo de sonido de impacto (la proporción varía con la configuración del rango de velocidad). Como el ruido en un sonido de impacto sencillo es demasiado alto para su uso práctico, el ADV promedia varios sonidos de impacto para reducir el nivel de ruido en cada muestra de velocidad de salida. El número de sonidos de

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

impacto promediados es configurado al especificar el usuario el rango de muestreo, en el rango de 0.1 a 25 Hz. Por ejemplo, al muestrear a 25 Hz el ADV reunirá tantos sonidos de impacto como sea posible sobre un periodo de 40 ms, promediando estos valores en conjunto, y dando como salida el promedio como una muestra.

Un resultado importante del esquema de muestreo del ADV es que reduciendo el rango de muestreo disminuye el ruido en cada muestra (aumentando el número de sonidos de impacto promediados por muestra). El ruido generado por el instrumento, también denominado como ruido Doppler, es casual; promediando múltiples puntos convergirá hacia el valor real sin introducir predisposiciones. El nivel de ruido disminuye con la raíz cuadrada del número de muestras promediadas; así, la salida de datos a 1 Hz tiene alrededor de un quinto del ruido de salida de datos a 25 Hz.

IV.4.6.1.3 Incertidumbre a corto plazo (ruido)

Todos los sistemas Doppler tienen un ruido de medida inherente resultado del proceso físico mediante el cual las ondas sonoras son dispersadas por las partículas del agua. El ruido Doppler es meramente casual y pueda asumirse que sigue una distribución de Gauss. Promediando puntos de datos múltiples converge al valor real sin introducir predisposiciones.

Bajo condiciones de buen funcionamiento (por ejemplo, SNR > 15 dB, correlación mayor que 70%), el ruido en los datos de velocidad horizontal del ADV es estimado al 1% del rango de velocidad cuando la salida de datos es a 25 Hz. Por ejemplo, las muestras individuales a 25 Hz tendrán un ruido de velocidad horizontal de cerca de ± 1 cm/s usando el rango de velocidad ± 100 cm/s (o alrededor de ± 0.3 cm/s usando el rango de velocidad de 30 cm/s). Como el ruido disminuye con la raíz cuadrada del número de sonidos de impacto promediados por muestra, las muestras individuales a 1 Hz tendrán un ruido de cerca de ± 0.2 cm/s usando el rango de velocidad de 100 cm/s.

Nótese que las estimaciones de ruido anteriores son para velocidad horizontal. Como los ejes biestáticos de los receptores de ADV tiene una inclinación de 15° respecto al eje vertical, el ruido en las medidas de velocidad horizontales es mayor que en medidas de velocidad verticales en aproximadamente un factor de cuatro.

IV.4.6.1.4 Exactitud

La exactitud para los datos de velocidad de ADV se refiere a la presencia de una predisposición en las medidas de velocidad medias después de eliminar el ruido generado por el instrumento. Dos factores principales influyen en la exactitud de medidas de velocidad del ADV: velocidad del sonido y geometría de la sonda. La velocidad del sonido es un parámetro introducido por el usuario; errores en la introducción de la velocidad del sonido causarán errores en las medidas de velocidad que pueden ser rectificadas en el postprocesado. La geometría de la sonda es calibrada en la fábrica para cada ADV; ninguna recalibración es necesaria a menos que la sonda haya sido dañada físicamente.

La exactitud de la geometría de sonda, con calibración de fábrica, está especificada en $\pm 1.0\%$ de la velocidad medida (por ejemplo, una exactitud de ± 1.0 cm/s en una velocidad medida de 100 cm/s). Esto representa los límites del procedimiento de calibración para determinar la alineación angular del transmisor y receptores acústicos.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Las especificaciones de ADV manifiestan un cero máximo para la velocidad de ± 0.25 cm/s. Con procesamiento Doppler, no existe ningún potencial para configurar cero en las medidas de velocidad; esta especificación es incluida debido a la dificultad de generar velocidades calibradas en flujos lentos.

IV.4.6.2 Intensidad de señal

La intensidad de señal, registrada para cada receptor de ADV, es una medida de la intensidad de la señal acústica reflejada. Se registra como amplitud de la señal bruta en unidades logarítmicas internas de *cuentas*; una cuenta equivale a 0.43 dB. Con el software de ADV, se puede acceder a la intensidad de señal como amplitud de la señal en cuentas o como relación de señal de ruido (SNR) en dB. La SNR se deriva de amplitud de la señal substrayendo el nivel de ruido ambiente y convirtiendo a unidades de dB.

La función principal de los datos de intensidad de señal es verificar la existencia de partículas materiales suficientes en el agua. Si el agua está demasiado clara, la señal retornada puede no ser más fuerte que el nivel de ruido ambiente de la electrónica. Sin intensidad de señal suficiente, el ADV no puede realizar medidas de velocidad exactas. Cuando la SNR disminuye, el ruido en las medidas de velocidad de ADV crece. Para medidas de alta resolución (por ejemplo, muestreos a 25 Hz), se recomienda mantener el SNR al menos a 15 dB. Para medidas instantáneas medias (por ejemplo, muestreos a 0.5 Hz, o una vez cada 2 segundos), el ADV puede operar con seguridad con una SNR de hasta 5 dB.

La intensidad de la señal devuelta es función de la cantidad y tipo de las substancias materiales en el agua. Los valores de intensidad de la señal pueden usarse como una medida de la concentración de sedimentos cuando el tipo del sedimento se conoce. Aunque los datos de intensidad de señal de ADV no se pueden convertir directamente a concentración de sedimentos, proporcionan un muestreo cualitativo excelente de fluctuaciones de sedimentos y, con la calibración apropiada, pueden usarse para estimaciones razonablemente exactas de la concentración de sedimentos.

IV.4.6.3 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación de ADV es un parámetro de calidad de los datos de salida directa con los cálculos de velocidad Doppler. El ADV calcula tres valores de correlación, un para cada recipiente acústico, con cada muestra de velocidad. La correlación es expresada como un porcentaje: la correlación perfecta indica una fiabilidad del 100%, en mediciones de velocidad con bajo ruido; la correlación 0% indica que el valor de velocidad de salida está dominado por el ruido (no hay señal coherente). La correlación puede usarse para revisar la calidad de los datos durante la recopilación y para editar datos en postprocesado. Por ejemplo, si el ADV está siendo usado en sondas donde periódicamente está fuera del agua, los valores de correlación pueden usarse para determinar que parte de los datos pueden ser usadas.

Idealmente, los valores de correlación deben estar entre 70 y 100%. Valores por debajo del 70% indican que el ADV esté operando en un régimen de medida difícil, la sonda está fuera del agua, el SNR es demasiado bajo, o que puede pasarle algo al ADV. En ciertos

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

entornos (flujos altamente turbulentos, agua altamente aireada), puede no ser posible lograr altos valores de correlación. Los valores de correlación bajos afectarán la variabilidad a corto plazo en los datos de velocidad (por ejemplo, aumento del ruido), pero no predisponen las mediciones de velocidad media. Para mediciones de velocidad media, valores de correlación más bajos de hasta 30% pueden usarse.

La descripción dada es una orientación general para usar el coeficiente de correlación como un parámetro de la calidad de los datos. Para comprender el significado exacto del coeficiente de correlación, y todos los factores afectados por él, se requiere una discusión en profundidad sobre proceso Doppler de pulso coherente.

IV.4.7 Programa de adquisición de datos en tiempo real (ADF.EXE)

El software de adquisición de datos en tiempo real de SonTek.s, ADVField (ADF.EXE), es un programa de MS-DOS para la toma de datos de velocidades con equipos ADV.

El software de adquisición de datos tiene tres modos de la operación: calibración, ajuste del límite y adquisición de datos. El programa se inicia en el modo de calibración, donde aparece un menú para especificar los parámetros empleados en la recopilación de datos. Una vez completado, se entra el modo de ajuste de límite. En el modo de ajuste de límite, el ADV busca la presencia de un límite (en el fondo, la superficie o el lateral) delante de la sonda mostrando la distancia al límite en la pantalla. Al modo de adquisición de datos se entra desde el modo de ajuste de límite. En el modo de adquisición de datos, el programa recopila, muestrea y graba (si se elige esta opción) los datos de velocidad hasta que el usuario lo detiene. Mientras que los datos se están recopilando, se puede cambiar la pantalla sin interrumpir el muestreo o la grabación de datos.

La descripción del software de adquisición de datos está dividida en las siguientes secciones:

IV.4.7.1 Archivo de Configuración de sonda.

Antes de ejecutar el software de adquisición de datos, se debe especificar qué sonda de ADVField se va a utilizar. Se hace en un archivo de definición de sonda ASCII, que es leído por el software de adquisición de datos durante su ejecución.

IV.4.7.2 Modo de calibración.

Es la primera pantalla de adquisición de datos que permite la modificación de parámetros de recopilación de datos del ADV (temperatura, salinidad, rango de muestreo, rango de velocidad, etc.).

En la Figura VI-5 se muestra la pantalla de calibración para el programa de adquisición de datos.

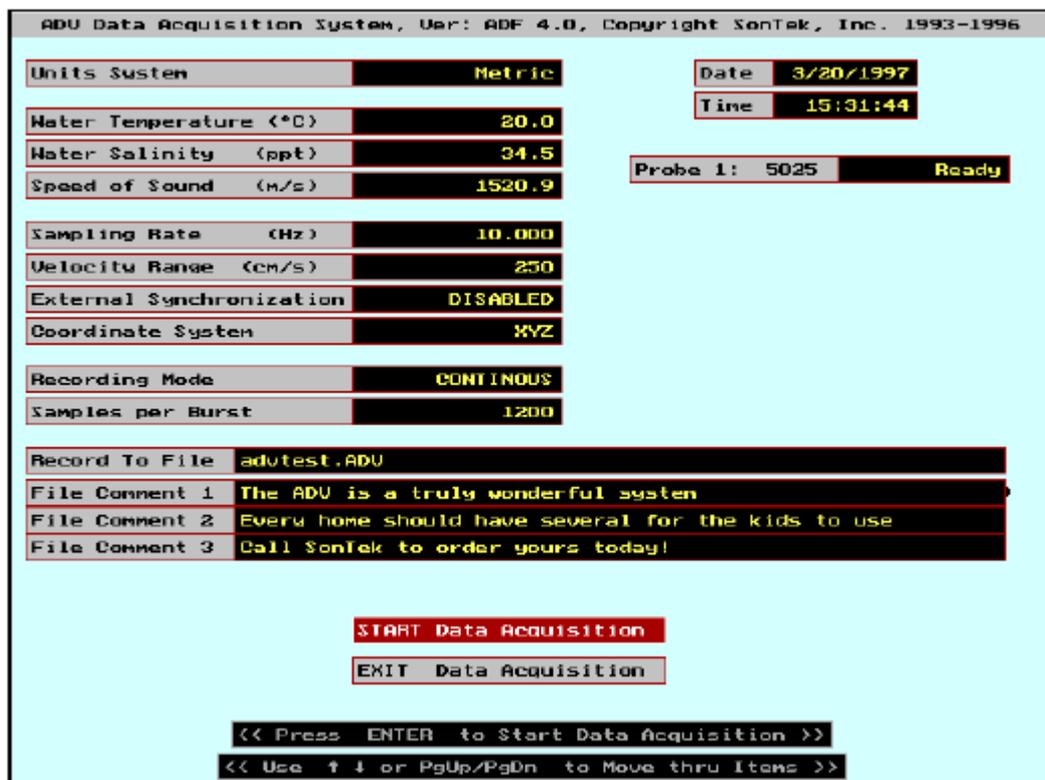


Figura VI-5-‘Modo de calibración’ del software de adquisición de datos.

En la parte superior derecha de la pantalla se muestra la fecha y hora actual del ordenador, así como la sonda ADV especificada. **Ready** indica que el ADV está correctamente instalado y operacional. **Fail** indica que el módulo de proceso no se ha encontrado o que ha fallado un test interno.

A la izquierda de la pantalla se muestran los parámetros de recopilación de datos que pueden modificarse:

Sistema de unidades

Se puede elegir entre sistema de unidades **métrico** (cm/s, cm, $^{\circ}\text{C}$) o en unidades **inglesas** (ft/s, pulgadas, $^{\circ}\text{F}$). Afectan también a las unidades del fichero de datos binario en que se registran las mediciones.

Temperatura / salinidad de agua

La temperatura y salinidad se usan para calcular la velocidad del sonido, que determina el factor de escala usado para la conversión del Doppler a velocidades. El rango de temperatura disponible es de -2 a 50 $^{\circ}\text{C}$ o 28 a 122 $^{\circ}\text{F}$, según el sistema de unidades. El rango de salinidad es de 0 a 60 ppm.

La velocidad del sonido (valor derivado)

La velocidad del sonido en el agua se muestra en el menú sólo como información, ya que se calcula a partir de los valores introducidos por el usuario de la temperatura y salinidad, y no se puede modificar.

Rango de muestreo (de 0.1 a 25 Hz)

Con este parámetro se indican las muestras tomadas por segundo.

En este estudio, se eligió un rango de muestreo a 10 Hz durante 5 minutos, obteniéndose 3000 muestreos de cada medición. Además, se realizaron pruebas comparativas a 25 Hz, durante 5 minutos, y a 10 Hz, durante 10 minutos, para ver la modificación de los resultados con cada elección.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Rango de velocidad

La incertidumbre estadística (ruido) en las medidas de velocidad de ADV es aproximadamente proporcional a la velocidad máxima que el ADV puede medir. Los fabricantes recomiendan emplear el rango de velocidad del ADV mínimo que cubra el rango de velocidades esperadas en el experimento. El rango de velocidad para la sonda de 16/10 MHz ADV puede ponerse cualquiera de ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 , o ± 250 cm/s.

Se escogió un rango de velocidades de ± 100 cm/s, con el que se cubrían todas las velocidades previsible.

Sincronización externa

El ADV se puede sincronizar con cualquier sistema de adquisición de datos externo.

Al no disponer de sincronizadores externos, esta opción no se empleó.

Sistema de coordenadas

Determina el sistema de coordenadas usado para la visualización y grabación de los datos de velocidad ADV. **XYZ** especifica el sistema de coordenadas cartesianas relativo a la orientación de la sonda. **ENU** especifica un sistema de coordenadas de la referente a la Tierra, independiente de la orientación de la sonda, puede ser usado sólo en sistemas con sensor de brújula/inclinación opcional.

Se escogió el sistema de coordenadas XYZ.

El modo de grabación

Determina el modo para grabar los datos de velocidad de ADV al disco del ordenador: **continuo** o **por intervalos (CONTINUOUS o BURST)**.

Para la toma de velocidades, se usó el modo continuo.

Muestras por intervalo

Con este parámetro, se determina el número de muestras registradas por intervalo al usar el modo de grabación por intervalos. Este parámetro es ignorado al usar el modo de grabación continuo.

Grabación a un archivo (introducir el nombre del archivo)

Este apartado asigna un fichero en el disco del ordenador para grabar los datos del ADV.

Comentario de archivo 1/ 2/ 3

Le permite introducir hasta tres líneas de texto de 60 caracteres, que serán incluidos en el fichero de datos.

Iniciar la adquisición de datos

Apretando esta barra, el programa inicia el ADV y entra el modo de ajuste del límite.

EXIT

Apretando esta barra, finaliza el programa y retorna a DOS. Al salir, el programa guarda los valores actuales de todos los parámetros de menú (excepto el archivo de grabación) de modo que no necesita ser reintroducido cada vez el programa es ejecutado.

IV.4.7.3 Modo de ajuste de límite.

La segunda pantalla de adquisición de datos que muestra la distancia de la sonda ADV al límite (si lo detecta).

La Figura VI-6 muestra la pantalla de ajuste del límite. En modo de ajuste de límite, el ADV continuamente explora la región delante de la sonda para detectar la presencia de un límite sólido o superficial. La pantalla muestra el número de sonda del archivo de definición de la sonda, la distancia de la punta de la sonda al límite, la distancia del centro del volumen de muestreo a ese límite, y la configuración del rango de velocidad. Si no se detecta ningún límite, mostrará **NO DETECTED**.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

El ADV, normalmente, puede detectar un límite dentro de 25 cm para las sondas de 16/10 MHz ADV. La información del límite es útil para colocar la sonda cerca de la superficie o un límite sólido.

El modo de ajuste de límite es necesario porque el ADV debe ajustar su operación para impedir que las reflexiones en el límite interfieran con las señales del volumen de muestreo.

Desde este modo, se puede ir al modo de adquisición de datos o volver al modo de calibración.

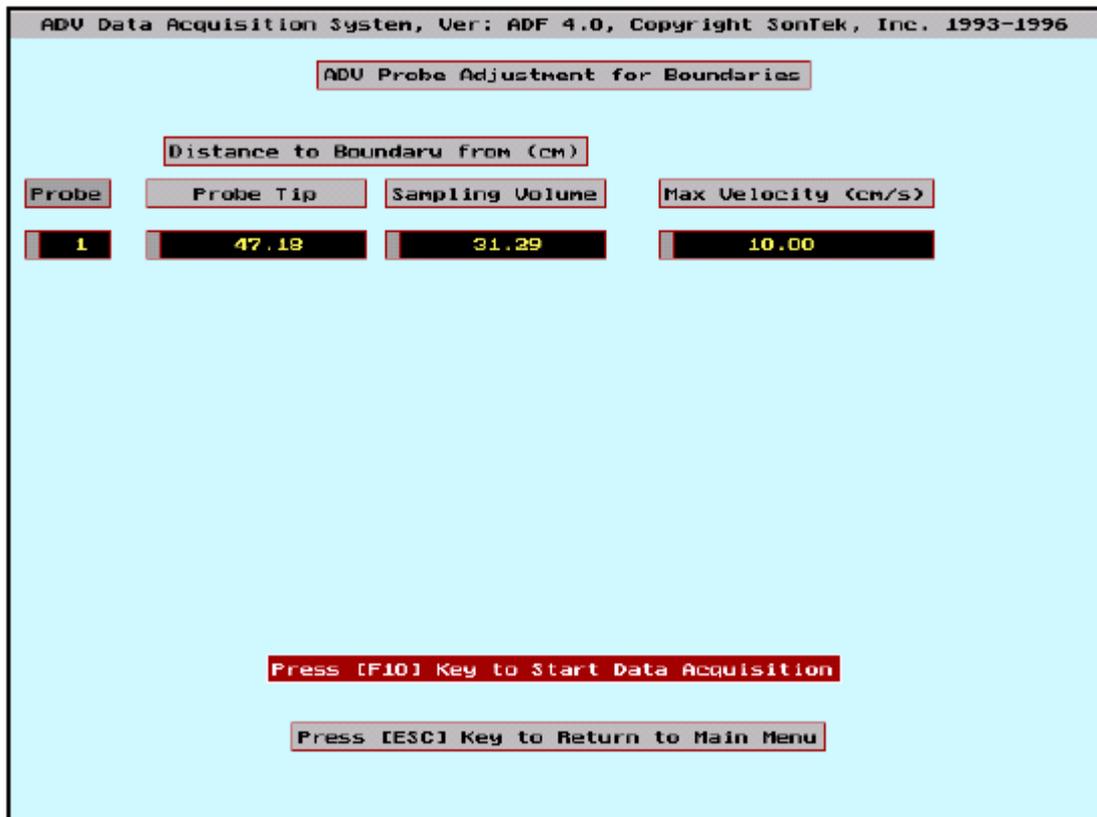


Figura VI-6-‘Modo de ajuste del límite’ del software de adquisición de datos.

IV.4.7.4 Modo de adquisición de datos

La pantalla final de adquisición de datos proporciona una pantalla tabular y gráfica en tiempo real de los datos de ADV. La Figura VI-7 muestra la pantalla de adquisición de datos.

La pantalla de adquisición de datos está dividida en cuatro secciones. La pantalla superior informa del estado de la adquisición de datos. Debajo de ésta, la sección de datos tabular muestra los valores de datos de velocidad y análisis. Con las medidas en tiempo real, se calculan la relación de señal de ruido (SNR), la correlación, y los datos de velocidad. La parte inferior muestra qué opciones están activadas durante la adquisición de datos y sus funciones.

Información de estado

La información de estado es actualizada después de cada muestra, pero no más de una vez por segundo.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Grabación a un archivo

Muestra el nombre del archivo en que los datos se están guardando. Si la grabación está incapacitada, se muestra **NOT RECORDING**.

Tamaño de archivo / espacio en disco/ tiempo de grabación disponible

Estos campos muestran la información sólo cuando se está grabando. **File Size** muestra el tamaño actual del fichero de datos en kb. **Disk Space** muestra la cantidad de espacio libre en el disco o en del fichero de datos en que se almacena. **Recording Time Left** dice cuántas horas pueden grabarse con el rango de muestreo actual antes de que el disco se complete.

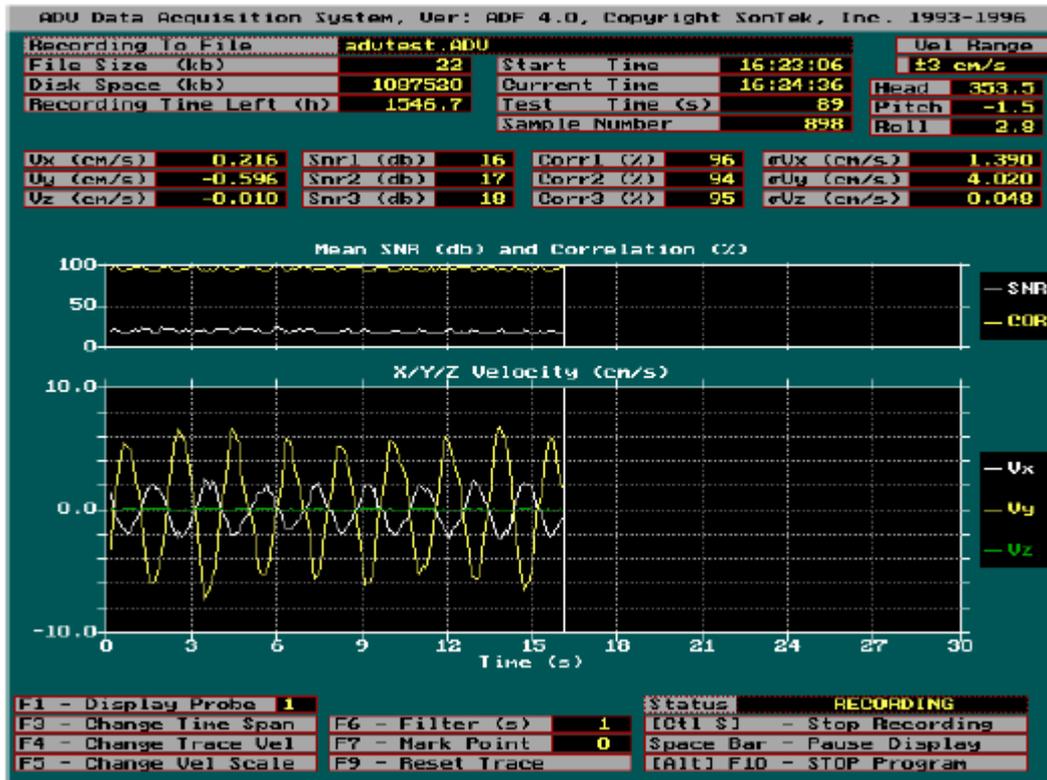


Figura VI-7. "Modo de adquisición de datos" del software de adquisición de datos

Tiempo de inicio/ tiempo actual

Estos tiempos son obtenidos del reloj del ordenados. **Start Time** es la hora a la que se inició la adquisición de datos (hora del primer muestreo). **Current Time** es la hora actual del muestreo.

Tiempo de test

Es el tiempo total, en segundos, de la serie temporal recopilada.

Número de muestras

Es el número de muestras de velocidad registradas (si la grabación está habilitada) o mostradas (si la grabación no está habilitada).

Rango de velocidad

Configuración del rango de velocidad actual.

Head/ Pitch/ Roll

Estas ventanas muestran los datos del sensor opcional de brújula / inclinación.

Datos tabuladosVx/ Vy/ Vz o E/ N/ Up

Muestran los últimos valores de las tres componentes de velocidad en las unidades correspondientes al sistema de unidades escogido en el modo de instalación (cm/ s o ft/ s), usando el sistema de coordenadas especificado en dicho modo (XYZ o ENU).

SNR1/ SNR2/ SNR3

Muestran la última relación de señal de ruido (SNR) medido para cada uno de los tres receptores acústicos. Los valores se dan en dB.

Corr1/Corr2/Corr3

Son últimos valores del coeficiente de correlación para cada uno de los tres receptores acústicos. Los valores son dados como un porcentaje, donde el 100 es la correlación perfecta.

 σ Vx/ σ Vy/ σ Vz

Éstas son las desviaciones estándar de los tres componentes de velocidad. Pueden ser útiles como un indicador de turbulencia o velocidades orbitales de onda. Las unidades están en cm/ s o ft/ s, dependiendo de la configuración en el modo de instalación.

Pantalla gráfica

La parte central de la pantalla muestra dos partes. La parte superior representa el valor medio para la relación de señal de ruido (SNR) de los tres receptores acústicos (en dB) y el valor medio para la correlación para los tres receptores (en %). La parte inferior muestra la serie de tiempo de las tres componentes de velocidad.

Opciones activas

Varias opciones activas (o combinaciones de opciones) pueden usarse durante la recopilación de datos. Nota: Dos de estas opciones (CTRL+ S y CTRL+ Q) afectan a la grabación de datos mientras que el programa está en el modo de adquisición de datos.

F1 - Muestra la sonda

No usada en sistemas de ADVField.

F3-Cambio del período de tiempo

Esta opción le permite cambiar el período de tiempo del registro que es mostrado gráficamente.

F4 - Cambio del registro de velocidad

Le permite cambiar las componentes de velocidad mostradas. Se pueden mostrar las tres componentes simultáneamente o por separado.

F5 – Cambio de la escala de velocidad

Esta tecla le permite cambiar la escala de velocidad de la gráfica.

F6 - Filtro

Los datos de la pantalla tabular pueden ser filtrados para estimar las medias de sus valores cambiando la escala de velocidad que para ello emplean.

En la adquisición de datos no se emplearon filtros.

F7-Marcas de puntos de datos

Esta opción está activa sólo cuando los datos se están grabando. Apretando <F7> marca el muestreo y así se puede localizar fácilmente cuando los datos se analizan más tarde.

F9 - Reinicio de la gráfica

Esta opción reinicia la parte gráfica.

Barra espaciadora - pausa la pantalla

Apertando la barra espaciadora congelará la imagen de la pantalla. Apertando la barra espaciadora de nuevo reanudará la actualización de pantalla. Durante una pausa, el programa continúa reuniendo y registrando datos (si está habilitada la opción de

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

grabación).

Estado

Es un indicador del estado actual del ADV.

CTRL+ Q

Con este comando iniciará la grabación desde el modo de adquisición de datos.

CTRL+ S

Este comando detiene la grabación de datos, pero mantiene el sistema en el modo de adquisición de datos.

Alt+ F10 – Detención del programa

Empleando este comando detiene la adquisición de datos. Se debe confirmar que se desea detener la recopilación de datos. Una vez detenido, el programa vuelve al modo de calibración.

IV.4.7.5 Datos registrados

El software de adquisición de datos de ADV registra los datos en un formato de archivo binario.

Al principio de adquisición de datos, el software de adquisición de datos registra varias configuraciones internas empleadas, así como los parámetros de recopilación de datos especificados por el usuario. En el modo de ajuste de límite, el software registra la última distancia medida al límite. Con cada muestra, el programa graba un registro binario que contiene los datos de velocidad (de las tres componentes), datos de SNR (tres valores, uno para cada receptor), datos de correlación (tres valores, uno para cada receptor), y el valor actual del suceso mostrado. Si el ADV tiene sensores opcionales instalados de brújula/inclinación, temperatura, o presión, también se registrarán los datos de estos sensores instalados con cada muestra. A toda la información contenida en estos ficheros de datos se puede acceder utilizando los programas de conversión de datos como ‘WinADV’.

IV.4.8 WinADV. Programa de conversión de datos ADV.

IV.4.8.1 El programa de WinADV

Este programa de post-procesamiento de datos fue diseñado por Tonito Wahl del U.S. Bureau of Reclamation. WinADV proporciona un entorno integrado para ver, revisar, y procesar los datos reunidos usando un ADV. Además, sirve para ver de forma rápida la gráfica serie-tiempo, los histogramas, o Transformada Rápida de Fourier (FFTs) de los datos de velocidad registrados.

Existen tres vistas primarias de los datos de ADV: serie cronológica, histograma, y espectro de potencia. Cada gráfica aparece por separado en pantalla principal del WinADV (figura VI-8). La gráfica de serie cronológica puede mostrar las componentes y magnitudes de velocidad, amplitud de la señal, relación de la señal de ruido, y resultado de la correlación. Además, las marcas introducidas dentro del archivo para identificar puntos de interés anotados durante la recopilación de datos pueden verse en la gráfica usada para mostrar la serie cronológica de SNR y COR. El usuario puede optar por visualizar los valores medios o mínimos de los parámetros de SNR y COR, desde valores múltiples registrados dentro del archivo ADV (uno para cada receptor acústico). Varias opciones de

formato están disponibles para mostrar la gráfica de la serie cronológica (por ejemplo, marca lineal, sólo símbolos, barra gráfica, etc).

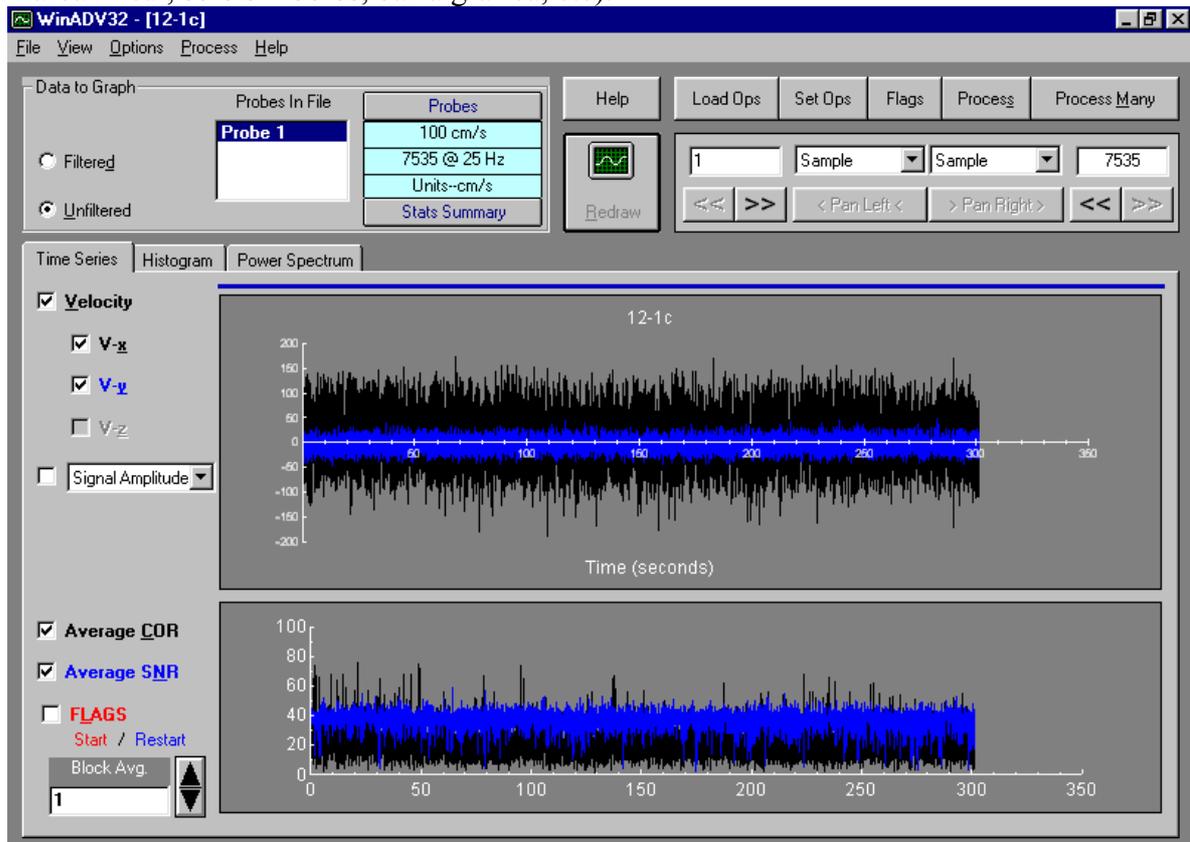


Figura VI-8. Pantalla principal de WinADV que muestra la serie cronológica de velocidad, valores de SNR y COR y marcas registradas.

La vista de histograma muestra un histograma de los datos registrados, con distinta opciones para ver una o más componentes la de velocidad, amplitudes de señal, valores de SNR o COR o los datos de los sensores integrados. La gráfica puede verse como una función de densidad de probabilidad o una función de distribución de probabilidad. La Figura VI-9 muestra una gráfica de histograma creada por WinADV.

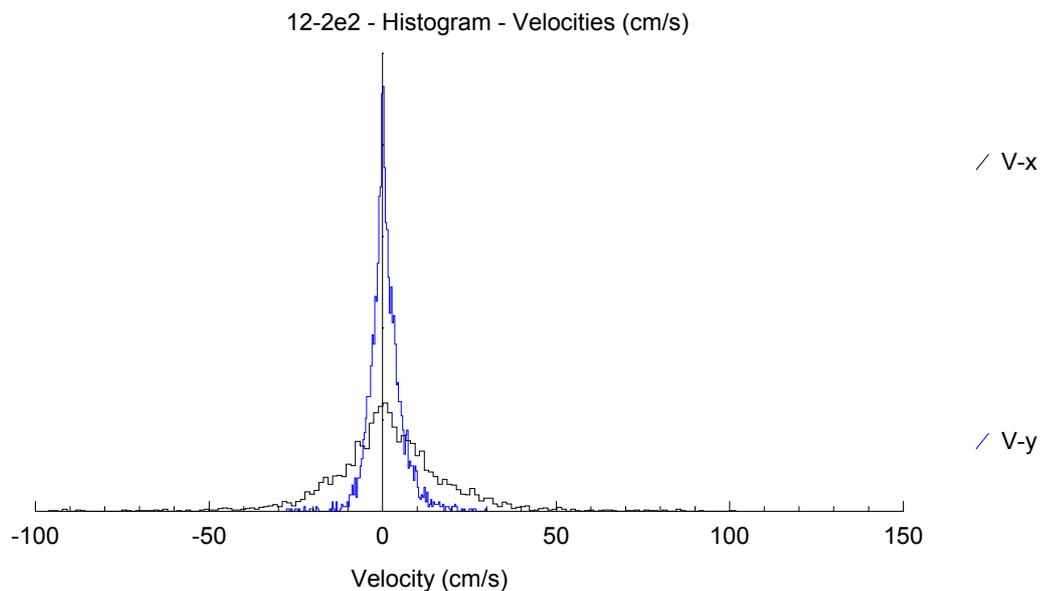


Figura VI-9. Gráfica de histograma creada con WinADV.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

La gráfica de espectro de potencia (FFT) puede mostrar espectros de potencia para los mismos parámetros disponibles en las gráficas de series cronológicas e histogramas (figura VI-10). Las gráficas de espectro de potencia pueden usarse en estudios suponiendo ondas u otras oscilaciones de flujo periódico, y para detectar movimientos periódicos de la sonda no premeditados que pueden ocurrir durante la recopilación de datos.

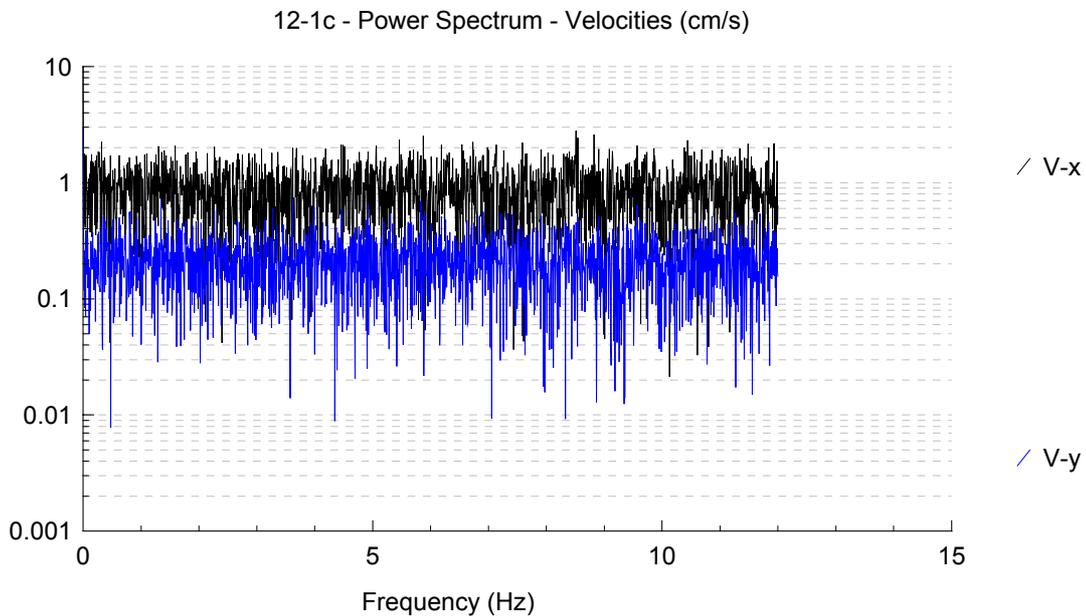


Figura VI-10. Gráfica de histograma creada con WinADV.

El objetivo de la gráfica de espectro de potencia en WinADV es el de suministrar medios para identificar fácilmente la periodicidad en los datos.

Además de mostrar los datos medidos de un archivo ADV, WinADV sirve para mirar e imprimir la configuración de la sonda y la medida usada para registrar los datos. La información incluye los tipos de sonda, número de serie, configuraciones de los rangos de velocidad, y medida de las distancias al volumen de muestreo y a los límites cercanos.

WinADV proporciona opciones para procesamiento de los datos. Se obtiene un rápido resumen de las estadísticas calculadas haciendo clic en el botón **Stats Summary**, pudiendo cargarse ficheros de datos sencillos para revisarlos, realizarles un filtrado, y procesado, o usarse el programa para repasar o procesar rápidamente ficheros de datos múltiples dentro de un subdirectorio sencillo.

IV.4.8.2 Opciones de programas

Los datos que manejan las opciones se pueden dividir en cuatro categorías:

- Opciones de las muestras para definir el rango o rangos de muestras a analizar.
- Filtrado de los datos para excluir datos erróneos o de pocas cualidades.
- Opciones para definir el movimiento de una sonda móvil.
- Escala para convertir datos a un escala prototipo y realizar transformaciones de coordenada simples.

La configuración de las opciones puede guardarse en un archivo para su uso posterior con otros archivos de ADV.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

División de datos dentro de un archivo de ADV sencillo usando las opciones de las muestras. El software de adquisición de datos de tiempo real usado permite el almacenamiento de una serie cronológica sencilla de datos dentro de cada archivo. WinADV ofrece nueve métodos para subdividir el fichero de datos en ventanas de muestras para revisarlos y analizarlos.

- **Opciones del filtrando de datos.** El filtrado de datos es importante en el análisis de los datos de ADV. Los resultados de relación de señal de ruido y correlación son buenos indicadores de algunos posibles problemas que pueden aparecer al usar un ADV, y WinADV ofrece filtros basados en sus valores. Los filtros de WinADV pueden ser aplicados por separado o de forma combinada.

El parámetro de SNR indica la densidad relativa de la dispersión acústica en la corriente y la fuerza resultante de la señal recibida comparada con el nivel de ruido del instrumento. Los fabricantes de ADV recomiendan un valor de SNR de al menos 5 al medir la velocidad promedio de fluidez, y 15 o más alto al medir velocidades instantáneas y cantidades de turbulencia. WinADV ofrece un filtro basado en el valor de SNR, donde el usuario escoge el nivel de corte.

El parámetro de correlación, COR, es un indicador de la consistencia relativa del comportamiento de la dispersión en el volumen de muestra durante el periodo de muestreo. ADV reúne los datos al mayor rango de muestreo que la muestra comunique en el periodo, y el parámetro COR indica la consistencia de las medidas múltiples que tiene lugar dentro de cada periodo de muestreo. WinADV ofrece un filtro basado en el valor de la correlación, con la opción para ajustar el valor de corte. Aunque los fabricantes recomiendan filtrar los datos con valor inferior al 70 % de la correlación, la experiencia demuestra que las muestras con valores de correlación mucho menores que 70 pueden proporcionar datos fiables, especialmente cuando la relación de la señal de ruido es alta y el flujo es relativamente turbulento (condición que parece estar ligada a bajos valores de correlación).

- **Características para modelado a escala.** El usuario puede escoger la escala geométrica de un modelo de Froude a escala, y WinADV calcula la relación de escala de velocidad correspondiente de la relación $\lambda_V = \lambda_L^{0.5}$, donde λ_V y λ_L son la relación de escala de velocidad y longitud, respectivamente.

- **Opciones de procesamiento de datos.** El módulo de procesamiento de WinADV opera en un archivo ADV completo, o en una ventana de muestreo individual definida por el usuario. Los ficheros de datos son exportados en archivos ASCII, compatibles con la mayor parte de las hojas electrónicas. Las opciones de salida incluyen el histograma, el espectro de potencia, y la exportación de los datos de la serie cronológica, así como el cálculo y exportación de los resúmenes estadísticos.

Las opciones de los datos filtrados y sin filtrar de la serie cronológica exportada están disponibles, junto a los datos escritos en archivos ASCII con el nombre **advfile.vu** y **advfile.vf**, donde los vu y vf indican las velocidades filtradas y sin filtrar, respectivamente, y advfile es el nombre base del fichero de datos de ADV. En estos archivos se puede observar el valor de todas las medidas realizadas en el tiempo de muestreo, donde aparece el tiempo de cada muestreo; la velocidad para cada eje de coordenadas; la correlación, la relación señal de ruido y la amplitud de cada receptor acústico respecto al transmisor y la

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

media de los valores de correlación, relación señal de ruido y amplitud, considerando únicamente los ejes medidos.

El resumen estadístico para los datos filtrados y sin filtrar de la serie cronológica son exportados en archivos denominados **Filtered.Sum** y **UnFilter.Sum**. Un listado parcial de las estadísticas calculadas incluye:

- Media, desviación estándar, sesgo y kurtosis de las componentes de velocidad.
- Covarianzas de las componentes de velocidad
- Los intervalos de confianza del 95% en las componentes de velocidad (por ejemplo, la diferencia entre los puntos finales superiores e inferiores del intervalo de confianza).
- Magnitudes de velocidad media, correlaciones de velocidad, relaciones de señal de ruido y amplitudes de la señal.
- Valores medios de los datos de sensores externos almacenados en el archivo, tales como presiones, temperaturas, etc.

Los archivos de extensión .FFT contienen datos de amplitud para FFT calculados de los datos de velocidad brutos. Para los archivos que contienen sólo una ventana de muestreo (por ejemplo, todas las muestras o un rango de muestras), el FFT se calcula para cada componente de velocidad de cada sonda en el archivo de ADV. Definiendo las ventanas de muestreo, el FFT será calculado para cada componente de velocidad de cada sonda, en cada ventana de muestreo. Los archivos están delimitados con líneas de texto identificando el rango de muestreo y las opciones usadas para calcular el FFT y con los títulos de las columnas de la forma FFTx_0 para el FFT de la componente x de sonda 0.

IV.4.8.3 Pantallas de salida gráfica del programa.

▪ Gráfica de serie cronológica

La gráfica de serie cronológica puede mostrar datos de velocidad, datos de amplitud de señal, o datos analógico/digital (A/D) almacenados en el archivo de ADV que usan el módulo de entrada analógico opcional. El rango visión puede ajustarse usando los testigos en la esquina superior derecha de la pantalla. El estilo de gráfica puede ajustarse y el dibujo puede moverse a derecha e izquierda usando los controles a la izquierda de la gráfica. Los bloques promediados pueden ser usados para minimizar el número de puntos que dibujen en la gráfica. WinADV forzará el uso de bloques promediados si el número de puntos en una gráfica excede los 6000 (el límite de control de la gráfica Visual Basic's).

▪ Banderas y gráfica de calidades de la señal

Esta gráfica muestra la serie cronológica de los resultados de correlación y las relaciones de señal de ruido (SNR) para cada medida y dibujan la posición de banderas (marcadores de evento) dentro del archivo ADV. Cualquier promedio de los 3 brazos o correlación mínima y SNR de los 3 brazos puede dibujarse. La altura de los marcadores de bandera está a una escala proporcional de modo que la última bandera en el archivo se dibuja con una altura de 100 en la gráfica.

▪ Gráfica de histograma

En esta gráfica se muestran los histogramas de los datos de ADV. Esta gráfica se usa para proporcionar una indicación visual rápida de la distribución de velocidad y los datos de calidad de la señal. Las anchuras de los bloques son determinadas por el programa de WinADV para proporcionar una apariencia de gráfica razonable, y no puede ajustarse. Ambos formatos p.d.f. y c.d.f. están disponibles para permitir la inspección de la forma de

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

la distribución y permitir la estimación de fracciones de valores de datos sobre o debajo de un nivel específico. Una escala vertical es mostrada sólo en la gráfica c.d.f., con rango de 0 a 1.

- **Gráfica de FFT**

La gráfica de la Transformación Rápida de Fourier (FFT) muestra la amplitud de las tres componentes de la velocidad. La frecuencia máxima mostrada en la gráfica puede ajustarse, pero no puede ser más alta que la frecuencia de Nyquist (mitad del rango de muestreo). Las amplitudes son dibujadas en una escala logarítmica \log_{10} . El FFT es calculado de modo que una onda sinusoidal pura con una amplitud pico de dominio-tiempo máximo de 1,0 tendrá una amplitud de FFT de 0,5.

Al operar en modo de FFT, la esquina superior derecha de la gráfica mirando la pantalla contiene los controles usados para escoger la ventana de muestreo para ser usada para el cálculo de FFT. Se puede escoger también el tamaño del bloque de muestreo usado para calcular el FFT (y con eso realizar promedios de múltiples FFT).

La Transformada Rápida de Fourier se calcula usando el algoritmo descrito en Press, Flannery, Teukolsky, y Vetterling (1989, Numerical Recipes: FORTRAN ecuación). Para un vector de serie temporal V que contiene $n=2^m$ muestras, el vector F de FFT contiene $j=1+2^{m-1}$ elementos, ecuación (VI-1):

$$F_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} V_k e^{2\pi(j/n)ki} \quad (\text{VI-1})$$

La amplitud de F es independiente del período y rango de muestreo. Una onda sinusoidal pura con amplitud 1,0, tal como $f_i = \text{Seno}\left(2\pi \frac{t}{T}\right)$, tendrá una amplitud de FFT resultante de 0.5 a la frecuencia $1/T$.

- **Histograma**

El histograma se muestra como una función de densidad de probabilidad o función de densidad acumulativa para los datos de velocidad de ADV:

- **p.d.f. Formato de histograma**

La opción p.d.f. de formato del histograma produce una gráfica de función de densidad de probabilidad. Cada barra indica la fracción relativa de los valores de datos que caen dentro de ese bloque.

- **c.d.f. Formato de histograma**

La opción c.d.f. de formato del histograma produce una gráfica de función de densidad acumulativa. Esta gráfica se construye por la suma el área bajo la curva p.d.f. de izquierda a derecha y dibujando la suma a cada nivel. La escala vertical permitirá variar de 0 a 1. Cada punto en la gráfica c.d.f. indica la fracción de valores de datos en la muestra que es inferior al nivel indicado.

- **Previsualización del resumen de la pantalla de estadísticas**

Esta pantalla proporciona una vista previa del resumen de estadísticas que se obtendrá al procesar el archivo de ADV actual. El resumen de datos es generado para ambas condiciones filtrado y desfiltrado. Los resultados pueden repasarse desplazando la rejilla usando la barra de desplazamiento situada en la parte inferior y el lado derecho.

IV.4.8.4 Cálculo y significado de las estadísticas de salida de WinADV.

A continuación se explica brevemente el significado de los parámetros de salida:

- **Archivo.**
Es el nombre del archivo en que están almacenados los datos obtenidos con el programa de adquisición de datos en tiempo real, con el que trabaja WinADV.
- **Rango de muestreo (Hz).**
Indica el rango de muestreo empleado en la adquisición de datos. Señala el número de datos tomados en cada segundo del muestreo.
- **Rango de velocidad.**
Muestra la velocidad de muestreo máxima con la que se configuró el sistema ADV para realizar las mediciones.
- **Escala de velocidades.**
Señala los factores de escala en los datos de velocidades introducidos para que se ajusten a un modelo determinado, obteniendo el cálculo del factor de escala de velocidades de Froude. Para los modelos hidráulicos a escala de Froude, el factor de la velocidad a escala es igual a la raíz cuadrada del factor de la duración a escala. En este estudio no se empleó el cambio de escala.
- **Sistema de coordenadas de las medidas de velocidad.**
Indica cual fue el sistema de coordenadas que se empleo para la toma de datos.
- **Sonda.**
Marca el número de la sonda con la que se realizaron las mediciones de velocidades.
- **Distancia al límite.**
Es la distancia, medida en centímetros, de separación entre el volumen de muestreo y el límite existente delante, si es que existe.
- **Ventana de muestreo.**
Indica las muestras que han sido tenido en cuenta a la hora de analizar los datos.
- **Opciones de transformación.**
Señala las opciones que se han empleado para cambiar el sistema de coordenadas de los datos de velocidades en el programa de postprocesado cuando se trabaja con sondas móviles. En este estudio no han sido empleadas ya que se trabajó con sondas fijas.
- **Intervalo de tiempo.**
Muestra el tiempo transcurrido desde que comenzó la adquisición de datos hasta que se producen tanto el primer muestreo completo como el último.
- **Intervalo de muestreo.**
Muestra las muestras que han sido tomadas desde el inicio hasta el final de la toma de datos.

- **N° de muestreos.**

Señala el número de muestreos que se han realizado durante el tiempo de adquisición de datos.

- **N° de muestreos buenos.**

Informa la cantidad de muestreos que son válidos tras ser filtrados.

- **% de muestreos buenos.**

Indica el porcentaje de datos de muestreos que son aceptables tras filtrarlos respecto el total de datos tomados.

- **Filtros.**

Señala los filtros que se han empleado para realizar el postprocesamiento de los datos muestreados.

- **Unidades de WinADV.**

Indica el sistema de unidades con que ha operado el programa WinADV para realizar los cálculos.

- **Velocidades medias.**

Señala el promedio de las velocidades medidas en los tres ejes de coordenadas que se ha calculado en los archivos de extensión .Vu y .Vf, para datos sin filtrar y filtrados respectivamente. Las velocidades medias son corregidas con la velocidad de sonda especificada en la tabla de opciones de transformación.

- **Parámetros de turbulencia.**

Se calculan los siguientes parámetros de turbulencia:

RMS de turbulencia: $RMS[Vx']$, $RMS[Vy']$, y $RMS[Vz']$ - RMS es la raíz cuadrática media de las fluctuaciones de velocidad turbulentas (la raíz cuadrada del promedio de las desviaciones de la velocidad media). El RMS de turbulencia es igual a la desviación estándar de las muestras. WinADV calcula la desviación estándar del muestreo. Por ejemplo, el RMS turbulento para la componente de velocidad x es:

$$RMS[Vx'] = \sqrt{(Vx')^2} = \sqrt{\frac{\sum Vx^2 - (\sum Vx)^2 / n}{n-1}} \quad (VI-2)$$

La raíz cuadrática media de las fluctuaciones de la velocidad turbulenta sobre la velocidad media es calculada para usarse en determinas intensidades de turbulencia y niveles de energía cinética turbulenta.

Covarianza: $Cov-XY$, $Cov-XZ$, $Cov-YZ$ - La covarianza es una medida de la correlación entre dos variables. Se emplea en el análisis de las tensiones de Reynolds. La covarianza entre las componentes de la velocidad X e Y puede expresarse como:

$$Cov - XY = Vx'Vy' = \frac{\sum VxVy}{n-1} - \frac{\sum Vx \sum Vy}{n(n-1)} \quad (VI-3)$$

WinADV calcula la covarianza del muestreo, por lo tanto existen $n-1$ términos en el denominador.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

▪ **Parámetros de magnitud de velocidad.**

Dos tipos de la magnitud de velocidad son obtenidos de los archivos del resumen de salida. La columna denominada *Mag V-Avg* muestra la magnitud del resultado de los tres promedios de las componentes de velocidad, mientras que la columna designada como *Avg Vmag* comunica la media de los valores de magnitud de velocidad individuales para la serie temporal. Similarmente, se informa de dos valores de velocidad *RMS* diferentes. La columna denominada $|RMS[V]|$ es la magnitud de la resultante obtenida de los valores individuales de *RMS* para cada componente, mientras que la columna rotulada como $RMS[Vmag]$ es el valor de la raíz cuadrática media de la serie temporal de los valores individuales de la magnitud de velocidad.

▪ **Media de correlación, relación de señal de ruido, amplitud de la señal.**

La correlación, la relación de señal de ruido y la amplitud de la señal son registradas en el archivo de ADV para cada brazo receptor de la sonda. WinADV sólo muestra e informa de la media de la amplitud de la señal de los tres receptores acústicos. La media o el valor mínimo de los tres receptores para la correlación y la relación de señal de ruido pueden graficarse y/o usarse para filtrar. Las medias de los tres receptores son registradas en los archivos de extensión .SUM, .VF, y .VU.

▪ **Sesgo**

Tercer momento estadístico, indicador de distribuciones no simétricas. Un sesgo de cero indica una distribución simétrica respecto la media; un sesgo positivo indica una distribución con un brazo asimétrico extendido hacia valores más positivos; un sesgo negativo indica una distribución con un brazo asimétrico extendido hacia valores más negativos.

$$Skewness_x = \left[\frac{n}{(n-1)(n-2)s^3} \right] \left(\sum Vx^3 - \frac{3}{n} \sum Vx \sum Vx^2 + \frac{2}{n^2} (\sum Vx)^3 \right) \quad (VI-4)$$

donde s es la desviación estándar.

▪ **Curtosis**

La curtosis es el cuarto momento estadístico que estudia la mayor o menor concentración de frecuencia alrededor de la media. Caracteriza la angulosidad o allanamiento relativo de una distribución comparada con la distribución normal. Una curtosis positiva indica una distribución relativamente puntiaguda (leptocúrtica), mientras que una curtosis negativa indica una distribución relativamente achatada (platicúrtica).

$$Kurtosis_x = K_1 \left(\sum Vx^4 - \frac{4}{n} \sum Vx \sum Vx^3 + \frac{6}{n^2} (\sum Vx)^2 \sum Vx^2 - \frac{3}{n^3} (\sum Vx)^4 \right) - K_2 \quad (VI-5)$$

donde:

$$K_1 = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)s^4}; \quad K_2 = \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$$

▪ **Intervalo de confianza del 95 %.**

Es el intervalo dentro del cual se encuentra el verdadero valor de la medida que estamos analizando (que nunca es conocida exactamente) con un grado prefijado de seguridad. Un intervalo de confianza del 95 %, indica que dentro de este intervalo se encontrará el verdadero valor de la medición de velocidad en el 95% de los casos.

- **Datos obtenidos del sensor brújula/inclinación.**

Los datos obtenidos del sensor brújula/inclinación opcional aparecen en las columnas de Instalación, Grado de inclinación, Ondulamiento (Heading, Pitch y Roll). Al no disponer de este sensor, los datos correspondientes al mismo aparecieron con valor cero.

- **Valores medios de los sensores externos.**

Las columnas encabezadas por Presión, Temperatura, ExtADCh1, ExtADCh3 y ParosPresión hacen referencia a la media de las mediciones realizadas en los sensores externos utilizados. Al no disponer de sensores externos, la salida de estos datos es cero.

- **Comentarios.**

Muestra las anotaciones que se realizaron durante la recopilación de datos para identificar el muestreo realizado.

V APORTACIONES AL LABORATORIO

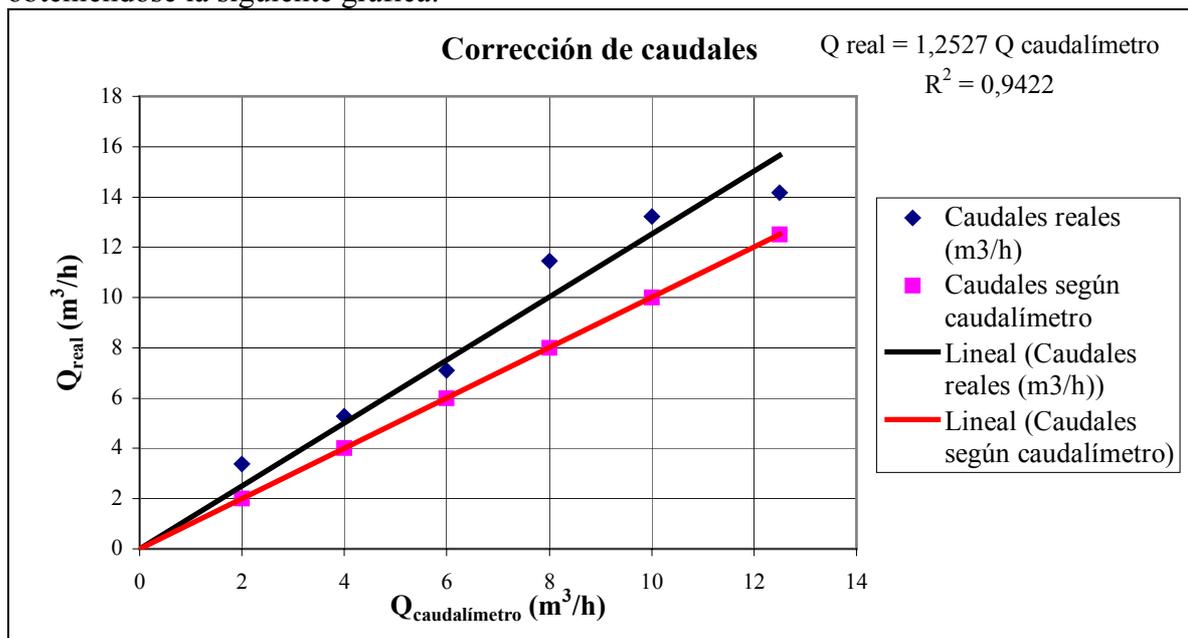
V.1 Corrección del caudalímetro.

A partir de proyectos previos realizados en el canal de estudio se conocía la existencia de un error en el muestreo del caudalímetro analógico del que dispone el canal.

Por este motivo, se realizó un aforo volumétrico a distintos caudales para obtener un gráfico $Q_{\text{real}} - Q_{\text{caudalímetro}}$ que despejara todas las dudas respecto al caudal realmente trasegado por la bomba.

La prueba consistió en el llenado de un recipiente de 22 litros, tomando el tiempo de la operación, para diversos caudales marcados con el caudalímetro. De esta forma, se calculó, a partir del volumen de agua recogido en un determinado intervalo de tiempo, el caudal realmente trasegado en cada momento. Para cada caudal se realizaron tres mediciones, obteniéndose la media de las tres.

Estos caudales fueron representados frente a los señalados por el caudalímetro obteniéndose la siguiente gráfica:



Recta de regresión del aforo volumétrico.

A partir de la representación se obtuvo un ajuste por regresión lineal entre los valores, obteniéndose como resultado:

$$Q_{\text{real}} = F_c \cdot Q_{\text{caudalímetro}}$$

Siendo F_c el factor de corrección de valor igual a 1,2527.

En la realización de este estudio se emplearon caudales de 12, 10 y 8 m³/h, medidos en el caudalímetro, para la obtención de los distintos tipos de resaltos muestreados. El caudal con el que realmente se obtuvieron los resaltos fue el siguiente:

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Q _{caudalímetro} (m ³ /h)	Q _{real} (m ³ /h)	Q _{real} (l/seg)
12	15,03	4,18
10	12,53	3,48
8	10,02	2,78

V.2 Construcción del soporte para la sonda ADV.

Una de las grandes dificultades al inicio de este proyecto era la colocación de la sonda ADV. Los requisitos que se exigían eran los siguientes:

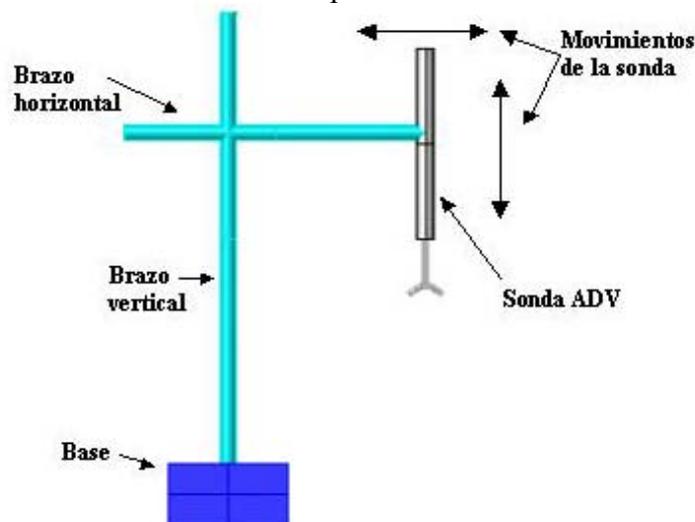
- Tanto el transmisor como los receptores acústicos de la sonda debe estar sumergidos para realizar muestreos.
- La sonda debe de estar sujeta de forma segura, evitando la caída accidental de la misma.
- Debe estar fija durante largos periodos de muestreo.
- Debe poder moverse con facilidad tanto en la vertical como en el plano horizontal.
- Debe estar completamente vertical para evitar errores en las mediciones.

Teniendo en cuenta todos estos condicionantes se ideó un soporte que permitiese facilidad en el movimiento del aparato y que fuera sencillo de montar y desmontar para guardar la sonda en su embalaje al finalizar cada jornada.

El soporte consta de:

- Una base suficientemente lastrada, para impedir el vuelco cuando la sonda está montada.
- Un brazo vertical de suficiente altura, para realizar mediciones todos los calados posibles del canal.
- Un brazo horizontal terminado en una abrazadera, donde se sitúa la sonda.
- En la intercepción de ambos brazos, existe un mecanismo sencillo de tornillos de presión para permitir el movimiento de los brazos en sentido horizontal y vertical y, consecuentemente, el de la sonda, de la forma deseada.

La siguiente figura muestra un boceto del soporte:



En las siguientes fotografías se muestran los detalles señalados del soporte.



Soporte para la sonda ADV.

La construcción del soporte fue realizada por el SAIT de la UPCT.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

VI TRABAJO EXPERIMENTAL

Todos los muestreos de datos de este estudio se realizaron en resaltos hidráulicos formados en solera horizontal. La longitud de los mismos se consideró entre el calado contraído y el punto aguas abajo en que se observó que el perfil del flujo no seguía ascendiendo, disipándose los remolinos visibles (para los resaltos sumergidos se mantuvo la longitud calculada en los resaltos estables).

Previamente a la graficación de los perfiles de velocidad de los distintos resaltos, se probaron distintos valores de corte para los filtros disponibles en el software de postprocesado, apreciándose que los resultados mejoraban sensiblemente con el nivel de SRN, por lo que en principio se adoptó un nivel de corte del 20 % de SRN, con el que, a priori, se filtraron los posibles datos erróneos. Se comprobó que, tras filtrar los datos con este nivel de señal de ruido, se eliminaba gran cantidad de datos, consiguiendo únicamente variaciones muy pequeñas en las mediciones más conflictivas en principio (mediciones con un elevado número de burbujas), por lo que se adoptó finalmente un valor de filtrado por correlación representativo del 5 %.

Las gráficas comparativas entre los distintos perfiles obtenidos en las campañas de muestreo se encuentran en el Anejo 2.

VI.1 Resaltos aguas abajo de una compuerta

VI.1.1 Resaltos cuya profundidad aguas abajo y_2' es igual a la profundidad y_2 secuencia a y_1 .

Se realizaron mediciones de los perfiles de velocidad para caudales de 2,78, 3,48 y 4,18 l/seg, con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, durante 5 minutos, obteniéndose para cada punto alrededor de 3000 datos, considerando en principio ser suficientes para obtener mediciones precisas. Para el caudal de 4,18 l/seg, se repitieron las mediciones con una frecuencia de muestreo de 25 Hz durante 5 minutos, midiéndose alrededor de 7500 datos por punto muestreado, y con una frecuencia de 10 Hz durante 10 minutos, por lo que para cada punto se registraron alrededor de 6000 datos, realizándose una comparación entre los distintos resultados obtenidos. Las mediciones se realizaron a diversos calados de la parte central y final del resalto y a 30 cm aguas abajo del final del mismo. No se pudieron realizar mediciones de velocidades en el plano del calado contraído por ser un calado insuficiente (el equipo mide a 5 cm del final de la sonda y necesita estar sumergido para registrar las velocidades).

VI.1.1.1 Caudal de 4,18 l/seg

Para el caudal de 4,18 l/seg se realizaron mediciones de velocidades en la parte central y final del resalto y a una distancia de 30 cm aguas abajo del mismo para comprobar que el flujo vuelve a condiciones de flujo gradualmente variado.

Las principales características del resalto ensayado son las siguientes:

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Se empleó una abertura de compuerta $S= 4,35$ cm para originar un resalto estable al pie de la misma. El número de Froude de la sección de calado contraído, inicio del resalto, es $F_1= 3,34$, por lo que se produjo un resalto oscilante. El calado contraído medido fue $y_1= 2,88$ cm, con un error de alrededor del 7% respecto al teórico, calculado con la abertura de compuerta y el coeficiente de contracción. El calado seciente medido fue $y_2= 10,54$ cm, divergiendo un 12 % del teórico calculado. La longitud del resalto considerada fue de 44 cm, que diverge alrededor de un 3% de la teórica calculada con la ecuación del U.S.B.R. ($Lr = 45,19$ cm). La energía específica de aguas arriba de la compuerta es de 18,25 cm, siendo en el calado contraído $E_1= 18,25$ cm y al final del resalto $E_2= 11,69$ cm, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E= 6,56$ cm, con una eficiencia alrededor del 63 %. Se obtiene un valor $\Delta E/ E_1= 0,36$, muy similar al valor obtenido por el USBR en la figura IV-10.

- Muestreo a 10 Hz durante 5 minutos.

El muestreo se realizó con mediciones en cada punto de 5 minutos a 10 Hz de frecuencia de muestreo, por lo que para cada punto se obtuvieron alrededor de 3000 muestras. Una vez filtrados los datos, en el que se desprecian los datos con niveles de correlación menores al 5% y valores de relación de señal de ruido inferiores al 20 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 2,99 cm de un total de 8,22 cm (puesto que la sonda mide a 5 cm de su extremo, debiendo estar sumergido), obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 55,76 cm/seg, siendo inferior a la velocidad media teórica de la sección completa de 60,84 cm/seg. La velocidad máxima muestreada fue de 98,03 cm/seg para un calado de 0,79 cm. En la parte superficial, el flujo se moverá hacia aguas arriba, como consecuencia de la fuerte turbulencia del resalto.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 5,53 cm de un total de 10,44 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 56,28 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 47,45 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, la velocidad se verá reducida. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 2,5 cm, siendo de 71,12 cm/seg.

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, se muestreó con metodología ADV hasta un calado de 5,49 de un total de 10,86 cm. La velocidad máxima registrada fue de 53,01 cm/seg a 4,45 cm de la solera del canal. La velocidad media del muestreo fue de 50,84 cm/seg, superior a la teórica para dicho plano de 46,05 cm/seg, por lo que en la parte superior, la velocidad decrecerá.

En la Figura VII-1 se muestran los tres perfiles de velocidad calculados, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta la extrapolación de la parte restante del perfil.

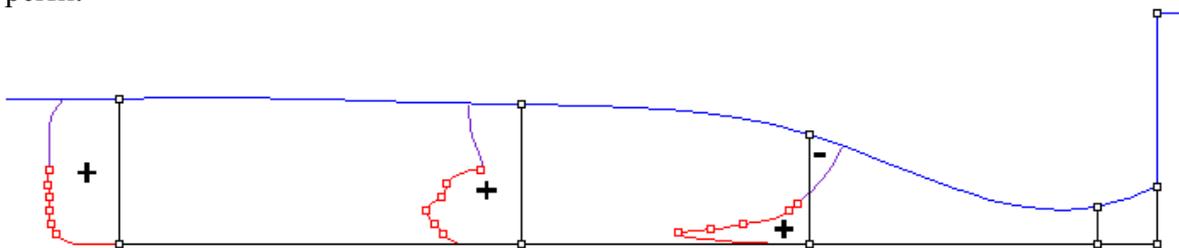


Figura VII-1. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, una vez filtrados, para $Q=4,18$ l/seg.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Respecto a las velocidades verticales, a partir de los muestreos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que en la parte más cercana a la solera es ascendente, cambiando después a sentido descendente de la velocidad vertical y nuevamente a ascendente. Esto es debido a la fuerte turbulencia que existe dentro de los resaltos.

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente, debido a la turbulencia creada en el resalto, que produce una recirculación de parte del agua hacia aguas arriba del canal.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado, pero de forma menos acusada que en el caso anterior.

En la Figura VII-2 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.

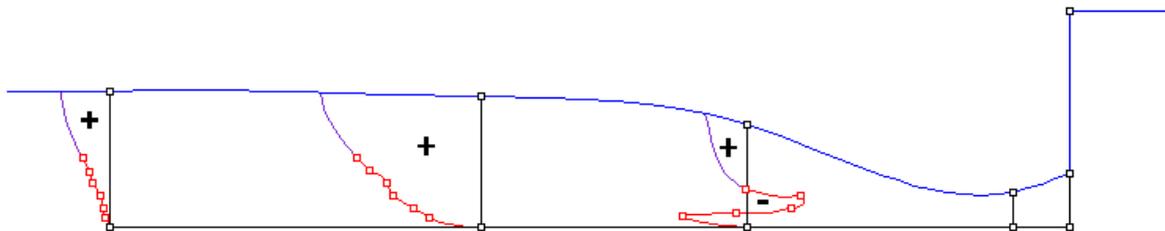


Figura VII-2. Perfiles de velocidad verticales del flujo, una vez filtrados.

En la tabla VII-1 se puede ver la comparación entre los distintos parámetros obtenidos con los teóricos:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0	10,86			E_1 (cm)	18,25	20,70	11,85
V_0		28,02		Y_2 (cm)	10,54	11,94	11,75
$V_0^2/2g$		0,40		V_2 (cm/seg)	47,45	41,87	13,31
E_0		18,25		$V_2^2/2g$ (cm)	1,15	0,89	0,28
S	4,35			E_2 (cm)	11,69	12,84	8,95
Y_1	2,88	2,66	7,71	Lr (cm)	44	45,19	2,6
V_1	173,64	188,15	7,71	ΔE	6,56		
$V_1^2/2g$	15,37	18,04	14,83	$\Delta E/E_1$	0,36		

Tabla VII-1

▪ Datos sin filtrar

Para estas mismas mediciones, los datos sin filtrar previamente revelan los siguientes resultados para la velocidad del flujo:

En la mitad del resalto, se obtuvo una velocidad media de las mediciones de 55,91 cm/seg, muy próxima de la velocidad filtrada (55,76 cm/seg), siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 60,84 cm/seg. Debido a la turbulencia generada, en la parte superior del perfil el flujo se mueve hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

velocidad máxima muestreada fue de 96,83 cm/seg, similar a la velocidad ya filtrada (98,03 cm/seg), produciéndose nuevamente para un calado de 0,79 cm.

En el final del resalto, se midió una velocidad media muestreada de 54,06 cm/seg ligeramente inferior a la filtrada, de 56,28 cm/seg, siendo la velocidad media de dicha sección de 47,45 cm/seg. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 2,5 cm, siendo en este caso de 70,81 cm/seg (menor de los 71,12 cm/seg anteriores).

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, la velocidad máxima registrada fue de 53,05 cm/seg, similar a la filtrada, de 53,01 cm/seg, situada también a 4,45 cm de la solera del canal. La velocidad media del muestreo fue en este caso de 50,84 cm/seg, igual a la que se obtuvo con el filtrado de datos.

Con estos resultados se puede deducir que la velocidad del flujo, tras realizar un filtrado de los datos respecto los niveles de correlación y relación de señal de ruido, no se ve muy modificada, aunque mejora la precisión de los resultados. Por tanto, en la descripción de los siguientes perfiles sólo se considerarán los datos una vez filtrados en idénticas condiciones.

En la Figura VII-3 se muestran los tres perfiles de velocidad calculados, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se extrapolan los datos desconocidos del perfil.

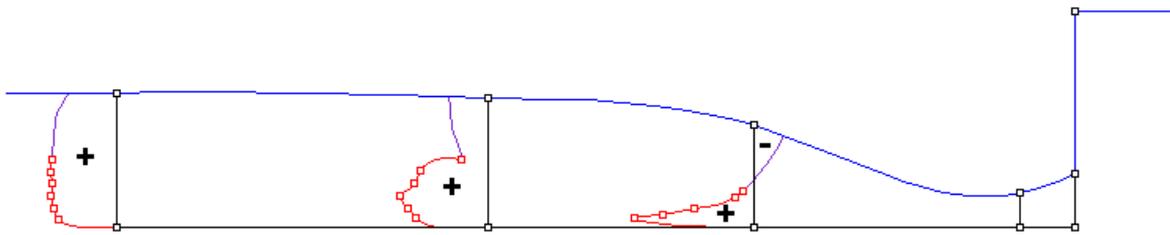


Figura VII-3. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, con datos sin filtrar.

Respecto a las velocidades verticales sin filtrar, a partir de los muestreos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En la mitad del resalto se observa una distribución de velocidades verticales que en la parte más cercana a la solera es ascendente, cambiando después a sentido descendente y volviendo nuevamente a ascendente. En la comparación el mismo perfil, realizado con los datos filtrados, se observa que en este caso aumentan ligeramente los máximos positivos y negativos, manteniendo la misma forma que en el caso anterior.

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente. La principal diferencia con el mismo perfil, una vez que los datos han sido filtrados, está en que en el último punto muestreado disminuye ligeramente la velocidad ascendente, en vez de aumentar como en el caso del realizado con los datos filtrados.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado de forma muy similar a la que se obtiene con los datos filtrados.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la Figura VII-4 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.



Figura VII-4. Perfiles de velocidad verticales del flujo, sin filtrar los datos.

- Frecuencia de muestreo a 25 Hz.

Se realizó nuevamente la medición de los tres perfiles de velocidades, para el caudal de 4,18 l/seg, manteniendo las mismas condiciones del resalto, con el fin de comparar los resultados obtenidos utilizando una frecuencia de muestreo superior.

El muestreo se realizó con mediciones en cada punto de 5 minutos a 25 Hz de frecuencia de muestreo, por lo que para cada punto se obtuvieron alrededor de 7500 datos. Una vez filtrados los datos, en el que se desprecian los datos con niveles de correlación menores al 5% y valores de relación de señal de ruido inferiores al 20 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la mitad del resalto, se midió hasta un calado de 2,42 cm de un total de 8,22 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 57,07 cm/seg, ligeramente superior a los 55,76 cm/seg registrados para el primer caso expuesto, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 60,84 cm/seg. La velocidad máxima muestreada fue de 86,37 cm/seg para un calado de 0,74 cm/seg, también inferiores a los 98,03 cm/seg para el calado de 0,79 cm del caso anterior.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 5,44 cm de un total de 10,54 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 57,24 cm/seg, ligeramente superior a los 56,28 cm/seg obtenidos a 10 Hz. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 2,46 cm, siendo de 67,13 cm/seg, inferior a la obtenida con la frecuencia de muestreo de 10 Hz, de 71,12 cm/seg para el calado de 2,5 cm.

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, se muestreó hasta un calado de 5,48 de un total de 10,86 cm. La velocidad máxima registrada fue de 53,42 a 4,48 cm de la solera, muy similar a la obtenida en el caso anterior de 53,01 cm/seg a 4,45 cm de la solera del canal. La velocidad media del muestreo fue de 50,28 cm/seg, ligeramente inferior a la obtenida a 10 Hz (50,84 cm/seg).

Las diferencias entre los resultados obtenidos a frecuencias de muestreo de 10 y 25 Hz pueden tener su raíz, en la enorme dificultad que conlleva muestrear exactamente en los mismos puntos. Se trata de perfiles de velocidad que muestran grandes variaciones en muy poco calado, por lo que con diferencias inferiores al milímetro los perfiles quedan ligeramente distorsionados, lo que dificulta la comparación.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la Figura VII-5 se muestran los tres perfiles de velocidad calculados a frecuencia de 25 Hz, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se marca la extrapolación de la parte restante del perfil.

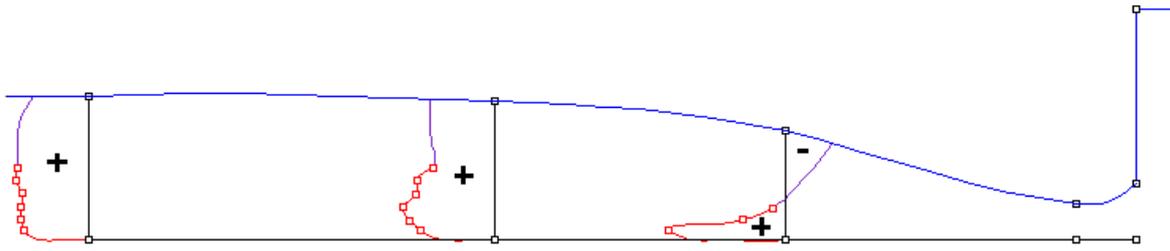


Figura VII-5. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, una vez filtrados, registrados a 25 Hz.

Respecto a las velocidades verticales, a partir de los muestreos a una frecuencia de muestreo de 25 Hz, se obtuvo:

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que en la parte más cercana a la solera tiene un pequeño tramo ascendente, cambiando rápidamente al sentido descendente de la velocidad vertical. Este perfil continuará presumiblemente con registros de velocidad ascendentes. La forma obtenida se aproxima a la que se muestreó en la Figura VII-2.

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente, de forma muy similar a la forma en que se produce este perfil en la Figura VII-2.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado, de forma muy similar al caso anterior, salvo que en la parte inferior el aumento se produce de una forma más paulatina.

En la Figura VII-6 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados a una frecuencia de muestreo de 25 Hz, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.

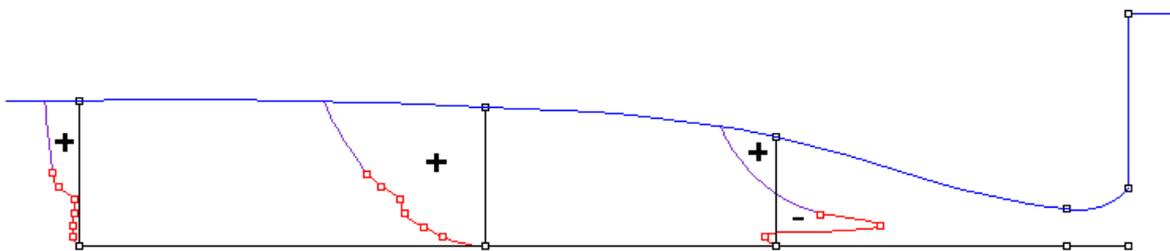


Figura VII-6. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para la frecuencia de muestreo de 25 Hz.

- Tiempo de muestreo de 10 minutos.

Se volvieron a muestrear los tres perfiles de velocidades, para el caudal de 4,18 l/seg, manteniendo las mismas condiciones del resalto, con el fin de comparar los resultados obtenidos utilizando un tiempo de muestreo mayor.

El muestreo se realizó con mediciones en cada punto de 10 minutos, a una frecuencia de muestreo de 10 Hz, por lo que para cada punto se obtuvieron alrededor de 6000 datos. Una

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

vez filtrados los datos, en el que se desprecian los datos con niveles de correlación menores al 5% y valores de relación de señal de ruido inferiores al 20 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la mitad del resalto, se realizaron mediciones hasta un calado de 2,5 cm de un total de 8,22 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 60,69 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 60,84 cm/seg. La velocidad máxima muestreada fue de 104,15 cm/seg para un calado de 0,71 cm/seg.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 5,49 cm de un total de 10,54 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 59,47 cm/seg. La velocidad máxima de muestreo fue 72,41 cm/seg de para un calado de 1,47 cm.

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, se muestreó hasta un calado de 5,52 de un total de 10,86 cm. La velocidad máxima registrada fue de 50,73 a 4,53 cm de la solera, siendo la velocidad media del muestreo de 48,57 cm/seg.

Las diferencias entre los resultados obtenidos con tiempos de muestreos de 5 y 10 minutos, a frecuencias de muestreo de 10 Hz, pueden deberse, igual que en el caso anterior, a que no se muestrearon exactamente los mismos puntos, por lo que los perfiles quedan ligeramente distorsionados y se dificulta la comparación entre ambos.

En la Figura VII-7 se muestran los tres perfiles de velocidad calculados para el período de muestreo de 10 minutos, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se marca la extrapolación de la parte restante del perfil.

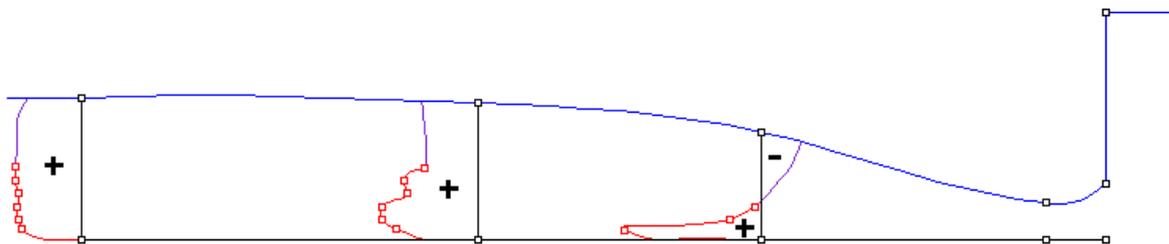


Figura VII-7. Perfiles de velocidad en dirección del flujo, una vez filtrados, para registros de 10 minutos.

Respecto a las velocidades verticales, con tiempos de 10 minutos de muestreos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que en la parte más cercana a la solera tiene un pequeño tramo ascendente, cambiando rápidamente al sentido descendente de la velocidad vertical. Respecto al mismo perfil muestreado a 5 minutos, se observa una gran similitud en la forma de los perfiles.

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente que, salvo por un punto, se produce de forma muy similar a la de este perfil en la Figura VII-2.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado, de forma muy similar al caso mencionado, salvo que en la parte inferior el aumento se produce de una forma más paulatina.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la Figura VII-8 se grafican los perfiles de velocidad vertical registrados para periodos de muestreo de 10 minutos, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.

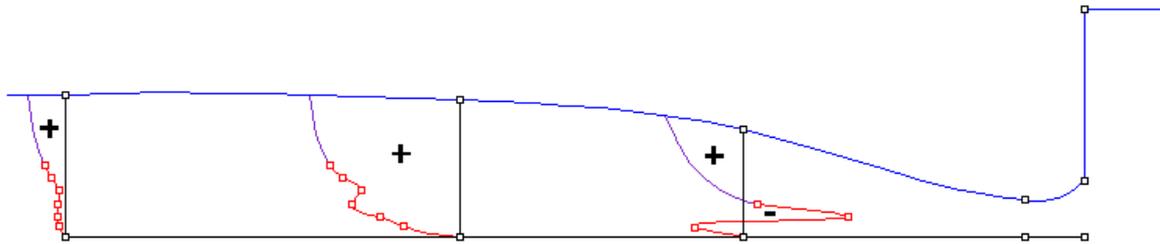


Figura VII-8. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para periodos de muestreo de 10 minutos.

▪ Resumen comparativo de los cuatro casos vistos para el caudal de 4,18 l/seg. Cuadro comparativo de los resultados para las velocidades en la dirección del flujo, en que se muestran las velocidades medias y máximas para cada perfil de velocidad cm/seg, junto con el calado en el que se produce la velocidad máxima del perfil.

Muestreo	Mitad resalto			Final resalto			A 30 cm del final		
	V media	V máxima	Calado (cm)	V media	V máxima	Calado (cm)	V media	V máxima	Calado (cm)
10 Hz, filtrado	55,76	98,03	0,79	56,28	71,12	2,5	50,84	53,01	4,45
10 Hz, sin filtrar	55,91	96,83	0,79	54,6	70,81	2,5	50,84	53,05	4,45
25 Hz, 5 minutos	57,07	86,37	0,74	57,24	67,13	2,46	50,28	53,42	4,48
10 minutos, 10 Hz	60,69	104,15	0,71	59,47	72,41	1,47	48,57	50,73	4,53

Tabla VII-2

Las conclusiones que se pueden obtener de esta tabla comparativa son las siguientes:

Para los perfiles en la mitad del resalto, las grandes diferencias que existen entre los distintos tipos de muestreos se deben, fundamentalmente, a la diferencia en los puntos de muestreo. En el caso de las velocidades, las diferencias se deben a que no se muestrearon exactamente los mismos calados y es una zona en la que el perfil varía rápidamente (puntos cerca de un pico muy agudo de máxima velocidad del flujo). Los cuatro perfiles obtienen un pico de velocidad similar para un calado alrededor de 0,8 cm de distancia de la solera, quedando la opción escogida para los muestreos entre las dos mediciones supuestamente más precisas, mientras que en la parte superior, diverge ligeramente de ambas mediciones (figura A2-1).

En el caso de los perfiles al final del resalto y a 30 centímetros del final del mismo, se observa que las diferencias entre velocidades medias y máximas son mínimas, al haber muestreado un mismo número de puntos para cada una de ellas y que las diferencias se deben en gran medida a la dificultad extrema de medir exactamente los mismos calados. En la comparación de los distintos perfiles se observa que la elección escogida de muestreo se aproxima muy bien a las dos de mayores muestreos (figuras A2-2 y A2-3).

Con estos resultados queda demostrada la validez de los datos obtenidos a partir de datos filtrados, muestreados durante 5 minutos, a una frecuencia de muestreo de 10 Hz, por lo que se empleará para el resto del estudio este tipo de muestreo.

El muestreo elegido se escogió además ya que los dos últimos métodos originan un aumento considerable del tamaño de los archivos de datos, sin un aporte muy significativo de la precisión, pues se tuvo en cuenta en su elección, las limitaciones del ordenador empleado en las mediciones y el procesado de datos.

VI.1.1.2 Caudal de 3,48 l/seg

Se realizaron mediciones de velocidades en la parte central y final del resalto y a una distancia de 30 cm aguas abajo del resalto para el caudal de 3,48 l/seg.

Las características del resalto muestreado fueron:

Se empleó una abertura de compuerta de 3,99 cm para originar un resalto estable al pie de la misma. El número de Froude de la sección de calado contraído (al inicio del resalto) es $F_1= 3,29$, por lo que se produce un resalto oscilante. El calado contraído medido fue $y_1= 2,54$ cm, con un error alrededor del 4% respecto al teórico, calculado a partir de la abertura de compuerta y el coeficiente de contracción. El calado secuente medido fue $y_2= 9,42$ cm, divergiendo un 11 % del teórico calculado. La longitud del resalto considerada fue de 38 cm, que se diferencia alrededor de un 6% de la teórica calculada con la ecuación (IV-45), de 40,59 cm. La energía específica de aguas arriba de la compuerta es de 16,30 cm, siendo $E_1= 16,26$ cm, en el calado contraído, y $E_2= 10,42$ cm, al final del resalto, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E= 5,84$ cm, con una eficiencia alrededor del 64 %. En este resalto, se obtuvo un valor $\Delta E/ E_1= 0,36$, muy similar al valor obtenido por el USBR, reflejado en la figura IV-10.

Se realizaron mediciones en cada punto de 5 minutos a 10 Hz de frecuencia de muestreo. Tras filtrar los datos, despreciando aquellos con niveles de correlación menores al 5% y valores de relación de señal de ruido inferiores al 20 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 2 cm de un total de 7,35 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 76,54 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 56,70 cm/seg, con lo que se deduce que en la parte superficial la corriente se mueve hacia aguas arriba mientras que en la parte inferior va hacia aguas abajo. La velocidad máxima muestreada fue de 102,27 cm/seg para un calado de 0,79 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 4,5 cm de un total de 9,42 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 56,32 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 44,24 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, la velocidad se reducirá ligeramente. La velocidad máxima se obtuvo para un calado de 2,49 cm, siendo de 62,67 cm/seg.

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, se pudo medir con Doppler hasta un calado de 5,43 de un total de 10 cm. La velocidad máxima registrada fue de 48,39 cm/seg a 2,46 cm de la solera del canal. La velocidad media del muestreo fue de 46,20 cm/seg, superior a la teórica para dicho plano de 41,67 cm/seg, por lo que en la parte superior, la velocidad decrecerá ligeramente.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la Figura VII-9 se grafican los perfiles de velocidad calculados, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta la extrapolación de la parte restante del perfil.

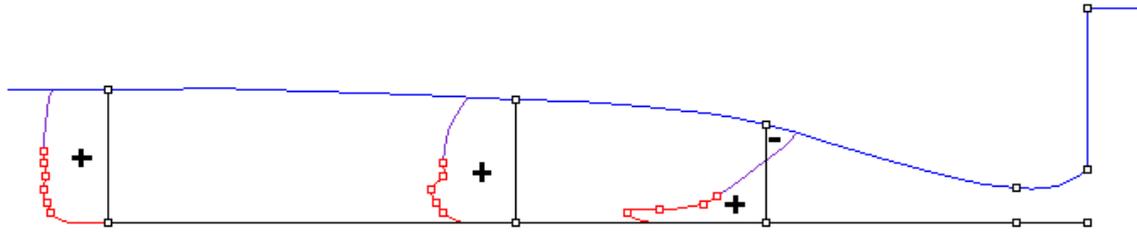


Figura VII-9. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, una vez filtrados, para $Q=3,48$ l/seg.

En la tabla VII-3 se comparan los distintos parámetros obtenidos con los teóricos:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	10			E_1 (cm)	16,26	17,33	6,18
V_0 (cm/seg)		26,13		Y_2 (cm)	9,42	10,60	11,17
$V_0^2/2g$ (cm)		0,35		V_2 (cm/seg)	44,24	39,30	12,58
E_0 (cm)		16,30		$V_2^2/2g$ (cm)	1,00	0,79	0,27
S (cm)	3,99			E_2 (cm)	10,42	11,39	8,55
Y_1 (cm)	2,54	2,44	4,02	L_r (cm)	38	40,59	6,4
V_1 (cm/seg)	164,07	170,94	4,02	ΔE	5,88		
$V_1^2/2g$ (cm)	13,72	14,89	7,88	$\Delta E/E_1$	0,36		

Tabla VII-3. Comparación de parámetros tras compuerta, para $Q= 3,48$ l/seg.

Respecto a las velocidades verticales, a partir de los muestreos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que tiene una máxima velocidad ascendente en la parte más cercana a la solera, descendiendo después y nuevamente ascendiendo. Esto es debido a la fuerte turbulencia que existe dentro de los resaltos.

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente, debido a la turbulencia creada en el resalto.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado, pero de forma menos acusada que en la parte final del resalto.

En la Figura VII-10 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.

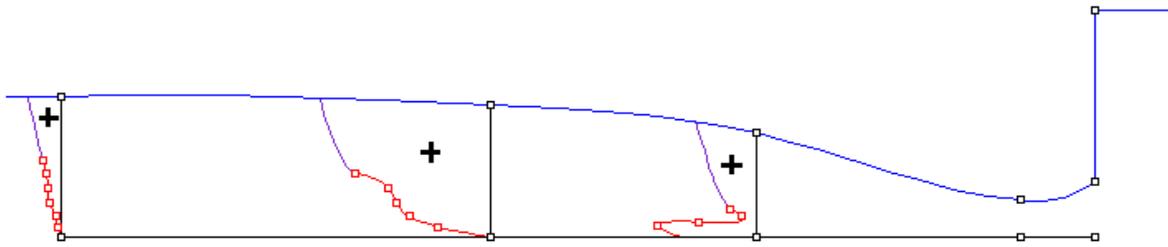


Figura VII-10. Perfiles de velocidad verticales del flujo para $Q = 3,48$ l/seg, una vez filtrados.

VI.1.1.3 Caudal de 2,78 l/seg

Se realizaron mediciones de velocidades en la parte central y final del resalto y a una distancia de 30 cm aguas abajo del resalto para el caudal de 2,78 l/seg.

Las características del resalto muestreado fueron las siguientes:

Se empleó una abertura de compuerta $S = 3,21$ cm para originar un resalto estable al pie de la misma. El número de Froude de la sección de calado contraído (al inicio del resalto) es $F_1 = 3,65$, por tanto, se produce un resalto oscilante. El calado contraído medido fue $y_1 = 2,04$ cm, con un error del 4% respecto al calculado a partir de la abertura de compuerta y el coeficiente de contracción. El calado secuente medido fue $y_2 = 8,34$ cm, divergiendo alrededor de un 13 % del teórico calculado. La longitud del resalto considerada fue de 35 cm, que se diferencia alrededor de un 6% de la teórica calculada a partir de la ecuación del USBR, de 37,17 cm. La energía específica de aguas arriba de la compuerta es de 16,03 cm, siendo $E_1 = 15,65$ cm, en el calado contraído, y $E_2 = 9,15$ cm, al final del resalto, y la pérdida de energía en el resalto $\Delta E = 6,50$ cm, con una eficiencia alrededor del 58 %. En este resalto, se obtuvo un valor $\Delta E / E_1 = 0,42$, muy similar al obtenido por el USBR.

Se realizaron mediciones en cada punto de 5 minutos a 10 Hz de frecuencia de muestreo. Tras filtrar los datos, despreciando aquellos con niveles de correlación menores al 5% y valores de relación de señal de ruido inferiores al 20 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la mitad del resalto, se realizaron dos mediciones hasta un calado de 0,9 cm de un total de 5,64 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 59,8 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 59,11 cm/seg. Se puede deducir que, debido a la turbulencia generada, en la parte superior del perfil el flujo se mueve hacia aguas arriba, dando velocidades negativas (fenómeno habitual de los saltos hidráulicos). La velocidad máxima muestreada fue de 64,64 cm/seg para un calado de 0,43 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 3,05 cm de un total de 8,34 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 62,73 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 39,97 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, la velocidad se reducirá. La velocidad máxima se obtuvo para un calado de 1,53 cm, siendo de 70,63 cm/seg.

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, se midió hasta un calado de 3,98 cm de un total de 8,82 cm. La velocidad máxima registrada fue de 39,82 cm/seg a 2,47 cm de la solera del canal. La velocidad media del muestreo fue de 37,80 cm/seg, ligeramente inferior a la teórica para dicho plano de 38,21 cm/seg.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la Figura VII-11 se grafican los perfiles de velocidad calculados, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se dibuja una posible aproximación de la parte restante del perfil.

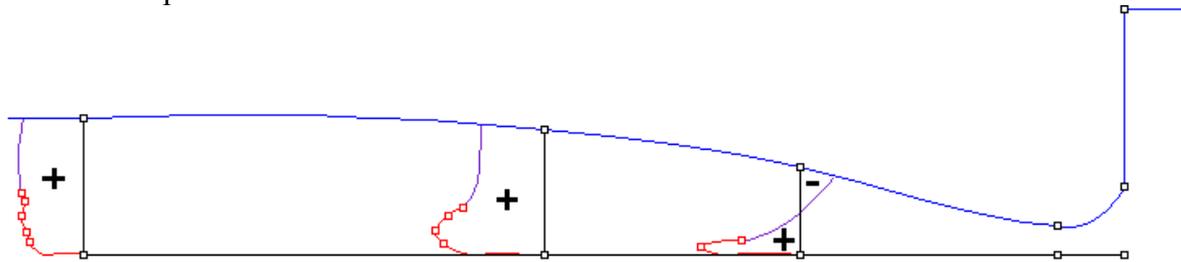


Figura VII-11. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, una vez filtrados, para $Q=2,78$ l/seg.

En la tabla VII-4 se muestra la comparación entre distintos parámetros del resalto:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	8,82			E_1 (cm)	15,65	16,69	6,21
V_0 (cm/seg)		21,10		Y_2 (cm)	8,34	9,57	12,84
$V_0^2/2g$ (cm)		0,23		V_2 (cm/seg)	39,97	34,84	14,73
E_0 (cm)		16,03		$V_2^2/2g$ (cm)	0,81	0,62	0,32
S (cm)	3,21			E_2 (cm)	9,15	10,19	10,14
Y_1 (cm)	2,04	1,96	3,86	Lr (cm)	35	37,17	5,8
V_1 (cm/seg)	163,42	169,98	3,86	ΔE	6,87		
$V_1^2/2g$ (cm)	13,61	14,73	7,57	$\Delta E/E_1$	0,44		

Tabla VII-4.

Respecto a las velocidades verticales, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que tiene una máxima velocidad ascendente en la parte más cercana a la solera, cambiando presumiblemente en la parte superior a registras velocidades descendentes.

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta rápidamente en su sentido ascendente, debido a la turbulencia creada en el resalto.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado, pero de forma menos acusada que en la parte final del resalto.

En la Figura VII-12 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.

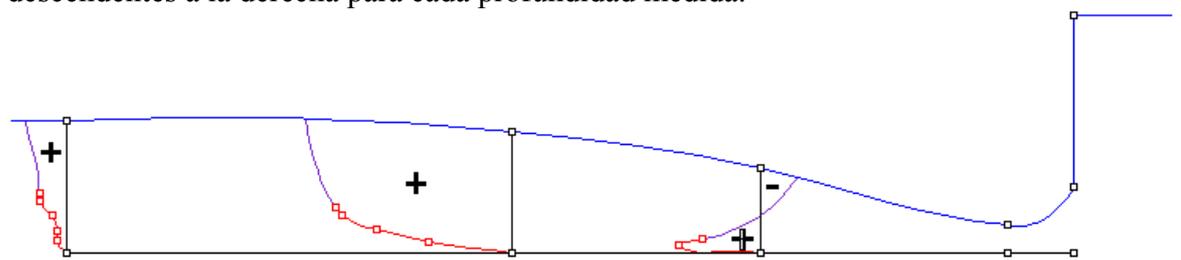


Figura VII-12. Perfiles de velocidad verticales del flujo para $Q=2,78$ l/seg, una vez filtrados.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

VI.1.2 Resaltos cuya profundidad aguas abajo y_2' es mayor a la profundidad y_2 , seciente a y_1 . Resaltos sumergidos.

Se realizaron mediciones de los perfiles de velocidad para caudales de 4,18, 3,48 y 2,78 l/seg, con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, durante 5 minutos, obteniéndose para cada punto alrededor de 3000 datos. Las mediciones se realizaron a diversos calados, de planos situados a 11 cm bajo la compuerta (plano más cercano a la compuerta en el que es posible realizar mediciones), en la parte central y final del resalto y a 30 cm aguas abajo del final del mismo. No se pudieron realizar mediciones de velocidades en el plano del calado contraído ya que la forma de la compuerta lo imposibilitaba.

VI.1.2.1 Caudal de 4,18 l/seg

Para el caudal de 4,18 l/seg, las características del resalto muestreado fueron:

Se empleó como resalto de referencia el muestreado para el mismo caudal y la misma abertura de compuerta ($S= 4,35$ cm) con que se originó el resalto estable al pie de la misma. El calado medido al inicio del resalto fue $y_3= 6,67$ cm, con un error insignificante respecto al teórico, calculado a partir del calado contraído y el número de Froude del resalto usado como referencia. El calado seciente medido fue $y_4= 11,97$ cm. La longitud del resalto considerada fue la misma que para el resalto estable a pie de compuerta. La energía específica de aguas arriba de la compuerta fue $E_0= 21,48$ cm, decayendo rápidamente en el punto inicial del resalto sumergido y, siendo al final del resalto, $E_2= 11,43$ cm, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E= 10,05$ cm, con una eficiencia alrededor del 53 %, bastante inferior que la conseguida con el resalto cuya profundidad aguas abajo y_2' es igual a la profundidad y_2 (del 70%).

El muestreo se realizó con mediciones de 5 minutos en cada punto, usando una frecuencia de muestreo de 10 Hz, por lo que para cada punto se obtuvieron alrededor de 3000 muestras. Una vez filtrados los datos, en el que se desprecian los datos con niveles de correlación menores al 5% y valores de relación de señal de ruido inferiores al 20 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

A 11 centímetros aguas abajo de la compuerta, se muestreó hasta un calado de 1,9 cm de un total de 6,71 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 87,35 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 74,53 cm/seg. Debido a la alta turbulencia que existe dentro de un salto hidráulico, existirá un momento en el que el flujo se mueva hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 146,04 cm/seg para un calado de 0,49 cm.

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 4,51 cm de un total de 9,36 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 39,17 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 53,43 cm/seg, con lo que se deduce, que en la parte superficial el flujo se mueva hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 87,76 cm/seg para un calado de 0,73 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 7,46 cm de un total de 11,95 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 50,31 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 41,85 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, la

velocidad se verá reducida. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 1,5 cm, siendo de 62,5 cm/seg. Este perfil ya se aproxima bastante a los perfiles de flujo laminar.

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, se muestreó con el ADV hasta un calado de 7,51 de un total de 12,45 cm. La velocidad máxima registrada fue de 45,28 cm/seg a 4,48 cm de la solera del canal. La velocidad media del muestreo fue de 43,13 cm/seg, superior a la teórica para dicho plano de 40,17 cm/seg, por lo que se puede considerar que se produce en este punto un perfil de velocidades laminar.

En la Figura VII-13 se muestran los perfiles de velocidad calculados, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se grafica una aproximación de la parte restante del perfil. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

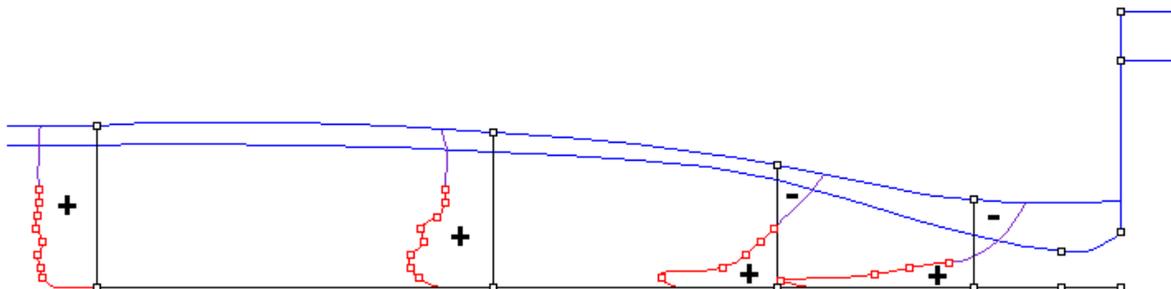


Figura VII-13. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido de $Q=4,18$ l/seg.

En la tabla VII-5 se puede ver la comparación entre los distintos parámetros obtenidos frente a los teóricos:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	21,2			E_3 (cm)	22,51	9,54	136,09
V_0 (cm/seg)		23,59		Y_4 (cm)	11,95		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,28		V_4 (cm/seg)	41,85		
E_0 (cm)		21,48		$V_4^2/2g$ (cm)	0,89		
S (cm)	4,35			E_4 (cm)	12,84		
Y_3 (cm)	6,71	6,67	0,53	L_r (cm)	44	45,19	2,6
V_3 (cm/seg)	74,53	74,92	0,53	ΔE	8,64		
$V_3^2/2g$ (cm)	2,83	2,86	1,06	$\Delta E/E_1$	0,38		

Tabla VII-5

Respecto a las velocidades verticales, se realizaron las siguientes observaciones:

A una distancia de 11 cm aguas debajo de la compuerta, se muestreó un perfil de velocidades verticales que en la parte más cercana a la solera es ascendente, cambiando rápidamente a velocidades descendentes. Esto es debido a la fuerte turbulencia que existe dentro de los resaltos.

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que en la parte más cercana a la solera es descendente, disminuyendo después la velocidad vertical descendente. En la parte superior aparecerán velocidades ascendentes.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente, debido a la turbulencia creada en el resalto, que produce una recirculación de parte del agua hacia aguas arriba del canal. Este fenómeno ya se observó en el mismo perfil del resalto de referencia.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado, pero de forma menos acusada que en el caso anterior, debido a que el comportamiento del flujo es muy próximo a un flujo gradualmente variado.

En la Figura VII-14 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

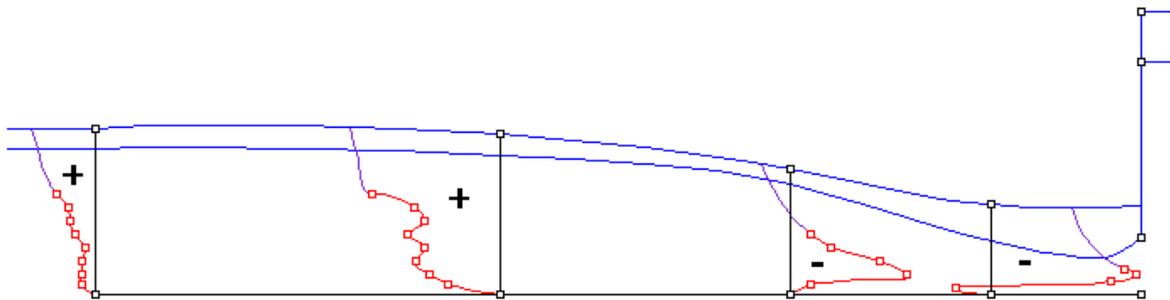


Figura VII-14. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para un resalto sumergido de $Q=4,18$ l/seg.

VI.1.2.2 Caudal de 3,48 l/seg

Para el caudal de 3,48 l/seg, las características del resalto muestreado fueron:

Se empleó como resalto de referencia el muestreado para el mismo caudal y la misma abertura de compuerta ($S= 3,99$ cm) con que se originó el resalto estable al pie de la estructura de control. El calado medido al inicio del resalto fue $y_3= 7,08$ cm, con un error del 1 % respecto al teórico, calculado a partir del calado contraído y el número de Froude del resalto de referencia. El calado secuente medido fue $y_4= 11,25$ cm. La longitud del resalto considerada fue la misma que para el resalto estable a pie de compuerta. La energía específica de aguas arriba de la compuerta que se obtuvo fue $E_0= 20,51$ cm, decayendo rápidamente en el primer punto muestreado del resalto sumergido y, siendo al final del resalto, $E_2= 10,12$ cm, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E= 10,40$ cm, con una eficiencia alrededor del 49 %, inferior a la eficiencia del 64 % que se obtuvo con el resalto estable a pie de la compuerta.

El muestreo se realizó con mediciones de 5 minutos en cada punto, usando 10 Hz como frecuencia de muestreo, por lo que para cada punto se obtuvieron alrededor de 3000 muestras. Una vez filtrados los datos, en el que se desprecian los datos con niveles de correlación menores al 5% y valores de relación de señal de ruido inferiores al 20 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

A 11 centímetros aguas abajo de la compuerta, se muestreó hasta un calado de 1,94 cm de un total de 7,08 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 126,92 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 58,86 cm/seg, con lo que se deduce que, debido a la alta turbulencia que existe dentro de un salto hidráulico, en

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

la parte superficial el flujo se mueva hacia aguas arriba, registrándose velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 157,94 cm/seg para un calado de 0,52 cm.

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 3,5 cm de un total de 8,62 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 52,82 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 48,34 cm/seg, con lo que se deduce, que en la parte superficial la corriente se mueve hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 89,76 cm/seg para un calado de 0,71 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 5,5 cm de un total de 11,25 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 50,77 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 37,04 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, la velocidad se verá reducida. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 0,73 cm, siendo de 68,01 cm/seg.

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, se muestreó hasta un calado de 7,55 de un total de 12,2 cm. La velocidad máxima registrada fue de 41,99 cm/seg a 4,44 cm de la solera del canal. La velocidad media del muestreo fue de 40,04 cm/seg, superior a la teórica para dicho plano de 34,16 cm/seg. El perfil muestreado en este punto se aproxima a un perfil de velocidades para flujo laminar.

En la Figura VII-15 se muestran los perfiles de velocidad calculados. En rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se grafica una aproximación de la parte restante del perfil. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

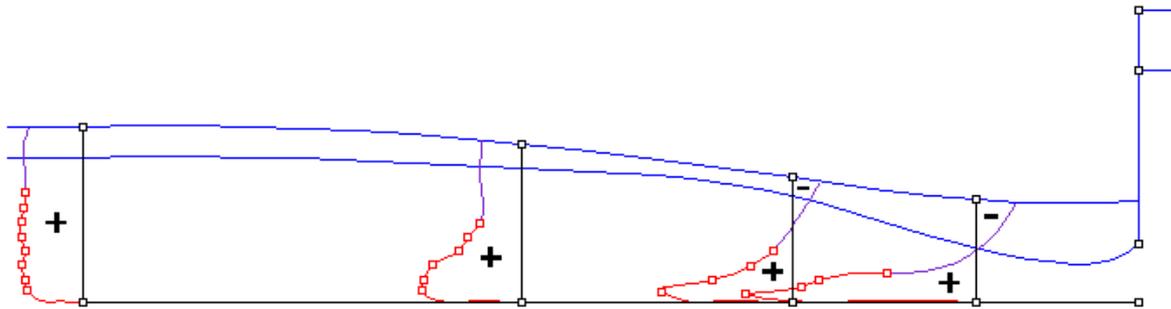


Figura VII-15. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido de $Q=3,48$ l/seg.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros del resalto medidos frente a los teóricos:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	20,3			E_3 (cm)	20,80	8,81	136,23
V_0 (cm/seg)		20,53		Y_4 (cm)	11,25		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,21		V_4 (cm/seg)	37,04		
E_0 (cm)		20,51		$V_4^2/2g$ (cm)	0,70		
S (cm)	3,99			E_4 (cm)	11,95		
Y_3 (cm)	7,08	7,00	1,19	L_r (cm)	38	40,59	6,4
V_3 (cm/seg)	58,86	59,56	1,17	ΔE	8,57		
$V_3^2/2g$ (cm)	1,77	1,81	2,33	$\Delta E/E_1$	0,41		

Tabla VII-6

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Respecto a las velocidades verticales, se realizaron las siguientes observaciones:

A una distancia de 11 cm aguas debajo de la compuerta, se muestreó un perfil de velocidades verticales que en la parte más cercana a la solera es ascendente, registrando después velocidades descendentes, debido a la alta turbulencia.

En la parte central del resalto se registró un pico de velocidades negativas en la parte cercana a la solera del canal. Presumiblemente, en la parte superior del perfil se registrarán velocidades ascendentes.

En la parte final del resalto se observa un pico de velocidades ascendentes, que guarda similitud con el registrado, para los mismos calados, en el resalto sumergido con un caudal de 4,18 l/seg.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado, pero de forma menos acusada que en el caso anterior, debido a que el flujo se comporta de modo muy similar al de un flujo gradualmente variado.

En la Figura VII-16 se grafican los perfiles de velocidad vertical muestreados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

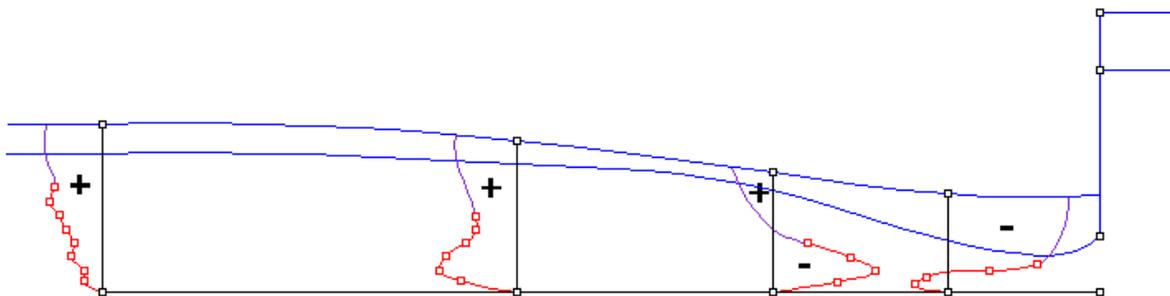


Figura VII-16. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para un resalto sumergido de $Q=3,48$ l/seg.

VI.1.3 Caudal de 2,78 l/seg

Las características del resalto muestreado para el caudal trasegado de 2,78 l/seg fueron:

Se empleó como resalto de referencia el muestreado el escrito anteriormente para el caudal de 2,78 l/seg. El calado medido al inicio del resalto fue $y_3=5,96$ cm, con un error del 5 % respecto al teórico, calculado a partir del calado contraído y el número de Froude del resalto de referencia. El calado secuente medido fue $y_4=9,65$ cm. La longitud del resalto considerada fue la misma que para el resalto estable a pie de compuerta. La energía específica aguas arriba de la compuerta fue 20,04 cm, decayendo rápidamente dentro del resalto sumergido y, siendo al final del resalto, $E_2=8,95$ cm, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E=11,09$ cm, con una eficiencia alrededor del 45 %, inferior a la eficiencia del 58 % que se obtuvo con el resalto de referencia.

Para el muestreo, se realizaron mediciones de 5 minutos en cada punto, usando frecuencia de muestreo de 10 Hz. Una vez filtrados los datos, se obtuvieron los siguientes resultados:

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

A 11 centímetros aguas abajo de la compuerta, se muestreó hasta un calado de 0,97 cm de un total de 5,96 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 143,37 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 55,94 cm/seg, con lo que se deduce que en la parte superficial de la corriente se producirá un descenso de la velocidad, llegando a aparecer velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 156,27 cm/seg para un calado de 0,48 cm.

En la mitad del resalto, se realizaron cinco mediciones repartidas a diferentes alturas hasta un calado de 2,5 cm de un total de 7,06 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 66,18 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 47,22 cm/seg. Existirá un momento en el que el flujo se mueva hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 110,72 cm/seg para un calado de 0,51 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 4,55 cm de un total de 9,65 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 51,83 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 34,55 cm/seg. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 0,76 cm, siendo de 71,9 cm/seg.

A una distancia de 30 cm del final de resalto hacia aguas abajo, se tomaron mediciones hasta un calado de 5,53 de un total de 10,78 cm. La velocidad máxima registrada fue de 36,61 cm/seg a 4,5 cm de la solera del canal. La velocidad media del muestreo fue de 33,82 cm/seg, superior a la teórica para dicho plano de 30,93 cm/seg. El perfil muestreado en este punto se aproxima a un perfil de velocidades para flujo gradualmente variado.

En la Figura VII-17 se muestran los perfiles de velocidad registrados. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto de referencia. En rojo se dibujan los perfiles registrados y en violeta se grafica una aproximación del resto del perfil.

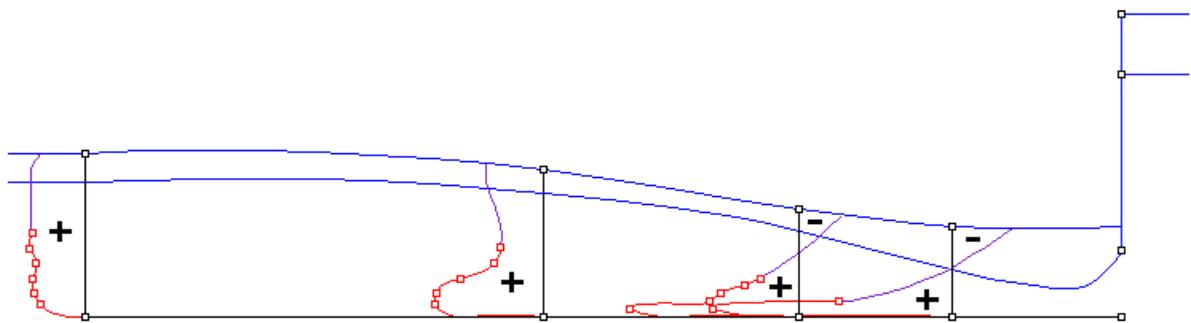


Figura VII-17. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido de $Q = 2,78$ l/seg.

Respecto a las velocidades verticales, se realizaron las siguientes anotaciones:

A una distancia de 11 cm aguas debajo de la compuerta, se muestreó el perfil de velocidades verticales, siendo, en la parte más cercana a la solera, ascendente y, registrando inmediatamente después velocidades descendentes.

En la parte central del resalto se registró un pico de velocidades negativas en la parte cercana a la solera del canal, que después, disminuye con el aumento del calado.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la parte final del resalto se observa un pico de velocidades ascendentes, que decrece y vuelve a aumentar.

A 30 cm del final del resalto, se observa que la velocidad ascendente aumenta con el calado de una forma más pausada que en el caso anterior, debido a que el flujo se comporta de modo similar al caso de un flujo gradualmente variado.

En la Figura VII-18 se grafican los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo, como en los casos anteriores, las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

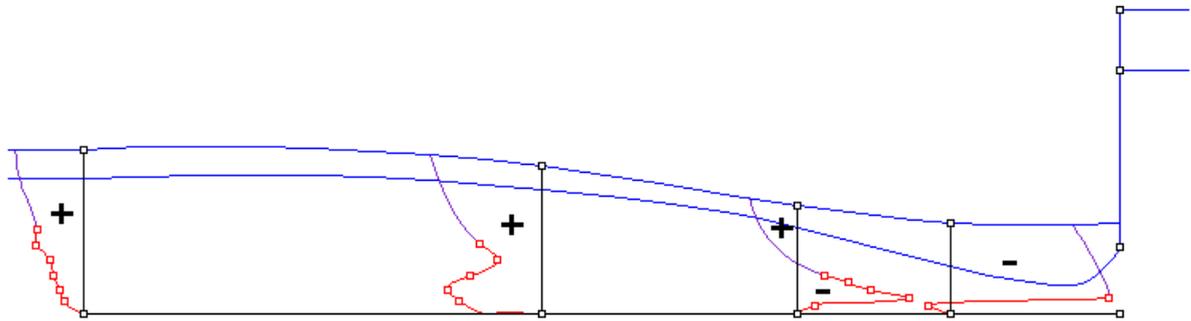


Figura VII-18. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para un resalto sumergido de $Q= 2,78$ l/seg.

En la tabla VII-7 se comparan los parámetros medidos con los teóricos para este resalto:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	19,9			E_3 (cm)	19,57	7,43	163,56
V_0 (cm/seg)		16,75		Y_4 (cm)	9,65		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,14		V_4 (cm/seg)	34,55		
E_0 (cm)		20,04		$V_4^2/2g$ (cm)	0,61		
S (cm)	3,21			E_4 (cm)	10,26		
Y_3 (cm)	5,96	5,65	5,41	Lr (cm)	35	37,17	5,8
V_3 (cm/seg)	55,94	58,96	5,13	ΔE	9,78		
$V_3^2/2g$ (cm)	1,59	1,77	10,00	$\Delta E/E_1$	0,50		

Tabla VII-7

VI.2 Resaltos obtenidos aguas abajo de un aliviadero.

Se realizaron tres tipos de campañas para medir resaltos aguas abajo de un aliviadero tipo WES, de 14,8 cm de altura hasta su coronación, que consistieron en resaltos al pie del aliviadero, resaltos con una sumergencia igual a la mitad de la altura del aliviadero y resaltos con una sumergencia igual a la altura del aliviadero.

VI.2.1 Resaltos al pie de la estructura de control.

Empleando un aliviadero WES, de 14,8 cm de altura hasta el punto de coronación, como estructura de control para crear resaltos, se realizaron mediciones de los perfiles de velocidad para caudales de 4,18, 3,48 y 2,78 l/seg, con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, durante 5 minutos, obteniéndose para cada punto alrededor de 3000 datos, considerados en principio suficientes datos para obtener mediciones precisas. Todos los datos registrados por metodología Doppler fueron pasados por un filtro para mejorar la precisión de las mediciones, en el que se despreciaron aquellos con niveles de correlación menores al 5% y valores de relación de señal de ruido inferiores al 20 %.

Las mediciones se realizaron a diversos calados de la parte central y final del resalto. No se pudieron realizar mediciones de velocidades en el plano del calado contraído ya que el calado era insuficiente (el equipo mide a 5 cm del final de la sonda y necesita estar sumergido para que registre las velocidades).

VI.2.1.1 Caudal de 4,18 l/seg

Para el caudal trasegado de 4,18 l/seg se realizaron mediciones de velocidades en la parte central y final del resalto. Las características del resalto muestreado fueron:

El número de Froude de la sección y_1 , al inicio del resalto, es $F_1 = 3,81$, por lo que se produce un resalto oscilante. El calado contraído medido fue $y_1 = 2,60$ cm, con un error de alrededor del 1 % respecto al teórico, calculado a partir de la velocidad teórica del flujo a la salida del aliviadero y el caudal trasegado. El calado secuente medido fue $y_2 = 10,93$ cm, divergiendo un 14 % del teórico calculado. La longitud del resalto considerada fue $Lr = 45,5$ cm, que diverge alrededor de un 7 % de la teórica calculada con la ecuación (IV-45). La energía específica aguas arriba del aliviadero es $E_0 = 21,58$ cm, siendo $E_1 = 21,46$ cm en el calado y_1 y al final del resalto $E_2 = 12,00$ cm, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E = 9,46$ cm, con una eficiencia alrededor del 56 %. En este resalto, se obtuvo un valor $\Delta E/E_1 = 0,44$, similar al valor obtenido por el U. S. Bureau of Reclamation, reflejado en la figura IV-10.

Una vez filtrados los datos del muestreo, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 3,52 cm de un total de 8,22 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 39,82 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 60,84 cm/seg. Debido a la alta turbulencia que existe dentro de un salto hidráulico, existirá un momento en el que el flujo se mueva hacia

aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 64,48 cm/seg para un calado de 0,81 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 5,49 cm de un total de 10,93 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 58,95 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 45,75 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, la velocidad se verá reducida. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 0,75 cm, siendo de 81,09 cm/seg.

En la Figura VII-19 se muestran los perfiles de velocidad calculados, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se representa una posible extrapolación de la parte restante del perfil.

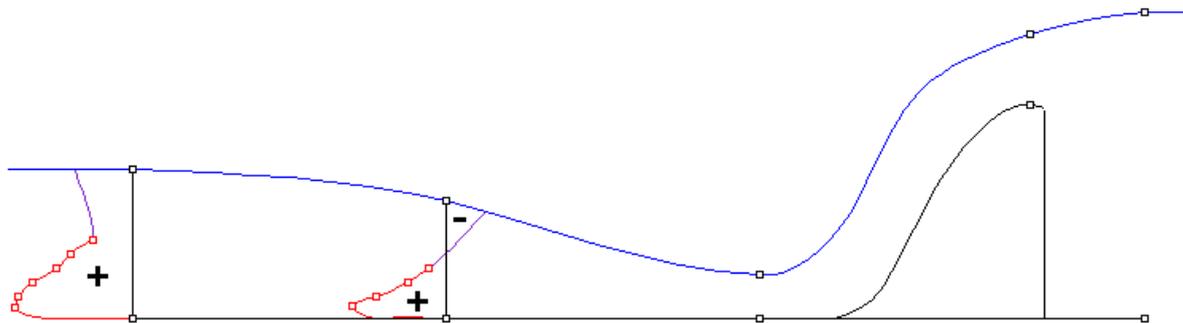


Figura VII-19. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto bajo aliviadero, con $Q=4,18$ l/seg.

En la tabla VII-8 se muestra la comparación de los parámetros del resalto:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	21,3			Y_2 (cm)	10,93	12,76	14,37
V_0 (cm/seg)		23,48		V_2 (cm/seg)	45,75	39,18	16,78
$V_0^2/2g$ (cm)		0,28		$V_2^2/2g$ (cm)	1,07	0,78	0,36
E_0 (cm)		21,58		E_2 (cm)	12,00	13,55	11,44
Y_1 (cm)	2,6	2,63	1,12	Lr (cm)	45,5	49,15	7,4
V_1 (cm/seg)	192,34	190,22	1,12	ΔE	9,58		
$V_1^2/2g$ (cm)	18,86	18,44	2,24	$\Delta E/E_1$	0,45		
E_1 (cm)	21,46	21,07	1,83				

Tabla VII-8

Respecto a las velocidades verticales, a partir de los muestreos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que asciende conforme aumenta el calado.

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente de forma más acusada que en el caso anterior, debido a la turbulencia creada en el resalto que produce una recirculación de parte del flujo hacia aguas arriba del canal.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la Figura VII-20 se muestran los dos perfiles de velocidades verticales registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical.

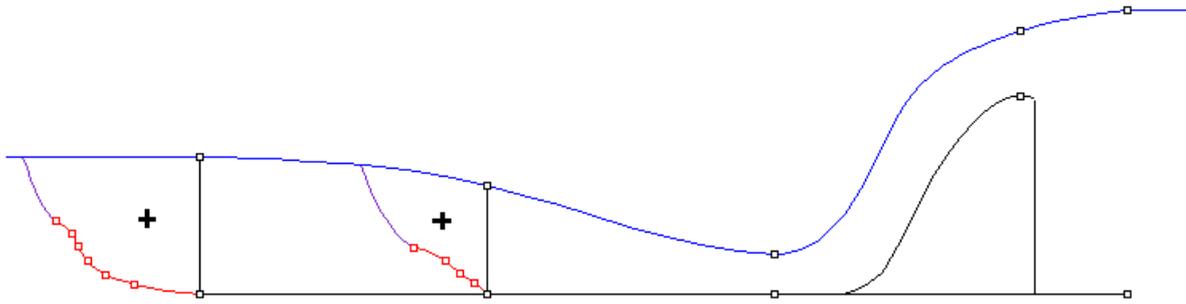


Figura VII-20. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para resalto bajo aliviadero, con $Q= 4,18$ l/seg.

VI.2.1.2 Caudal de 3,48 l/seg

Para el caudal de 3,48 l/seg se realizaron mediciones de velocidades en la parte central y final del resalto.

Las características del resalto muestreado fueron:

El número de Froude de la sección y_1 , al inicio del resalto, es $F_1= 4,16$, produciéndose un resalto oscilante. El calado contraído medido fue $y_1= 2,17$ cm, con un error del 1 % respecto al teórico, calculado a partir de la velocidad teórica del flujo a la salida del aliviadero y el caudal trasegado. El calado secuente medido fue $y_2= 9,98$ cm, divergiendo un 15 % respecto al teórico calculado. La longitud del resalto considerada fue $Lr= 39,5$ cm. La energía específica aguas arriba del aliviadero es $E_0= 21,00$ cm, siendo $E_1= 20,97$ cm en el calado y_1 , y al final del resalto es $E_2= 10,87$ cm, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E= 10,10$ cm, con una eficiencia alrededor del 52 %. Por tanto, el valor obtenido de $\Delta E/E_1$ fue igual a 0,48, similar al valor obtenido por el U. S. Bureau of Reclamation. En la tabla VII-9 se realiza una comparación entre los distintos parámetros del resalto.

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	20,8			Y_2 (cm)	9,98	11,73	14,95
V_0 (cm/seg)		20,04		V_2 (cm/seg)	41,76	35,51	17,58
$V_0^2/2g$ (cm)		0,20		$V_2^2/2g$ (cm)	0,89	0,64	0,38
E_0 (cm)		21,00		E_2 (cm)	10,87	12,38	12,19
Y_1 (cm)	2,17	2,20	1,46	Lr (cm)	39,5	46,08	14,3
V_1 (cm/seg)	192,04	189,29	1,46	ΔE	10,14		
$V_1^2/2g$ (cm)	18,80	18,26	2,93	$\Delta E/E_1$	0,48		
E_1 (cm)	20,97	20,46	2,46				

Tabla VII-9

Una vez filtrados los datos del muestreo, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 2,51 cm de un total de 7,78 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 23,17 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 53,56 cm/seg. Al estar dentro del resalto, existirá

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

un momento en el que el flujo se mueva hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 27,26 cm/seg para un calado de 0,74 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 4,51 cm de un total de 9,98 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 51,28 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 41,76 cm/seg. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 0,77 cm, siendo de 75,51 cm/seg.

En la Figura VII-21 se muestran los dos perfiles de velocidad calculados. En rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se representa una posible extrapolación de la parte restante del perfil.

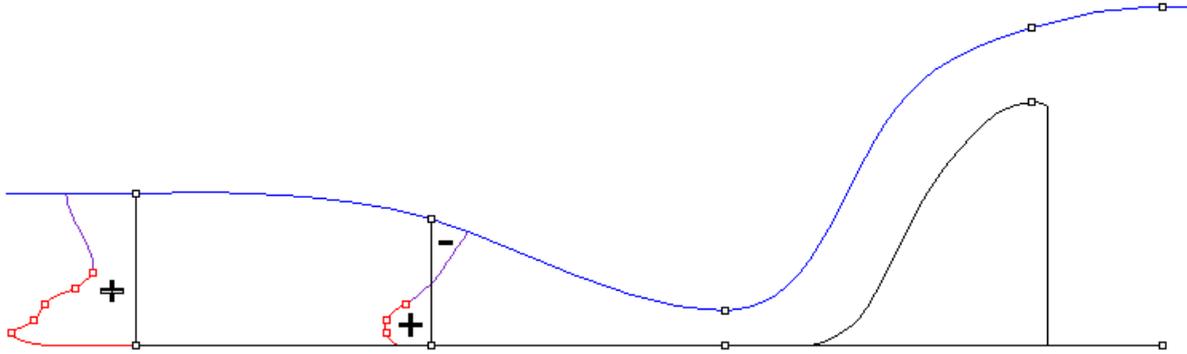


Figura VII-21. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto bajo aliviadero, con $Q = 3,48$ l/seg.

Respecto a las velocidades verticales, a partir de los muestreos se obtuvo que:

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que asciende conforme aumenta el calado.

En la parte final del resalto se observa que, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente de forma más rápida que en el caso anterior. En este perfil de velocidades, el flujo aun no ha vuelto ha desarrollarse como laminar.

En la Figura VII-22 se muestran los dos perfiles de velocidades verticales registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical.

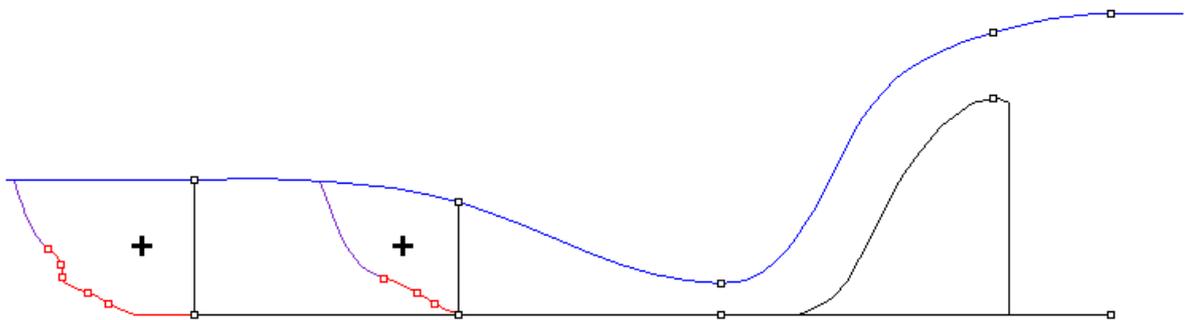


Figura VII-22. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para resalto bajo aliviadero, con $Q = 3,48$ l/seg.

VI.2.1.3 Caudal de 2,78 l/seg

Para el caudal trasegado de 2,78 l/seg se realizaron mediciones de velocidades en la parte central y final del resalto.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Las características del resalto muestreado fueron:

El número de Froude de la sección y_1 , al inicio del resalto, es $F_1= 4,52$, produciéndose un resalto estable. El calado contraído medido fue $y_1= 1,77$ cm, con un error nulo respecto al teórico, calculado a partir de la velocidad teórica del flujo a la salida del aliviadero y el caudal trasegado. El calado secuente medido fue $y_2= 9,13$ cm, divergiendo un 13 % respecto al teórico calculado. La longitud del resalto considerada fue $L_r= 35,4$ cm. La energía específica aguas arriba del aliviadero es de 20,34 cm, siendo en el calado y_1 de $E_1= 19,85$ cm y al final del resalto $E_2= 9,81$ cm, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E= 10,04$ cm, con una eficiencia alrededor del 49 %. Por tanto, se obtuvo un valor de $\Delta E/E_1= 0,51$, similar al obtenido por el USBR. En la siguiente tabla se comparan los distintos parámetros de un resalto:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	20,2			Y_2 (cm)	9,13	10,46	12,75
V_0 (cm/seg)		16,50		V_2 (cm/seg)	36,52	31,86	14,61
$V_0^2/2g$ (cm)		0,14		$V_2^2/2g$ (cm)	0,68	0,52	0,31
E_0 (cm)		20,34		E_2 (cm)	9,81	10,98	10,67
Y_1 (cm)	1,77	1,77	0,24	L_r (cm)	35,4	43,42	18,5
V_1 (cm/seg)	188,35	187,90	0,24	ΔE	10,53		
$V_1^2/2g$ (cm)	18,08	18,	0,48	$\Delta E/E_1$	0,53		
E_1 (cm)	19,85	19,77	0,42				

Tabla VII-10

Una vez filtrados los datos del muestreo, se obtuvieron los siguientes resultados:

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 2 cm de un total de 7,11 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 10,03 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 46,89 cm/seg. Dentro de un resalto existirá un momento en el que el flujo se mueva hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 20,06 cm/seg para un calado de 1,49 cm. Se debe tener en cuenta que la aireación en estas mediciones fue muy alta, lo que pudo originar datos erróneos.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 3,46 cm de un total de 9,13 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 45,08 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 36,52 cm/seg. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 0,74 cm, siendo de 62,31 cm/seg.

En la Figura VII-23 se muestran los dos perfiles de velocidad calculados. En rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se representa una posible extrapolación de la parte restante del perfil.

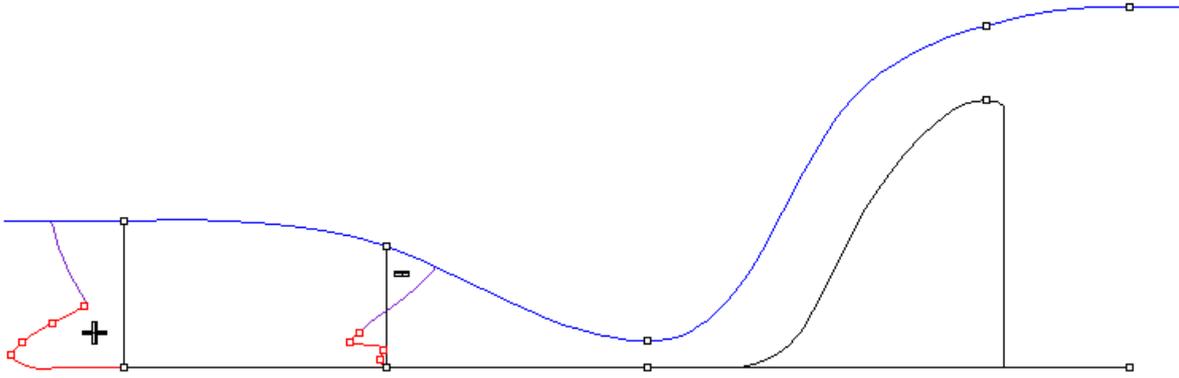


Figura VII-23. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto bajo aliviadero, con $Q=2,78$ l/seg.

Respecto a las velocidades verticales, a partir de los muestreos se obtuvo que:

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que asciende conforme aumenta el calado.

En la parte final del resalto se observa que, al igual que en el perfil anterior, conforme aumenta el calado, la velocidad vertical aumenta en su sentido ascendente, pero de forma más rápida que en el caso anterior. En este perfil de velocidades, el flujo aun no se comporta como gradualmente variado.

En la Figura VII-24 se muestran los dos perfiles de velocidades ascendentes registrados. Estos perfiles no se han completado debido a la falta de datos de su comportamiento.

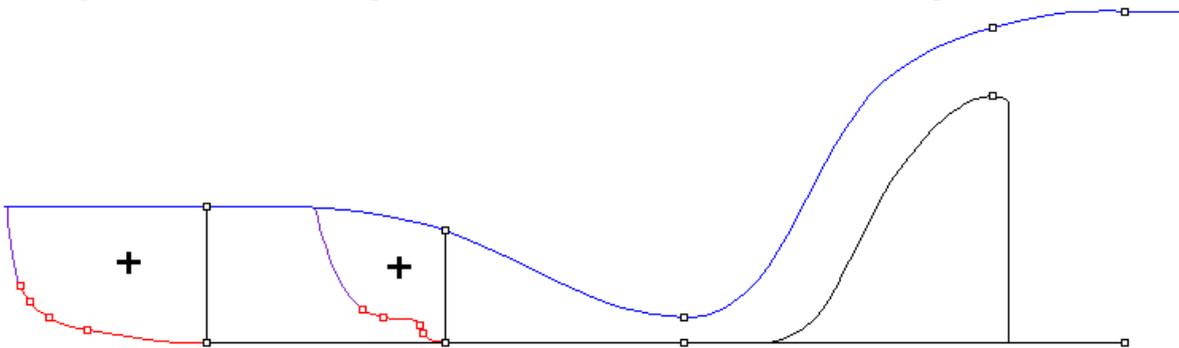


Figura VII-24. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para resalto bajo aliviadero, con $Q=2,78$ l/seg.

VI.2.2 Resaltos cuya sumergencia es igual a la mitad de la altura del aliviadero.

Se empleó un aliviadero WES, como estructura de control para crear resaltos sumergidos a distintos caudales, realizando medidas de los perfiles de velocidad para caudales de 4,18, 3,48 y 2,78 m^3/h , con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, durante 5 minutos. Todos los datos registrados por metodología Doppler fueron filtrados para mejorar la precisión de las mediciones.

Las mediciones se realizaron a diversos calados de la parte inicial, central y final del resalto.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

VI.2.2.1 Caudal de 4,18 l/seg

Para el caudal de 4,18 l/seg las características del resalto muestreado fueron:

Se empleó como resalto de referencia el muestreado para el mismo caudal con que se originó el resalto estable al pie del aliviadero WES. Se buscó que el calado medido al inicio del resalto fuese $y_3 = 7,4$ cm, con un error alrededor del 5 % respecto al teórico, calculado a partir de los calados y_2 , y_4 y el número de Froude del resalto usado como referencia. El calado secuente medido fue $y_4 = 12,43$ cm. La longitud del resalto considerada fue la misma que para el resalto estable al pie del aliviadero. La energía específica de aguas arriba de la estructura de control fue $E_0 = 21,58$ cm, decayendo rápidamente en el inicio del resalto sumergido y, siendo al final del resalto, $E_2 = 13,25$ cm, por lo que la pérdida de energía en el resalto es $\Delta E = 8,33$ cm, con una eficiencia alrededor del 61 %.

Una vez realizadas las mediciones y filtrados los datos muestreados, se obtuvieron los siguientes resultados:

Al inicio del resalto, se muestreó hasta un calado de 2,46 cm de un total de 7,4 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 66,61 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 67,58 cm/seg, por tanto, en la parte superficial la velocidad irá disminuyendo hasta un punto en que el que el flujo se mueva hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 86,86 cm/seg para un calado de 1,45 cm.

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 5,49 cm de un total de 10,06 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 56,32 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 49,71 cm/seg. En la parte superficial el flujo se moverá hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 121,53 cm/seg para un calado de 0,73 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 6,52 cm de un total de 12,43 cm, obteniéndose una velocidad media muestreada de 58,16 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 40,23 cm/seg. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 0,75 cm, siendo de 88,08 cm/seg.

En la Figura VII-25 se muestran los perfiles de velocidad calculados, en rojo se dibujan los perfiles registrados, mientras que en violeta se grafica una aproximación de la parte restante del perfil. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

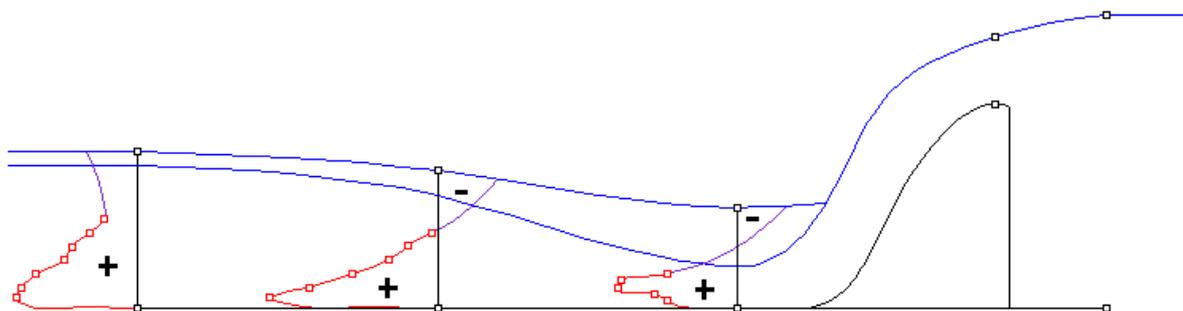


Figura VII-25. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido hasta la mitad del aliviadero, con $Q = 4,18$ l/seg.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la tabla VII-11 se comparan distintos parámetros de un resalto sumergido:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	21,3			E_3 (cm)	14,76	10,32	43,07
V_0 (cm/seg)		26,49		Y_4 (cm)	12,43		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,36		V_4 (cm/seg)	40,23		
E_0 (cm)		21,66		$V_4^2/2g$ (cm)	0,82		
Y_1 (cm)	2,6	2,63	1,12	E_4 (cm)	0,82		
Y_3 (cm)	12,43	7,05	4,94	Lr (cm)	45,5	49,15	7,4
V_3 (cm/seg)	67,58	80,02	15,55	ΔE	20,83		
$V_3^2/2g$ (cm)	2,33	3,26	28,69	$\Delta E/E_1$	1,41		

Tabla VII-11.

Se realizaron las siguientes observaciones de las velocidades verticales muestreadas:

En el perfil de velocidades verticales muestreado al inicio del resalto se observó que, en la parte más cercana a la solera, se produce un pico de grandes velocidades ascendentes, disminuyendo rápidamente para registrar, presumiblemente, velocidades descendentes.

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que en la parte más cercana a la solera es ascendente, disminuyendo después y registrando valores de velocidad vertical descendente.

En la parte final del resalto se observa la existencia de un pico de velocidades ascendente que va disminuyendo hasta aparecer velocidades descendentes en el perfil.

En la Figura VII-26 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

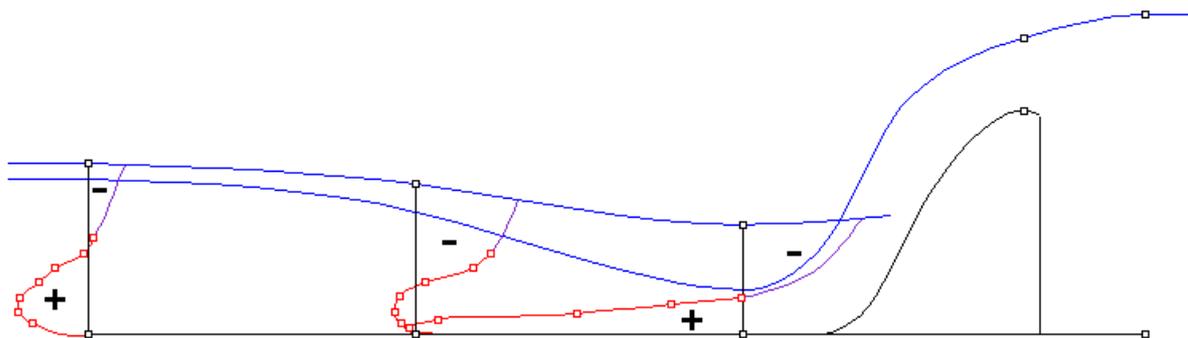


Figura VII-26. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para un resalto sumergido hasta la mitad del aliviadero, con $Q= 4,18$ l/seg.

VI.2.2.2 Caudal de 3,48 l/seg

Para el caudal de 3,48 l/seg las características del resalto analizado fueron las siguientes:

Se empleó como resalto de referencia el muestreado para el mismo caudal con que se originó el resalto estable al pie del aliviadero. El calado inicial del resalto se ajustó para ser $y_3 = 7,4$ cm, dando un error alrededor del 26 % respecto al teórico, calculado a partir de los calados y_2 , y_4 y el número de Froude del resalto de referencia. El calado secuente medido fue $y_4 = 11,11$ cm. Las mediciones se realizaron en los puntos que delimitaban el inicio, mitad y final del resalto estable al pie de la estructura de control. La energía específica de aguas arriba del aliviadero fue de 21,00 cm, decayendo rápidamente al inicio del resalto sumergido y, siendo al final del resalto, $E_2 = 11,83$ cm, por lo que la pérdida de energía que se obtuvo en el resalto fue $\Delta E = 9,18$ cm, con una eficiencia alrededor del 56 %. Estas relaciones vienen reflejadas en la siguiente tabla:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	20,8			E_3 (cm)	12,73	9,14	39,25
V_0 (cm/seg)		22,61		Y_4 (cm)	11,11		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,26		V_4 (cm/seg)	37,51		
E_0 (cm)		21,06		$V_4^2/2g$ (cm)	0,72		
Y_1 (cm)	2,17	2,20	1,46	E_4 (cm)	0,72		
Y_3 (cm)	11,11	5,88	25,83	L_r (cm)	39,5	46,08	14,3
V_3 (cm/seg)	56,32	79,96	29,57	ΔE	20,34		
$V_3^2/2g$ (cm)	1,62	3,26	50,39	$\Delta E/E_1$	1,60		

TablaVII-12

Una vez realizadas las mediciones y filtrados los datos muestreados, se obtuvieron los siguientes resultados:

Al inicio del resalto, se muestreó hasta un calado de 2,53 cm de un total de 7,4 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 101,64 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 56,32 cm/seg. Al igual que en el caso anterior, llegará un punto en que el flujo cambie de sentido. La velocidad máxima muestreada fue de 140,15 cm/seg para un calado de 1,06 cm.

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 4,50 cm de un total de 9,42 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 61,94 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 44,24 cm/seg, por tanto, en la parte superior del perfil, la velocidad irá disminuyendo, existiendo un momento en el que el flujo se mueva hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 117,73 cm/seg para un calado de 0,8 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 6,24 cm de un total de 11,11 cm, obteniéndose la velocidad máxima de 90,17 cm/seg en el calado de 0,79 cm. La velocidad media muestreada fue de 49,83 cm/seg, obteniéndose una velocidad media teórica para la sección completa de 37,51 cm/seg.

En la Figura VII-27 se muestran los perfiles de velocidad calculados, graficándose en rojo los perfiles medidos, mientras que en violeta se dibuja una posible aproximación del

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

comportamiento del flujo en la parte restante del perfil. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

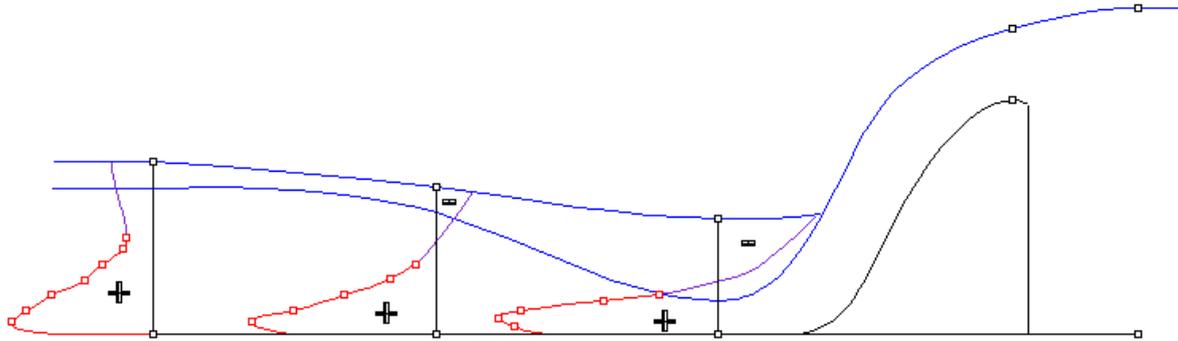


Figura VII-27. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido hasta la mitad del aliviadero, con $Q= 3,48$ l/seg.

Se realizaron las siguientes observaciones de las velocidades verticales registradas:

Al inicio del resalto se observó en el perfil de velocidades verticales muestreado que, en la parte más cercana a la solera, se produce un pico de ascendentes, registrándose después un pico de velocidades descendentes, anulándose de nuevo las velocidades verticales. En la parte superior es esperable que vuelva a existir flujo descendente.

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades que en la parte más cercana a la solera es ascendente, disminuyendo después y registrando valores de velocidad vertical descendente.

En la parte final del resalto se observa la existencia de un pico de velocidades ascendente, similar al que se produce en la mitad del resalto, que va disminuyendo hasta aparecer velocidades descendentes en el perfil. En la parte superior volverán a aparecer velocidades ascendentes.

En la Figura VII-28 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, donde las velocidades ascendentes se grafican a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

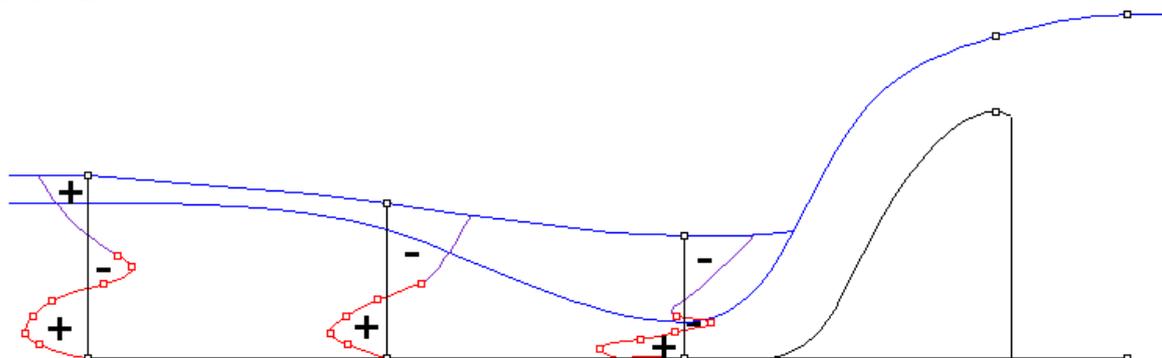


Figura VII-28. Perfiles de velocidad vertical del flujo, para un resalto sumergido hasta la mitad del aliviadero, con $Q= 3,48$ l/seg.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

VI.2.2.3 Caudal de 2,78 l/seg

Para el caudal de 2,78 l/seg las características del resalto analizado fueron las siguientes:

El resalto muestreado para este mismo caudal, con el que se originó el resalto estable al pie del aliviadero descrito anteriormente, se empleó como referencia para conocer la ubicación del inicio, centro y final del resalto sumergido a muestrear, donde se realizaron las mediciones de velocidad. El calado inicial del resalto se ajustó para ser $y_3 = 7,4$ cm, dando un error alrededor del 26 % respecto al teórico, calculado a partir de los calados y_2 , y_4 y el número de Froude del resalto de referencia. El calado secuente medido fue $y_4 = 10,45$ cm. La energía específica de aguas arriba del aliviadero fue de 20,34 cm, decayendo rápidamente al inicio del resalto sumergido y, siendo al final del resalto, $E_2 = 10,97$ cm, teniendo en el resalto una pérdida de energía de $\Delta E = 9,37$ cm, con una eficiencia alrededor del 54 %. Estos parámetros vienen tabulados en la tabla VII-13.

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	20,2			E_3 (cm)	11,48	7,96	44,27
V_0 (cm/seg)		18,62		Y_4 (cm)	10,45		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,18		V_4 (cm/seg)	31,90		
E_0 (cm)		20,38		$V_4^2/2g$ (cm)	0,52		
Y_1 (cm)	1,77	1,77	0,24	E_4 (cm)	0,52		
Y_3 (cm)	10,45	5,86	26,26	L_r (cm)	35,4	43,42	18,5
V_3 (cm/seg)	45,05	64,19	29,81	ΔE	19,86		
$V_3^2/2g$ (cm)	1,03	2,1	50,73	$\Delta E/E_1$	1,73		

Tabla VII-13

Una vez realizadas las mediciones y filtrados los datos muestreados, se obtuvieron los siguientes resultados:

Al inicio del resalto, se muestreó hasta un calado de 2,57 cm de un total de 7,4 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 99,91 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 45,05 cm/seg. A partir de un determinado calado, el flujo se mueva hacia aguas arriba, dando velocidades negativas. La velocidad máxima muestreada fue de 151,41 cm/seg para un calado de 0,51 cm.

En la mitad del resalto, se pudo medir hasta un calado de 4,50 cm de un total de 9,38 cm, obteniéndose una velocidad media de las mediciones de 61,53 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 35,54 cm/seg, por tanto, en la parte superior del perfil, la velocidad irá disminuyendo, llegando un punto en que cambie de sentido. La velocidad máxima muestreada fue de 122,55 cm/seg para un calado de 0,75 cm.

En el final del resalto, se midió hasta un calado de 5,44 cm de un total de 10,45 cm, obteniéndose en el calado de 0,77 cm, la máxima velocidad, de 92,5 cm/seg. La velocidad media muestreada fue de 56,46 cm/seg, obteniéndose una velocidad media teórica para la sección completa de 31,90 cm/seg. En este punto aun no se aprecia un perfil de velocidades típico de flujo gradualmente variado.

En la Figura VII-29 se muestran los perfiles de velocidad calculados, graficándose en rojo los perfiles medidos, mientras que en violeta se dibuja una posible aproximación del

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

comportamiento del flujo en la parte restante del perfil. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

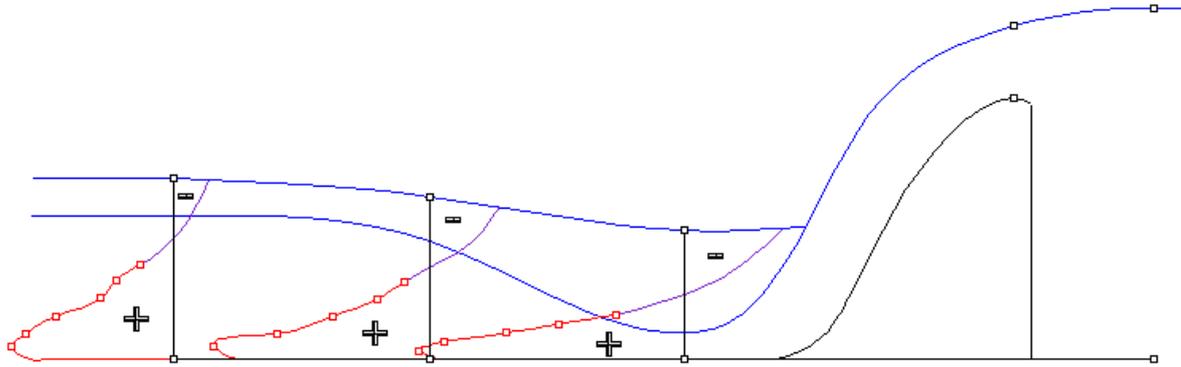


Figura VII-29. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido hasta la mitad del aliviadero, con $Q=2,78$ l/seg.

Se realizaron las siguientes observaciones de las velocidades verticales registradas:

Al inicio del resalto se observó en el perfil de velocidades verticales muestreado que conforme aumenta el calado la velocidad ascendente crece.

En la zona central del resalto se observa una distribución de velocidades que en la parte más cercana a la solera presenta un pico de velocidades ascendentes, que después disminuye ligeramente, para probablemente mantenerse .

En la parte final del resalto se observa la existencia de un una forma de las velocidades ascendentes similar al registrado en la parte central del resalto, pero de mayor entidad, que disminuye en la mitad del calado total del perfil.

En la Figura VII-30 se muestran los perfiles registrados de velocidad vertical, donde las velocidades ascendentes se grafican a la izquierda del eje vertical para cada profundidad en que fueron muestreadas. Las líneas superiores azules marcan la superficie del resalto sumergido, mientras que las inferiores representan el resalto usado de referencia.

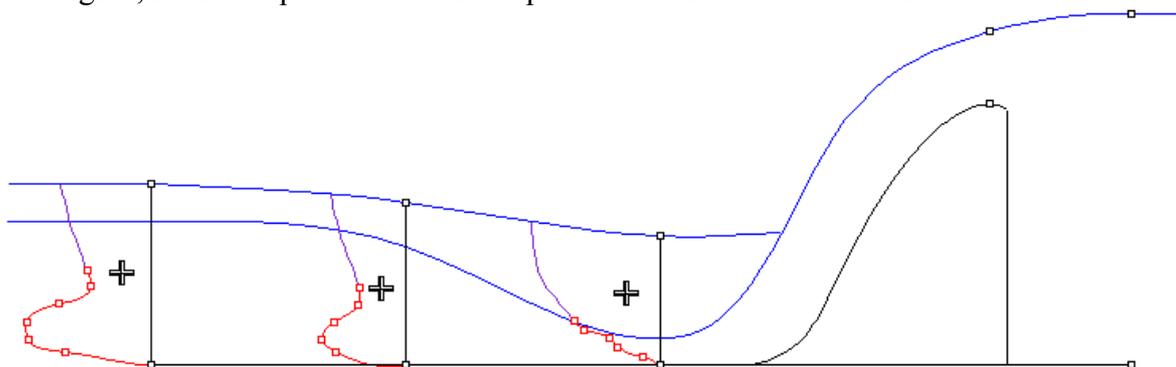


Figura VII-30. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para un resalto sumergido hasta la mitad del aliviadero, con $Q=2,78$ l/seg.

VI.2.3 Resaltos cuya sumergencia es igual a la altura del aliviadero.

Se empleó un aliviadero WES como estructura de control para crear resaltos sumergidos cuyo calado inicial fuese igual a la altura de la estructura de control empleada. De tal forma, el vertedero de rebose estará en el límite de trabajar sumergido, pero sin llegar a estarlo, por lo que los parámetros de descarga del mismo no se verán modificados.

Se hicieron campañas para realizar medidas de los perfiles de velocidad con caudales de 4,18, 3,48 y 2,78 l/seg, con una frecuencia de muestreo de 10 Hz, durante 5 minutos. Todos los datos registrados mediante ADV fueron filtrados, con los valores de corte descritos, para mejorar la precisión de las mediciones. Las mediciones se realizaron a diversos calados de la parte inicial, central y final de cada resalto muestreado.

VI.2.3.1 Caudal de 4,18 l/seg

Para un caudal trasegado de 4,18 l/seg las características del resalto muestreado fueron las siguientes:

Se empleó como resalto de referencia el muestreado para el mismo caudal con que se originó el resalto estable al pie del aliviadero. El calado medido al inicio del resalto se ajustó para que fuese $y_3 = 14,8$ cm, originando un error del 18 % respecto al teórico calculado. El calado seciente medido fue $y_4 = 15,40$ cm. La energía específica obtenida de aguas arriba de la estructura de control fue de 21,58 cm, decayendo rápidamente dentro del resalto y, siendo al final del mismo, $E_2 = 15,94$ cm, por lo que la energía que se perdió en el resalto fue de $\Delta E = 5,64$ cm, consiguiéndose una eficiencia ($E_{final} / E_{inicial}$) del 74 %.

Filtrando y analizando los datos muestreados se obtuvieron los siguientes resultados:

El inicio del resalto presentaba un calado total de 14,8 cm, pudiéndose muestrear con metodología Doppler hasta un calado de 10,03 cm. Se observó que en la parte más cercana a la solera del canal, el flujo se movía hacia aguas arriba, cambiando después hacia aguas abajo, y nuevamente hacia aguas arriba. La máxima velocidad hacia aguas arriba fue de 33,10 cm/seg, registrada para un calado de 1,47 cm, mientras que para el calado de 4,54 cm se registró la velocidad máxima hacia aguas abajo, de 75,62 cm/seg. La velocidad media obtenida de los muestreos fue de 35,56 cm/seg, por lo que, para alcanzar los 33,79 cm/seg teóricos, la velocidad del flujo continuará siendo negativa en la parte restante del perfil de velocidades.

En el perfil de velocidades muestreado en mitad del resalto se midió hasta un calado de 9,99 cm de un total de 15,20 cm, registrándose en la parte más cercana a la solera un pico de velocidades hacia aguas abajo que cambia después hacia aguas arriba. Como velocidad media de las mediciones se obtuvo 46,40 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 32,90 cm/seg, por lo tanto, en la parte superficial la velocidad continuará aumentando en el sentido de aguas arriba. La velocidad máxima muestreada hacia aguas abajo fue de 110,78 cm/seg para un calado de 0,74 cm, mientras que para el calado de 9,99 cm se muestreó la máxima velocidad hacia aguas arriba (14,34 cm/seg).

En la parte final del resalto, se realizaron ocho mediciones de velocidad repartidas hasta un calado de 10,51 cm de un total de 15,40 cm, registrándose en todas las mediciones

velocidades del flujo hacia aguas abajo. La velocidad media muestreada obtenida fue de 49,79 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 32,47 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, la velocidad hacia aguas abajo se verá reducida, apareciendo movimientos del flujo hacia aguas arriba. La velocidad máxima se muestreó para un calado de 0,76 cm, siendo de 90,67 cm/seg. En este perfil se observa que el flujo aun no ha alcanzado el estado laminar ya que aun aparecen movimientos hacia aguas arriba.

En la Figura VII-31 se grafican los perfiles de velocidad calculados. Los cuadrados de las líneas del perfil de velocidades representan los calados en los cuales se muestreó el flujo y, por tanto, de los que se conocen su velocidad.

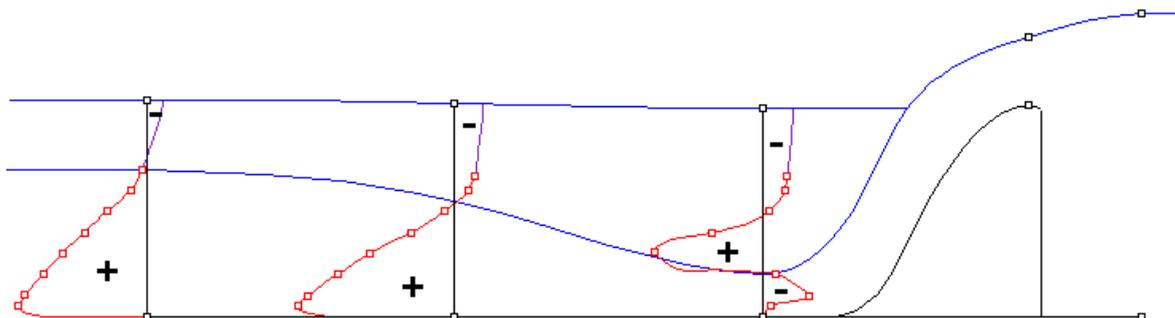


Figura VII-31. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero, con $Q=4,18$ l/seg.

En la siguiente tabla se recogen distintos parámetros de un resalto sumergido:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	21,3			E_3 (cm)	15,98	12,74	25,48
V_0 (cm/seg)		13,25		Y_4 (cm)	15,4		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,09		V_4 (cm/seg)	32,47		
E_0 (cm)		21,39		$V_4^2/2g$ (cm)	0,54		
Y_1 (cm)	2,6	2,63	1,12	E_4 (cm)	0,54		
Y_3 (cm)	15,4	12,48	18,62	L_r (cm)	45,5	49,15	7,4
V_3 (cm/seg)	33,79	22,61	49,42	ΔE	20,85		
$V_3^2/2g$ (cm)	0,58	,26	123,26	$\Delta E/E_1$	1,30		

Tabla VII-14

Además de las ya mencionadas, en el muestreo realizado, se tomaron medidas de velocidades en la componente vertical, observándose lo siguiente:

En el perfil de velocidades verticales muestreado al inicio del resalto se observó que en la parte más cercana a la solera se produce un pico de velocidades ascendentes, cambiando rápidamente para registrar un pico mayor de velocidades descendentes que disminuye ligeramente. La velocidad máxima ascendente registrada fue de 8,87 cm/seg para el calado de 1,47 cm, mientras que para el calado de 4,54 cm se obtuvo 13,81 cm/seg como máxima velocidad descendente. Esta distribución da una idea de la fuerte turbulencia producida por la entrada del agua desde el aliviadero.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades de pequeña entidad en ambos sentidos, pero que aumenta en sentido descendente a partir de los 4,51 cm de calado, llegándose a registrar 7,45 cm/seg de velocidad descendente para el calado de 9,99 cm. Por tanto, la turbulencia se produce en la parte superior del perfil.

En la parte final del resalto se observa la existencia de un pico de velocidades ascendente que va disminuyendo hasta aparecer un pequeño pico de velocidades descendentes. En la parte superior es esperable que aparezcan nuevamente velocidades ascendentes.

En la Figura VII-32 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.

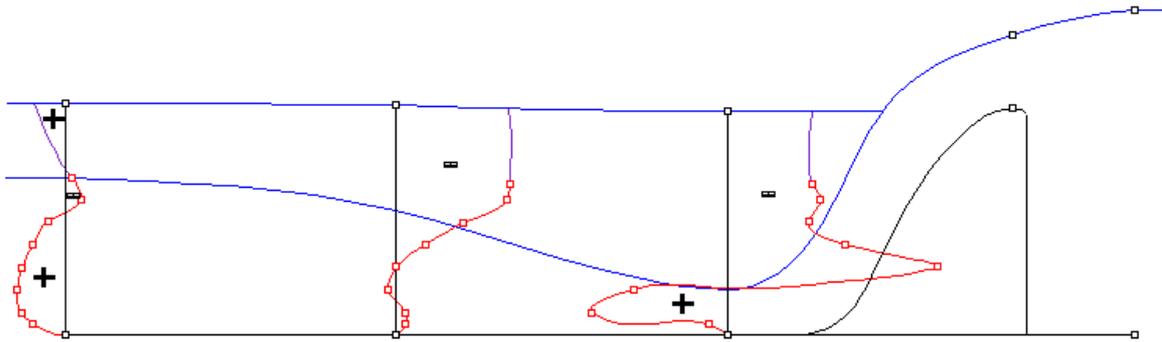


Figura VII-32. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para un resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero, con $Q= 4,18$ l/seg.

VI.2.3.2 Caudal de 3,48 l/seg

Las características del resalto sumergido, muestreado para el caudal medido de 3,48 l/seg, fueron las siguientes:

Se empleó como resalto de referencia el estudiado para el mismo caudal, con el que se originó un resalto estable al pie del aliviadero. El calado medido al inicio del resalto se ajustó para que fuese $y_3= 14,8$ cm, originando un error del 26 % respecto al calculado teóricamente. El calado secuente medido fue $y_4= 15,40$ cm. La energía específica obtenida de aguas arriba de la estructura de control fue de 21,00 cm, decayendo rápidamente dentro del resalto y, siendo al final del mismo, $E_2= 11,83$ cm; con una eficiencia del 56 % y $\Delta E= 9,18$ cm de energía perdida en el resalto.

Con los datos muestreados filtrando y analizando se obtuvieron los siguientes resultados:

El inicio del resalto presentaba un calado total de 14,8 cm, pudiéndose muestrear con el instrumental empleado hasta un calado de 9,97 cm. En la parte más cercana a la solera del canal el flujo se movía hacia aguas abajo, cambiando gradualmente hacia aguas arriba. La máxima velocidad hacia aguas abajo fue de 88,05 cm/seg, registrada para un calado de 3,04 cm, registrándose velocidades hacia aguas arriba a partir del calado 6,65 cm. La velocidad media obtenida de los muestreos fue de 35,61 cm/seg, por lo que, para alcanzar los 28,16 cm/seg teóricos, la velocidad del flujo continuará siendo negativa en la parte restante del perfil de velocidades.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En el perfil de velocidades muestreado en mitad del resalto se midió hasta un calado de 9,98 cm de un total de 15,20 cm, registrándose en la parte más cercana a la solera un pico de velocidades hacia aguas abajo que, a partir del calado 7,55 cm, cambia hacia aguas arriba. La velocidad media que se obtuvo de las mediciones fue de 39,64 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 27,42 cm/seg, por lo tanto, en la parte superficial la velocidad continuará aumentando en el sentido de aguas arriba. La velocidad máxima muestreada hacia aguas abajo fue de 109,25 cm/seg para un calado de 0,74 cm, mientras que la máxima velocidad hacia aguas arriba, 18,60 cm/seg, se muestreó en el calado de 9,98 cm.

En la parte final del resalto, se realizaron mediciones de velocidad repartidas hasta un calado de 10,49 cm de un total de 15,40 cm, registrándose hasta el calado de 8,99 cm velocidades del flujo hacia aguas abajo y, a partir de dicho calado, velocidades hacia aguas arriba. La velocidad media muestreada obtenida fue de 39,80 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 27,06 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, aumentarán los movimientos del flujo hacia aguas arriba. La velocidad máxima hacia aguas abajo se muestreó para un calado de 0,78 cm, siendo de 91,16 cm/seg. Para este perfil el flujo aun no ha alcanzado el estado laminar ya que aun aparecen movimientos hacia aguas arriba.

En la Figura VII-33 se grafican los perfiles de velocidad calculados. Los cuadrados de las líneas del perfil de velocidades representan los calados en los cuales se muestreó el flujo y, por tanto, de los que se conocen su velocidad.

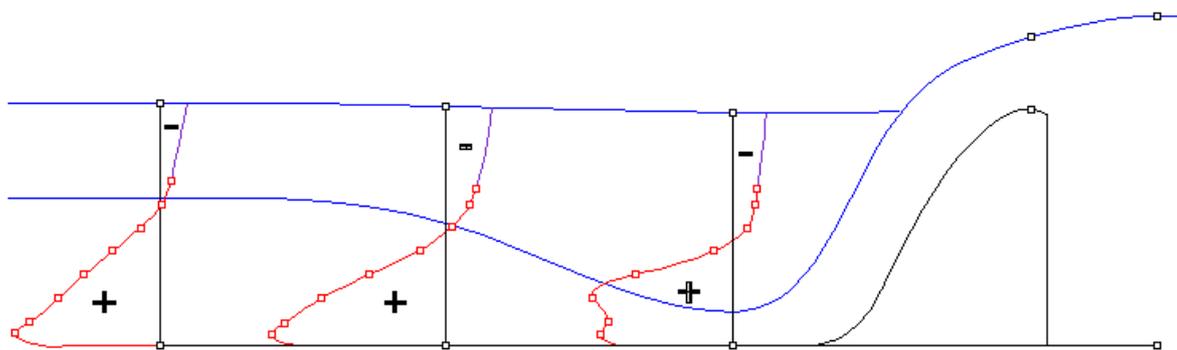


Figura VII-33. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero, con $Q=3,48$ l/seg.

En la tabla VII-15 se recogen algunos parámetros significativos de resaltos sumergidos:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	20,9			E_3 (cm)	15,80	13,73	15,13
V_0 (cm/seg)		11,25		Y_4 (cm)	15,4		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,06		V_4 (cm/seg)	27,06		
E_0 (cm)		20,96		$V_4^2/2g$ (cm)	0,37		
Y_1 (cm)	2,17	2,20	1,46	E_4 (cm)	0,37		
Y_3 (cm)	15,4	13,57	9,03	L_r (cm)	39,5	46,08	14,3
V_3 (cm/seg)	28,16	17,32	62,57	ΔE	20,59		
$V_3^2/2g$ (cm)	0,40	,15	164,28	$\Delta E/E_1$	1,30		

Tabla VII-15

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Además, en el muestreo se tomaron medidas de velocidades en la componente vertical, observándose lo siguiente:

En el perfil de velocidades verticales muestreado al inicio del resalto se observó que en la parte más cercana a la solera se producen altas velocidades descendente, disminuyendo ligeramente. La velocidad máxima descendente registrada fue de 13,02 cm/seg para el calado de 3,04 cm.

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades de pequeña entidad en ambos sentidos, pero que, al igual que en el caso anterior, aumenta en sentido descendente a partir de los 4,51 cm de calado, llegándose a registrar 7,87 cm/seg de velocidad descendente para el calado de 8,99 cm. Por tanto, la turbulencia se produce en la parte superior del perfil.

En la parte final del resalto se observa la existencia de una distribución de velocidades ascendente de pequeña magnitud que va disminuyendo hasta aparecer un pico de velocidades descendentes.

En la Figura VII-34 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados para el caudal de $10 \text{ m}^3/\text{h}$, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.

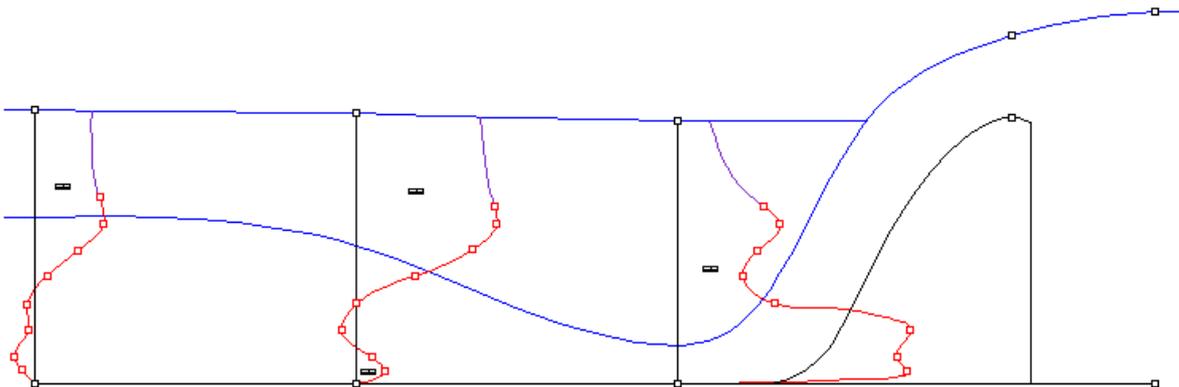


Figura VII-34. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para un resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero, con $Q=3,48 \text{ l/seg}$.

VI.2.3.3 Caudal de 2,78 l/seg

Para un caudal medido de 2,78 l/seg las características del resalto sumergido muestreado fueron las siguientes:

Se empleó como resalto de referencia el muestreo para el mismo caudal con que se originó el resalto estable al pie del aliviadero. El calado medido al inicio del resalto se ajustó para que fuese $y_3= 14,8 \text{ cm}$, originando un error del 8 % respecto al teórico calculado. El calado secuente medido fue $y_4= 15,20 \text{ cm}$. La energía específica obtenida de aguas arriba de la estructura de control fue de 20,34 cm, decayendo rápidamente dentro del resalto y, siendo al final del mismo, $E_2= 15,45 \text{ cm}$, por lo que la energía que se perdió en el resalto fue de $\Delta E= 4,89 \text{ cm}$, consiguiéndose una eficiencia del 76 %.

Filtrando y analizando los datos muestreados se obtuvieron los siguientes resultados:

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

El inicio del resalto presentaba un calado total de 14,8 cm, muestreándose con los medios disponibles hasta un calado de 10,04 cm. Se observó un pico de velocidades hacia aguas abajo en la parte más cercana a la solera del canal, cambiando gradualmente hacia aguas arriba. La máxima velocidad hacia aguas abajo fue muestreada para un calado de 0,7 cm, siendo de 102,09 cm/seg. La velocidad media obtenida de los muestreos fue de 34,60 cm/seg, por tanto, para alcanzar la velocidad teórica de 22,53 cm/seg, el movimiento del flujo continuará siendo hacia aguas arriba en la parte restante del perfil de velocidades.

En el perfil de velocidades muestreado en mitad del resalto se midió hasta un calado de 10,00 cm de un total de 15,00 cm, registrándose en el muestreo más cercano a la solera una pequeña velocidad hacia aguas arriba y después el pico de velocidades hacia aguas abajo, que cambia nuevamente hacia aguas arriba. Como velocidad media de las mediciones se obtuvo 40,24 cm/seg, siendo la velocidad media teórica de la sección completa de 22,23 cm/seg, por lo tanto, en la parte superficial la velocidad continuará aumentando en el sentido de aguas arriba. La velocidad máxima muestreada hacia aguas abajo fue de 90,46 cm/seg para un calado de 1,53 cm, mientras que para el calado de 10,00 cm se muestreó la máxima velocidad hacia aguas arriba, de 17,95 cm/seg.

En la parte final del resalto, se realizaron los muestreos de velocidad repartidos hasta un calado de 10,03 cm de un total de 15,20 cm. La velocidad media muestreada fue de 31,41 cm/seg, siendo la velocidad media teórica para la sección completa de 21,93 cm/seg. Por tanto, en la parte superior, el flujo continuará moviéndose hacia aguas arriba. La velocidad máxima hacia aguas abajo se muestreó para un calado de 0,74 cm, siendo de 89,19 cm/seg. En este perfil se observa que el flujo aun no ha alcanzado el estado laminar ya que aun aparecen movimientos hacia aguas arriba.

En la Figura VII-35 se grafican los perfiles de velocidad calculados. Los cuadrados de las líneas del perfil de velocidades representan los calados de los que se conocen su velocidad, ya que fue en los cuales se muestreó el flujo.

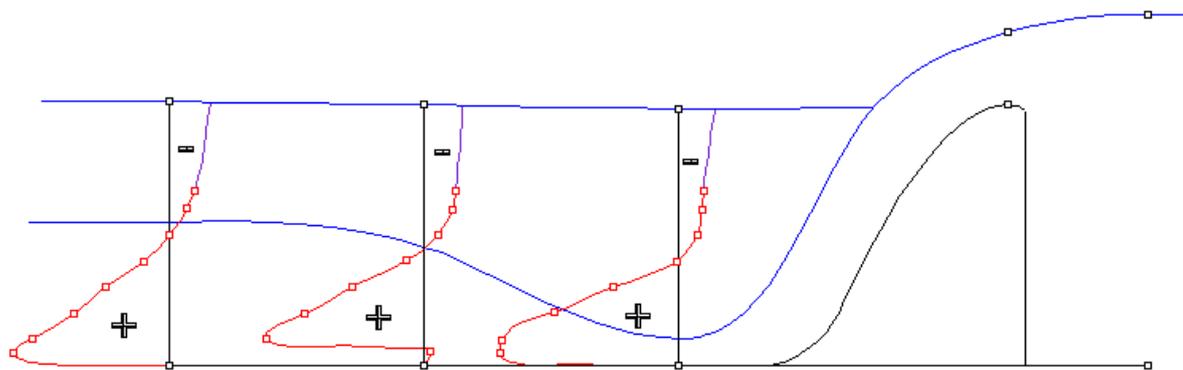


Figura VII-35. Perfiles de velocidad en la dirección del flujo, para resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero, con $Q=2,78$ l/seg.

Además, se realizaron medidas de velocidades en la componente vertical de los tres perfiles, observándose lo siguiente:

En el perfil de velocidades verticales muestreado al inicio del resalto se observó que en la mayor parte del mismo se producen velocidades descendentes, existiendo para el calado de 4,49 cm un cambio a velocidades ascendentes. La velocidad máxima descendente registrada fue de 10,12 cm/seg para el calado de 1,47 cm.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

En la parte central del resalto se observa una distribución de velocidades con un gran pico de velocidades ascendentes cerca de la solera, existiendo después variaciones de pequeña entidad en ambos sentidos y, un aumento de la velocidad descendente a partir de los 5,40 cm de calado. La velocidad máxima ascendente fue de 10,46 cm/seg para el calado de 0,77 cm y, la máxima velocidad descendente, de 6,35 cm/seg, se registró para 8,97 cm de calado. Por tanto, la turbulencia en la mitad de este resalto sumergido se produce en todo el perfil.

En la parte final del resalto se observa la existencia de velocidades ascendente, registrándose a partir de 3,68 cm de calado velocidades descendentes.

En la Figura VII-36 se muestran los perfiles de velocidad vertical registrados, siendo las velocidades ascendentes graficadas a la izquierda del eje vertical y las velocidades descendentes a la derecha para cada profundidad medida.

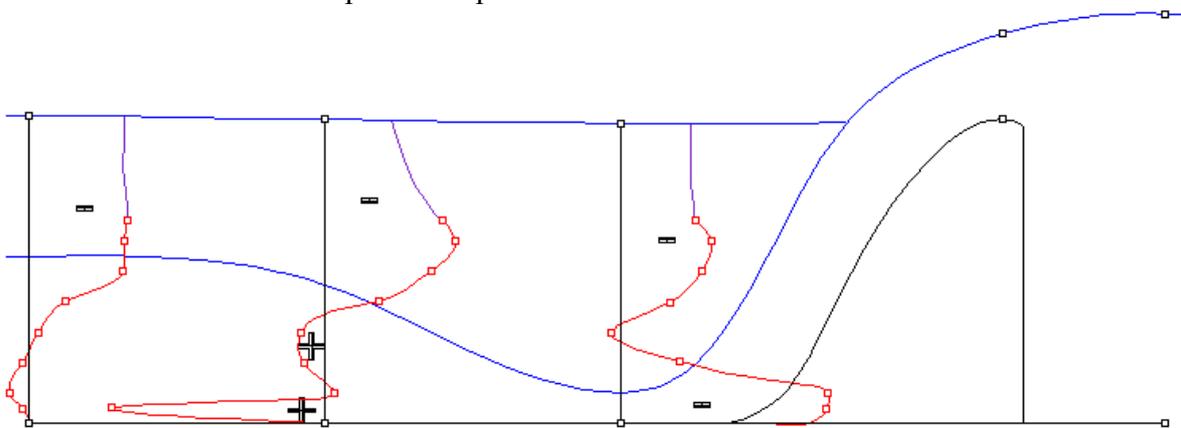


Figura VII-36. Perfiles de velocidad verticales del flujo, para un resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero, con $Q= 2,78$ l/seg.

En la siguiente tabla se comparan los parámetros obtenidos para el resalto sumergido con los obtenidos por las distintas formulaciones:

Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %	Parámetro	Medido	Calculado	Diferencia %
Y_0 (cm)	20,2			E_3 (cm)	15,46	13,82	11,82
V_0 (cm/seg)		9,31		Y_4 (cm)	15,2		
$V_0^2/2g$ (cm)		0,04		V_4 (cm/seg)	21,93		
E_0 (cm)		20,24		$V_4^2/2g$ (cm)	0,25		
Y_1 (cm)	1,77	1,77	0,24	E_4 (cm)	0,25		
Y_3 (cm)	15,2	13,73	7,80	L_r (cm)	35,4	43,42	18,5
V_3 (cm/seg)	22,53	13,70	64,42	ΔE	20,00		
$V_3^2/2g$ (cm)	0,26	,1	170,34	$\Delta E/E_1$	1,29		

Tabla VII-16

VI.3 Comparación de los perfiles obtenidos.

VI.3.1 Comparación de perfiles para resalto no rechazado (estable).

VI.3.1.1 Mitad del resalto

En la comparación de los perfiles a mitad de resalto, formados tras la compuerta (figura A2-4), se observa una distribución en los perfiles de velocidad que varía ligeramente de magnitud debido al caudal circulante y a la variación en el número de Froude; mientras que en los formados tras el aliviadero varían en gran medida debido a la forma de la entrada del agua, la variación en el número de Froude y en los caudales circulantes (figura A2-5).

Contrastando los perfiles muestreados en la mitad del resalto para los mismos caudales, se ve que la mayor similitud se produce entre los perfiles para $Q= 4,18$ l/seg, ya que son los que presentan valores de Froude más similares (figura A2-6).

VI.3.1.2 Final del resalto

En la parte final del resalto tras la compuerta, el flujo muestreado se acerca al perfil laminar tipo, pero aun no totalmente desarrollado, variando ligeramente la forma de los perfiles debido a la variación del número de Froude y el caudal como factores más importantes (figura A2-7). Sin embargo, en la parte final de los resaltos originados tras el aliviadero, los perfiles de velocidades aun no se aproximan al perfil laminar, variando las velocidades muestreadas en función de los caudales trasegados (figura A2-8).

En la comparación entre los perfiles obtenidos para cada caudal, se observa en los tres casos que los perfiles muestran una forma similar a partir del 20% del calado total, siendo de mayor entidad las velocidades obtenidas para los caudales aguas abajo de la compuerta. Estas diferencias se deben a la gran disparidad que existe entre los números de Froude y el aporte del flujo desde aguas arriba (figura A2-9).

VI.3.1.3 A 30 cm del final del resalto

Comparando los perfiles muestreados para los distintos caudales a 30 centímetros del final del resalto se observa que los tres perfiles son muy similares, variando las velocidades muestreadas proporcionalmente al caudal trasegado. Estos perfiles son muy similares al perfil que se forma en un flujo laminar totalmente desarrollado, por lo que se puede entender que a una distancia de 30 cm del final del resalto el flujo pasa al estado laminar (figura A2-10).

VI.3.2 Comparación de perfiles para resalto sumergido.

VI.3.2.1 Inicio del resalto

Observando los perfiles muestreados al inicio del resalto tras la compuerta, recogidos en la figura A2-11, se aprecia una gran similitud, con variaciones debidas a la profundidad de sumergencia y los caudales trasegados.

En los perfiles obtenidos al inicio del resalto sumergido hasta mitad del aliviadero, se observa que, conforme aumenta el caudal, se incrementan las velocidades en la parte más cercana a la solera, debido a la forma de la entrada del flujo en el resalto (figura A2-12).

Para el resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero, los perfiles, son muy similares a partir del 30 % del calado, variando de forma proporcional al caudal circulante en el canal, pero, desde la solera hasta el 30 % del calado, la forma de entrada del flujo hace disminuir el pico de velocidades conforme aumenta el caudal, registrándose para el mayor caudal velocidades negativas (figura A2-13).

En la comparación de perfiles para el mismo caudal, se aprecia que:

- Para el caudal de 4,18 l/seg, conforme aumenta la sumergencia, la velocidad máxima disminuye en la parte más cercana a la solera del canal, apareciendo grandes similitudes en los comportamientos de los perfiles aguas abajo del aliviadero a partir del 30 % del calado.
- En el caso de $Q= 3,48$ l/seg, se produce un comportamiento semejante al del caso anterior, asemejándose los tres perfiles a partir del 20 % del calado total de la sección.
- Para $Q= 2,78$ l/seg, la máxima velocidad disminuye conforme aumenta la profundidad de sumergencia. Existe gran similitud en el comportamiento de los dos perfiles aguas debajo del aliviadero, presentando mayores velocidades el resalto de menor profundidad de sumergencia.

La comparación de estos perfiles, en función de los caudales, se encuentra recogida en las figuras A2-14, A2-15 y A2-16.

VI.3.2.2 Mitad del resalto sumergido.

En los perfiles registrados para resalto sumergido tras compuerta se aprecia que conforme aumenta el caudal circulante disminuye la velocidad muestreada para cada calado (figura A2-17).

Los perfiles de velocidad a mitad del resalto sumergido hasta la mitad de la altura del aliviadero son prácticamente idénticos. Estos perfiles se muestran en la figura A2-18.

Se puede observar la gran similitud existente entre los perfiles muestreados para distintos caudales en el caso de resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero, distinguiéndose levemente las velocidades muestreadas en cada puntos, de tal forma que, conforme aumenta el caudal, aumentan las velocidades (figura A2-19).

Comparando los perfiles sumergidos a mitad del resalto para $Q= 4,18$ l/seg se aprecia una gran similitud entre los perfiles registrados aguas abajo del aliviadero, registrándose una velocidad máxima para el de menor sumergencia, mientras que el obtenido aguas debajo

de la compuerta varía de los otros dos debido al efecto de la compuerta, ya que en este caso el flujo entra por la solera en vez de por la superficie libre (figura A2-20).

Para los perfiles obtenidos con $Q= 3,48$ l/seg y $Q= 2,78$ l/seg se observa una distribución similar del perfil de velocidades en el que las diferencias son debidas a la diferencia de profundidades de sumergencia del resalto y a las producidas entre la entrada de flujo bajo la compuerta y sobre el aliviadero (figuras A2-21 y A2-22).

VI.3.2.3 Final del resalto sumergido.

En los perfiles muestreados al final del resalto tras compuerta se observan variaciones debidas a la diferencia de caudales en los que, conforme aumenta el caudal se aproximan al perfil laminar tipo (figura A2-23).

Los tres perfiles muestreados en resaltos sumergidos hasta mitad del aliviadero muestran forma y valores de velocidades muy similares, sin que se llegue a formar perfil laminar en estas secciones (figura A2-24).

En los perfiles graficados para el resalto sumergido, con profundidad de sumergencia hasta la coronación del aliviadero, a distintos caudales (figura A2-25), se observa una distribución de velocidades muy similar, en la que las velocidades aumentan proporcionalmente con el caudal trasegado.

Comparando los perfiles de resaltos sumergidos para $Q= 4,18$ l/seg se observa una gran similitud entre los perfiles registrados aguas abajo del aliviadero, mientras que el obtenido aguas debajo de la compuerta varía de los otros dos debido al efecto que produce la entrada del flujo bajo la compuerta en vez de por la superficie libre (figura A2-26).

La forma de comportamiento entre los perfiles para el caudal de 4,18 l/seg se repite al comparar entre sí los perfiles de $Q= 3,48$ l/seg, en los que conforme disminuye la profundidad de sumergencia aumentan ligeramente los registros de velocidades respecto a la comparación de perfiles anterior, de tal forma que disminuyen las diferencias entre los perfiles tras la compuerta y el aliviadero (figura A2-27).

En la comparación de los perfiles muestreados al final del resalto sumergido para $Q= 2,78$ l/seg se observa que continua la dinámica anterior del aumento de velocidades conforme disminuye la profundidad de sumergencia. Estas variaciones se encuentran graficadas en la figura A2-28.

VI.3.2.4 Perfiles a 30 cm del final del resalto sumergido

Los perfiles a 30 cm del final del resalto se muestrearon para el caso del flujo tras compuerta. En la comparación de los perfiles registrados se observa una forma muy similar en la distribución de velocidades, incrementándose las velocidades registradas conforme aumenta el caudal trasegado en el canal de estudio. La comparación de estos se encuentra graficada en la figura A2-29.

VI.3.3 Comparación de los perfiles de velocidades turbulentas.

Al realizar estos perfiles, adimensionalizados con la velocidad V_x de cada punto, se detectaron errores que habían sido pasados por alto, puesto que inicialmente se dio por buena la salida de datos del instrumento, obteniéndose velocidades turbulentas superiores al orden de las velocidades medias del flujo, lo que no es lógico (figura VIII-2). Este hecho llevo a la revisión de los registros iniciales de datos, obtenidos con el software de postprocesamiento.

Al analizar los ficheros de datos con una hoja de cálculo se detectaron errores en la toma de velocidades por el aparato que superaban los filtros empleados, ya que poseen valores similares en SRN y correlación. En la figura VIII-1 se observa como se producen variaciones en el signo de las mediciones en décimas de segundo, disparando las velocidades turbulentas.

1	Time	Vx_1	Vy_1	COR0_1	COR1_1	SNR0_1	SNR1_1	AMP0_1	AMP1_1	CORAvg_1	SNRAvg_1	AmpAvg_1
2	2,25	-43,18	-29,05	12	26	35,7	31,4	152	142	19	33,5	147
3	2,35	10,14	-38,65	16	18	34,4	33,5	149	147	17	34	148
4	2,45	144,6	9,84	8	8	25,4	33,5	128	147	8	29,5	137,5
5	2,55	-4,72	-42,7	24	12	34,8	32,7	150	145	18	33,8	147,5
6	2,65	150,31	8,75	19	42	34,8	35,7	150	152	30,5	35,3	151
7	2,75	0,68	-41,16	10	40	37	37,4	155	156	25	37,2	155,5
8	2,85	-45,83	-27,21	35	17	34,4	20,6	149	117	26	27,5	133
9	2,95	172,81	3,12	43	67	33,1	36,1	146	153	55	34,6	149,5
10	3,05	-10,53	-45	42	40	32,3	33,5	144	147	41	32,9	145,5
11	3,15	-26,08	-40,31	20	28	29,7	28,4	138	135	24	29	136,5
12	3,25	141,28	-1,16	6	23	32,3	37,4	144	156	14,5	34,8	150
13	3,35	170,34	4,31	42	50	29,7	37,8	138	157	46	33,8	147,5
14	3,45	172,29	3,85	53	57	36,5	36,5	154	154	55	36,5	154
15	3,55	148,49	-1,35	15	25	36,1	36,5	153	154	20	36,3	153,5
16	3,65	-28,97	-41,63	67	60	36,5	37,8	154	157	63,5	37,2	155,5
17	3,75	118,2	4,89	23	22	36,1	35,7	153	152	22,5	35,9	152,5
18	3,85	-15,87	-44,99	45	62	30,1	35,7	139	152	53,5	32,9	145,5
19	3,95	-22,63	-42,58	27	31	32,3	34,8	144	150	29	33,5	147
20	4,05	-17,32	-44,43	52	53	33,5	33,1	147	146	52,5	33,3	146,5
21	4,15	154,01	6,27	34	39	34,4	34	149	148	36,5	34,2	148,5
22	4,25	158,75	8,35	20	38	35,3	31	151	141	29	33,1	146
23	4,35	176,57	5,7	57	45	35,7	33,1	152	146	51	34,4	149
24	4,45	-25,3	-46,89	70	67	37	35,7	155	152	68,5	36,3	153,5
25	4,55	172,12	5,57	39	42	37	36,1	155	153	40,5	36,5	154
26	4,65	167,32	-1,7	38	44	36,5	37,4	154	156	41	37	155
27	4,75	-13,69	-44,73	48	20	36,1	36,1	153	153	34	36,1	153

Figura VIII-1. Datos erróneos

Estas variaciones tan bruscas en el sentido del flujo no tienen aparentemente ningún significado físico. No se ha podido detectar con exactitud la fuente de estos errores, puesto que los valores de correlación y señal de ruido para estos datos es elevado y el rango de velocidad empleado en todas las mediciones (± 100 cm/seg) es válido para todas las velocidades registradas, según la el apartado IV.4.6.1.1. Los errores en los datos pueden tener su origen en errores del ámbito de muestreo, fallos del equipo de medición, movimientos de la sonda por el flujo, etc.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

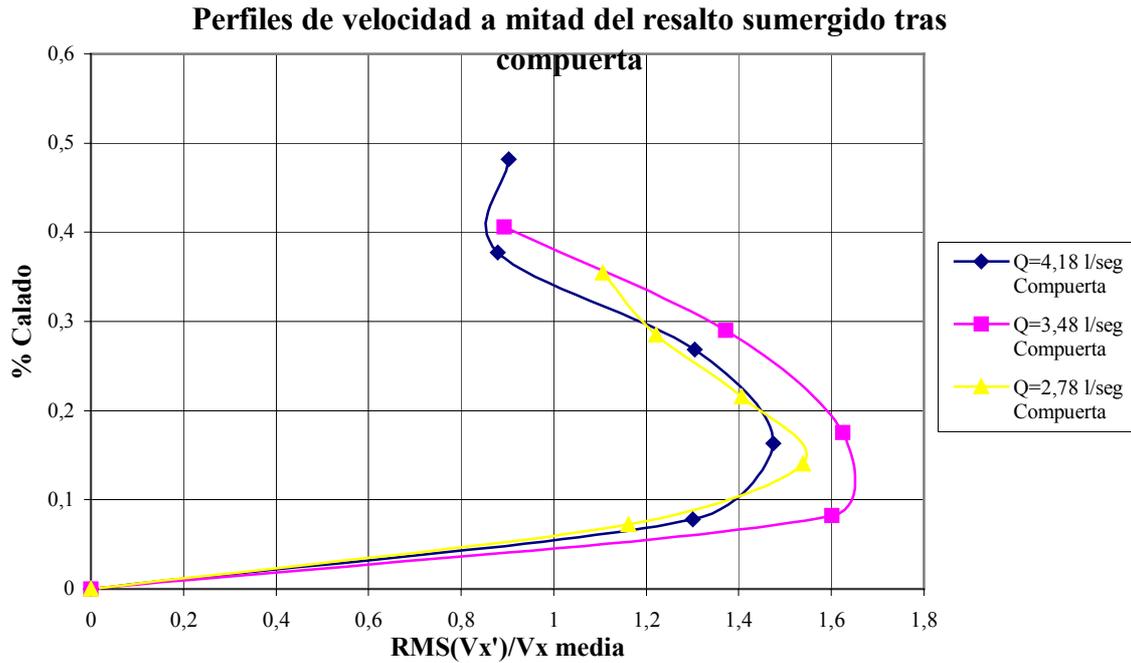


Figura VIII-2. Gráfico erróneo de velocidades RMS.

Se ha observado que los errores aumentan con el incremento de la turbulencia producida por el resalto, existiendo puntos en los que apenas se detectaron dichos errores.

Con el fin de obtener datos de velocidades turbulentas, se procedió a la eliminación de todos los valores de signo contrario a los obtenidos en la velocidad media correspondiente y se recalcularon las velocidades medias y turbulentas con los datos restantes.

Se observó que, con este filtrado, las velocidades medias se ven modificadas únicamente en magnitud, pero que conservan una forma similar de los perfiles. Este hecho se demuestra observando las dos gráficas siguientes:

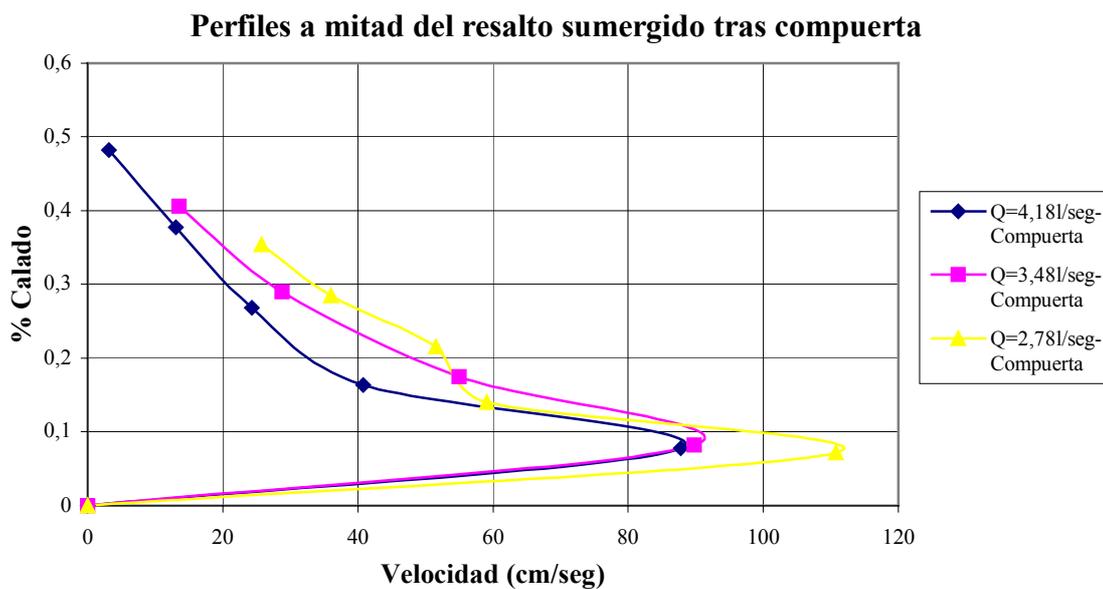


Figura VIII-3. Perfiles de velocidad antes de eliminar los valores negativos.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

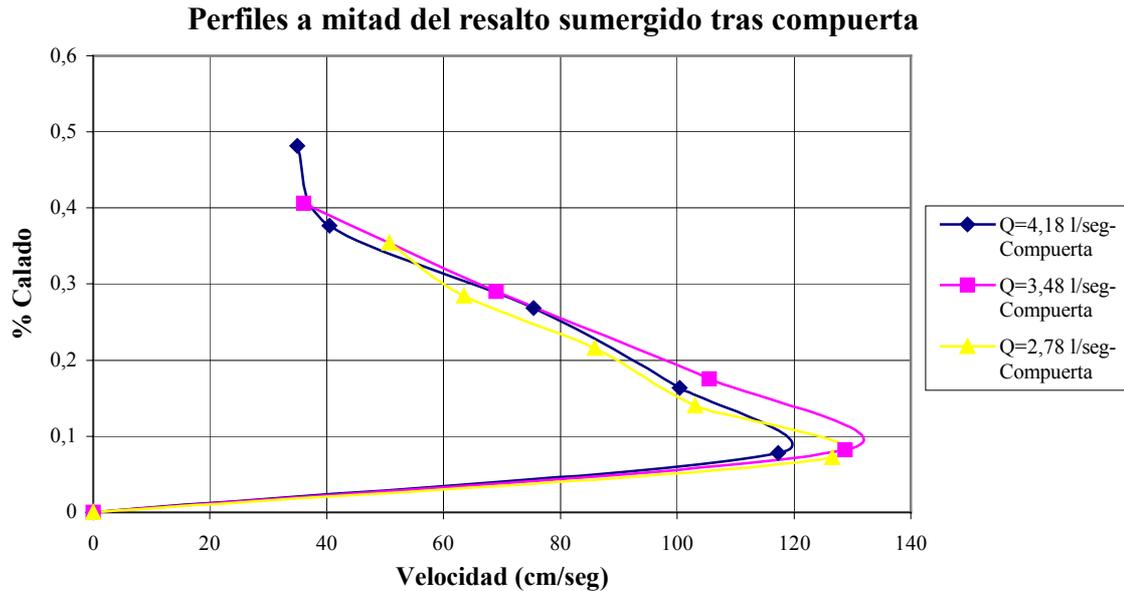


Figura VIII-4. Perfiles de velocidad tras la eliminación de los valores negativos.

Por tanto, las discusiones anteriores sobre las velocidades V_x del flujo son válidas en cuanto a la forma de los perfiles, aunque las velocidades reales serían algo distantes de las velocidades descritas.

A continuación, se procede a realizar una comparación entre los perfiles de velocidades turbulentas, adimensionalizados con las velocidades medias, obtenidos en la parte central de los resaltos.

VI.3.3.1 Resaltos no rechazados.

Al comparar los perfiles de velocidades turbulentas, obtenidos en la mitad del resalto, para los resalto obtenido aguas debajo de la compuerta, se observa una distribución muy similar en los dos caudales mayores, apareciendo mayores turbulencias para el caudal de 2,78 l/seg. En los tres casos, la turbulencia aumenta con el calado. Se observa que, conforme aumenta el número de Froude, las velocidades turbulentas se incrementan (figura A2-30).

En los perfiles obtenidos tras el aliviadero se aprecia nuevamente que conforme aumenta el número de Froude, y disminuye el caudal, se incrementa las velocidades negativas, sobre todo en la parte mas cercana a la solera del canal, manteniendo similitudes la forma de los perfiles (figura A2-31). Estos perfiles presentan un primer pico alrededor del 10 % del calado, disminuyendo ligeramente y a partir del 20 % del calado van aumentando ligeramente.

Comparando los perfiles muestreados para los mismos caudales, se observa que los perfiles obtenidos tras el aliviadero presentan mayores turbulencias, debido a la forma de entrada del flujo (figura A2-32).

VI.3.3.2 Comparación de los perfiles de los resaltos sumergidos.

Al igual que en el caso anterior, las velocidades se adimensionalizaron antes de su graficación y contraste.

En la parte central del resalto sumergido tras compuerta se obtienen perfiles prácticamente idénticos para los distintos caudales. En los tres casos las velocidades turbulentas aumenta con el calado (figura A2-33).

En los perfiles del resalto hasta mitad del aliviadero se aprecia nuevamente una gran similitud en la distribución de velocidades, aumentando la velocidad turbulenta conforme el calado (figura A2-34). Estos perfiles presentan una disminución de velocidades turbulentas alrededor del 15 % del calado.

Las velocidades turbulentas obtenidas en el resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero son muy similares a partir del 5 % del calado, obteniendo un pico de velocidades en la parte más cercana a la solera para el menor caudal debido a las perturbaciones producidas por la forma de la entrada del agua. El perfil del mayor caudal se separa ligeramente en la parte superior (figura A2-35).

En los perfiles obtenidos para los caudales de 4,18 y 3,48 l/seg se aprecian grandes similitudes, aumentando las velocidades turbulentas con el calado. En ambos casos, los perfiles obtenidos en el resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero presentan un brusco cambio de sentido de las velocidades turbulentas a partir del 50 % del calado para $Q=4,18$ l/seg y del 40 % para $Q=3,38$ l/seg. Estas reducciones son debidas a la forma de entrada del flujo (figuras A2-36 y A2-37).

Los perfiles obtenidos con $Q=2,78$ l/seg tras la compuerta y con una sumergencia hasta la mitad del aliviadero son muy similares, asemejándose la forma del tercer perfil a la de estos dos entre el 10 y el 40 % del calado. En el resalto de mayor sumergencia aparece en la parte más cercana a la solera un pico de velocidades turbulentas negativas que disminuye rápidamente y, a partir del 40 % del calado, vuelve a tener otro pico de velocidades negativas (figura A2-38).

VI.3.3.3 Perfiles de velocidades turbulentas adimensionalizadas con la velocidad media.

En las gráficas anteriores se observó que, aunque con el nuevo filtrado los datos se ajustaban más a los esperables, las velocidades turbulentas distaban aun de las teóricas, debido a la gran variabilidad existente en los datos del registro. Con el fin de obtener una forma de los perfiles de velocidades turbulentas más próxima a la obtenida en distintos trabajos experimentales se procedió a representar nuevamente las velocidades turbulentas adimensionalizándolas con la velocidad media de la parte de la sección muestreada (realizando un balance de masas con una altura de sección igual al mayor calado muestreado).

VI.3.3.3.1 Comparación de perfiles turbulentos en mitad de resaltos clásicos.

En los perfiles obtenidos en la parte central del resalto tras compuerta se observa que tanto las velocidades como el calado en el que se produce el máximo aumentan con el caudal trasegado (figura A2-39).

Comparando los perfiles obtenidos aguas abajo del aliviadero WES se observa que, al igual que en el caso anterior, la velocidad turbulenta aumenta con el caudal circulante. Los tres perfiles guardan gran similitud, aunque el obtenido con el menor $Q=2,78$ l/seg presenta una disminución de velocidad alrededor del 15 % del calado, donde los otros dos perfiles presentan el máximo (figura A2-40).

Los perfiles obtenidos aguas abajo del aliviadero presentan mayores velocidades, apareciendo a menores calados, que las obtenidas tras la compuerta para los dos mayores caudales. Los perfiles obtenidos tras aliviadero y compuerta para $Q= 2,78$ l/seg son muy similares, aunque por el 15 % del calado aparece una pequeña disminución de velocidad en el perfil tras el aliviadero (figura A2-41).

VI.3.3.3.2 Comparación de perfiles turbulentos en la parte central de resaltos sumergidos.

Comparando los perfiles obtenidos en la parte central del resalto sumergido tras compuerta se observa que los perfiles obtenidos para distintos caudales presentan una forma similar, obteniéndose las máximas velocidades alrededor del 20 % del calado (figura A2-42).

Observando los tres perfiles obtenidos en mitad de un resalto sumergido tras aliviadero, con profundidad de sumergencia hasta la mitad del aliviadero, se aprecian grandes similitudes, obteniendo las máximas velocidades turbulentas para el 10 % del calado. En estos perfiles la turbulencia aumenta conforme se incrementa el caudal (figura A2-43).

Los perfiles obtenidos en mitad de resaltos sumergidos tras aliviadero, con profundidad de sumergencia hasta la coronación del aliviadero, presentan grandes similitudes, apareciendo un máximo alrededor del 5% del calado y estabilizándose las velocidades turbulentas a partir del 50% del mismo. La magnitud de estos tres perfiles es muy superior a la de los casos anteriores debido a que la sección empleada para obtener la velocidad media para adimensionalizar las velocidades es superior a la de los casos anteriores, debido a una mayor profundidad de sumergencia del resalto (figura A2-44).

Comparando los perfiles obtenidos con $Q= 4,18$ l/seg se observan grandes similitudes entre los perfiles obtenidos tras la compuerta y con una profundidad de sumergencia hasta la mitad del aliviadero. La diferencia entre estos dos perfiles para el 10% del calado puede ser debida al efecto del torbellino que se produce aguas abajo del aliviadero, lo que aumenta la turbulencia en el fondo. La comparación con el perfil obtenido para el resalto con profundidad de sumergencia hasta la coronación del aliviadero no se puede realizar debido a la diferencia de magnitud entre perfiles, cuyo origen se explicó en el párrafo anterior (figura A2-45). Esta situación se repite caso de forma idéntica en los perfiles obtenidos con $Q=3,48$ l/seg (figura A2-46).

En los perfiles obtenidos en la parte central de resaltos sumergidos con $Q= 2,78$ l/seg se observa que la turbulencia aumenta con la profundidad de sumergencia. Se repite la situación anterior, salvo que, además, se presentan diferencias entre los perfiles de menor sumergencia debido al trasiego de un menor caudal, lo que provoca velocidades de diferente magnitud entre ambos perfiles (figura A2-47).

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

VII CONCLUSIONES

El objetivo buscado en la realización de este estudio ha sido, principalmente, la obtención de distribuciones de velocidad e índices dentro de resaltos hidráulicos estables y sumergidos, así como la medición de los índices turbulentos de las velocidades (raíz cuadrática media de las fluctuaciones de la velocidad en flujo turbulentos y covarianza entre las componentes de la velocidad horizontal y vertical).

Con este fin, se han realizado mediciones de velocidades en distintos puntos de varios tipos de resaltos hidráulicos, comparándose los perfiles de velocidades obtenidos con los encontrados en la bibliografía, así como las principales variables características.

VII.1 Variables características.

Las variables características de los resaltos tenidas en cuenta fueron las siguientes:

- Calado contraído y_1 .

En general los resultados obtenidos de la comparación del calado contraído medido y el obtenido a partir del coeficiente de contracción y la abertura de compuerta fueron bastante aceptables dada su gran similitud. De igual forma ocurrió aguas abajo del aliviadero, comparando el calado contraído con el obtenido por balance de masas a partir de la velocidad teórica al final del aliviadero.

- Calado secuente y_2 .

En la comparación del calado secuente se observa una gran diferencia entre el medido y el calculado teóricamente, obteniéndose valores inferiores en el muestreo a los teóricos. Esto puede ser debido en gran medida a la elección de una longitud de resalto inferior a la real y a los problemas de deflexiones en el canal ya comentadas en otros proyectos realizados en el mismo, en las que se ha observado que varían con el tiempo y la actividad del canal. Se obtuvo una diferencia media de 1,1 cm para el resalto tras la compuerta y de 1,5 cm para los resaltos tras el aliviadero.

- Calado sumergido y_3 .

El calado sumergido y_3 obtenido aguas abajo de la compuerta fue muy próximo al que se obtuvo aplicando la ecuación (I-41). No ocurrió así en los resaltos tras el aliviadero, originándose grandes variaciones, ya que la formulación del resalto sumergido es válida únicamente en este estudio para resaltos hidráulicos bajo compuerta.

- Longitud del resalto.

La mayor disparidad entre los datos medidos y teóricos se encuentra en este parámetro, junto al calado secuente, debido a la enorme dificultad que entraña visualizar en el canal de estudio en final del resalto, obteniéndose por lo general valores inferiores a los teóricos. En todo caso, las longitudes experimentales no distaron excesivamente de las teóricas, obteniéndose valores mucho más fiables para los resaltos tras la compuerta que tras el aliviadero. Se debe resaltar que aun no existe una clara relación para la obtención exacta de la longitud del resalto, sino que la mayoría son aproximaciones empíricas. Estas contradicciones teóricas sobre la longitud del resalto ya se manifestaron en el apartado IV-1.6.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

- Pérdida de energía.

Debido a los errores producidos en la medición del calado y_2 la comparación de los resultados con los valores teóricos de la figura I-9 quedan distorsionados. Sin embargo, los valores obtenidos de $\Delta E/E_1$ obtenidos fueron muy similares a la curva experimental obtenida por el U. S. Bureau of Reclamation, graficada en la figura I-10.

- Velocidades.

Pese a las limitaciones encontradas en las mediciones, la forma de los perfiles de velocidades obtenidos, tanto para resaltos clásicos como sumergidos, fueron muy similares a los descritos en la bibliografía. Cabe destacar una cierta carencia de información acerca de valores reales de distribuciones de velocidades dentro del resalto, sobre todo tras un aliviadero, por lo que la comparación con estudios teóricos afianzados no pudo realizarse debidamente. Aun así, los datos se contrastaron entre sí, dando fiabilidad a las mediciones debido a la repetición de resultados para diferentes caudales y estructuras de control.

- Velocidades turbulentas.

Las velocidades turbulentas medidas en algunos casos distaron de las teóricas. En un sentido estadístico, los RMS indican la desviación de los datos respecto de la velocidad media, por lo que, al registrarse gran variabilidad de valores en los muestreos (posiblemente por el movimiento del aparato por efecto del flujo turbulento), son lógicos los resultados que se obtuvieron aun tras la revisión y filtrado del conjunto inicial de datos.

VII.2 Conclusiones del trabajo experimental.

Se puede concluir que algunos datos obtenidos en la labor experimental se alejan en cierto modo de los teóricos, como es el caso de los calados secuentes, longitudes del resalto y los que derivan de ellos. El resto de los resultados obtenidos fue similar a los resultados previsibles teóricamente.

Se encontraron errores en los datos de velocidades muestreadas, cuya causa no ha podido ser debidamente identificada. Aun así, la forma de los perfiles de velocidades medias obtenidas en este estudio es muy similar a la que se recoge en distintas publicaciones especializadas.

Se debe resaltar que el ámbito de estudio que engloba este proyecto todavía no es suficientemente conocido, existiendo algunas carencias de información y de posibilidades de contraste con trabajos experimentales afianzados (la mayoría de las ecuaciones características de los distintos parámetros son empíricas). Esto puede ser también motivo de la inexactitud obtenida en algunos resultados.

ANEJO 1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO.

Datos filtrados de resalto bajo compuerta, muestreado a 10 Hz y Q = 12 m ³ /h													
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	N° de muestras	N° muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Vmag media
12-2a	10	100 cm/s	0,79	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	2942	97,68	Métrico	98,03	5,21	109,51
12-2a2	10	100 cm/s	1,05	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2916	96,97	Métrico	73,95	0,85	101,68
12-2b	10	100 cm/s	1,49	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2870	95,48	Métrico	49,82	-3,52	91,19
12-2c	10	100 cm/s	2,46	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2672	88,86	Métrico	14,77	-4,32	60,59
12-2d	10	100 cm/s	2,99	Todos	0,05-301,85	1-3019	3019	2261	74,89	Métrico	8,73	0,13	43,5
12-3a	10	100 cm/s	0,69	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	3010	99,97	Métrico	46,5	0,3	46,65
12-3b	10	100 cm/s	1,52	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	3005	100	Métrico	50,09	0,54	50,29
12-3c	10	100 cm/s	2,53	Todos	0,05-325,65	1-3257	3257	3251	99,82	Métrico	52,31	0,69	52,56
12-3d	10	100 cm/s	3,53	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	3006	100	Métrico	51,25	1,4	51,53
12-3e	10	100 cm/s	4,45	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	3000	99,77	Métrico	53,01	1,63	53,35
12-3f	10	100 cm/s	5,49	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2998	99,73	Métrico	51,85	2,18	52,32
12-a	10	100 cm/s	0,71	Todos	0,05-303,55	1-3036	3036	2978	98,09	Métrico	57,48	4,17	58,26
12-b	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2938	97,58	Métrico	64,16	5,47	65,05
12-c	10	100 cm/s	2,5	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2927	97,4	Métrico	71,12	7,09	72,52
12-d	10	100 cm/s	3,51	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	2989	99,24	Métrico	59,35	7,54	64,16
12-e	10	100 cm/s	4,55	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2932	97,44	Métrico	55,1	8,94	62,59
12-f	10	100 cm/s	5,53	Todos	0,05-301,35	1-3014	3014	1186	39,35	Métrico	30,45	9,99	45,89

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V_z'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% V_x	Interv. de conf. del 95% V_y	Comentarios
52,47	13,45	54,17	24,03	-2,34	-1,75	4,62	2,68	583,077	32,56	36,96	154,96	3,83	0,98	Medio
73,37	18,03	75,56	28,95	-1,16	-0,93	-0,29	-0,54	1190,607	30,19	37,31	155,76	5,38	1,32	Medio
80,3	19,59	82,66	31,76	-0,52	-0,42	-1,45	-1,36	1430,66	29,12	37,6	156,43	5,94	1,45	Medio
64,69	16,47	66,75	31,94	0,03	-0,11	-1,23	-1,12	912,78	21,31	38,48	158,49	4,96	1,26	Medio
50,31	12,89	51,93	29,68	-0,15	-0,34	-0,52	-0,3	525,868	18,45	36,91	154,85	4,19	1,07	Medio
8,93	3,61	9,63	8,88	0,09	-0,1	-0,21	0,67	-6,972	69,11	41,93	166,52	0,64	0,26	A 30 cm
9,38	4,33	10,33	9,31	0	-0,17	-0,2	0,63	-3,898	64,37	39,7	161,33	0,68	0,31	A 30 cm
9,27	4,86	10,47	9,17	-0,03	-0,27	0,49	0,61	0,924	59,67	38,89	159,44	0,64	0,34	A 30 cm
10,29	5,18	11,53	10,26	0,01	-0,07	0,25	0,1	11,953	46,81	40,28	162,68	0,74	0,37	A 30 cm
8,98	5,75	10,66	8,94	0,16	-0,14	0,62	0,2	11,327	57,23	41,58	165,7	0,65	0,42	A 30 cm
10,11	6,34	11,94	9,91	-0,38	-0,13	2,34	0,05	22,803	54,84	42,23	167,22	0,73	0,46	A 30 cm
19,16	7,31	20,51	18,65	0,06	-0,31	0,05	0,14	-22,891	34,54	40,26	162,63	1,39	0,53	Final suelo
19,73	8,32	21,41	19,3	-0,12	-0,37	-0,04	0,39	0,784	31,47	40,9	164,12	1,44	0,61	Final suelo
20,55	9,3	22,56	18,94	-1,2	-0,36	7,61	0,16	41,908	31	41,2	164,82	1,5	0,68	Final suelo
28,63	9,93	30,31	19,51	-2,81	-0,68	12,87	1,03	166,443	31,24	41,6	165,74	2,07	0,72	Final suelo
34,56	11,61	36,46	22,95	-2,4	-0,64	8,83	0,39	240,13	30,88	41,42	165,32	2,53	0,85	Final suelo
40,12	11,89	41,84	25,91	-1,64	-0,78	3,56	0,8	343,672	29,72	35,59	151,76	4,61	1,37	Final suelo

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos sin filtrar de resalto bajo compuerta, muestreado a 10 Hz y Q = 12 m ³ /h														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestreros tomados	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
12-2a	10	100 cm/s	0,79	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	-	-	Métrico	96,83	5,04	96,96	108,69
12-2a2	10	100 cm/s	1,05	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	-	-	Métrico	73,07	0,7	73,07	100,68
12-2b	10	100 cm/s	1,49	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	-	-	Métrico	48,55	-3,61	48,68	89,71
12-2c	10	100 cm/s	2,46	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	-	-	Métrico	14,63	-3,91	15,14	59,68
12-2d	10	100 cm/s	2,99	Todos	0,05-301,85	1-3019	3019	-	-	Métrico	8,24	0,56	8,26	41,61
12-3a	10	100 cm/s	0,69	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	-	-	Métrico	46,51	0,3	46,51	46,66
12-3b	10	100 cm/s	1,52	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	-	-	Métrico	50,09	0,54	50,09	50,29
12-3c	10	100 cm/s	2,53	Todos	0,05-325,65	1-3257	3257	-	-	Métrico	52,33	0,68	52,34	52,58
12-3d	10	100 cm/s	3,53	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	-	-	Métrico	51,25	1,4	51,27	51,53
12-3e	10	100 cm/s	4,45	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	-	-	Métrico	53,02	1,62	53,05	53,37
12-3f	10	100 cm/s	5,49	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	-	-	Métrico	51,86	2,18	51,9	52,33
12-a	10	100 cm/s	0,71	Todos	0,05-303,55	1-3036	3036	-	-	Métrico	57,58	4,15	57,73	58,38
12-b	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	-	-	Métrico	64,08	5,4	64,31	64,99
12-c	10	100 cm/s	2,5	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	-	-	Métrico	70,81	6,97	71,15	72,31
12-d	10	100 cm/s	3,51	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	-	-	Métrico	59,1	7,5	59,57	64,14
12-e	10	100 cm/s	4,55	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	-	-	Métrico	54,87	8,82	55,57	62,31
12-f	10	100 cm/s	5,53	Todos	0,05-301,35	1-3014	3014	-	-	Métrico	21,16	7,47	22,44	33,56

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

RMS V _x '	RMS V _y '	RMS V'	RMS V _{mag} '	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
53,35	13,58	55,06	24,88	-2,25	-1,69	4,19	2,46	595,151	32,09	36,92	154,85	3,85	0,98	Medio
73,24	18,05	75,43	29,86	-1,13	-0,9	-0,34	-0,56	1179,759	29,65	37,24	155,6	5,29	1,3	Medio
79,73	19,47	82,08	32,52	-0,48	-0,4	-1,46	-1,35	1399,391	28,42	37,52	156,26	5,76	1,41	Medio
64,02	16,37	66,08	32,13	0,02	-0,11	-1,17	-1,06	883,504	20,43	38,22	157,88	4,62	1,18	Medio
48,76	12,62	50,36	29,54	-0,17	-0,34	-0,35	-0,16	489,058	18,26	34,69	149,67	3,51	0,91	Medio
8,94	3,61	9,64	8,89	0,09	-0,1	-0,21	0,67	-6,986	69,09	41,93	166,52	0,65	0,26	A 30 cm
9,38	4,33	10,33	9,31	0	-0,17	-0,2	0,63	-3,898	64,37	39,7	161,33	0,68	0,31	A 30 cm
9,29	4,87	10,48	9,18	-0,03	-0,27	0,5	0,61	0,859	59,6	38,89	159,44	0,64	0,34	A 30 cm
10,29	5,18	11,53	10,26	0,01	-0,07	0,25	0,1	11,953	46,81	40,28	162,68	0,74	0,37	A 30 cm
9,01	5,76	10,69	8,97	0,16	-0,15	0,64	0,2	11,13	57,13	41,58	165,7	0,65	0,42	A 30 cm
10,16	6,35	11,98	9,95	-0,38	-0,13	2,36	0,04	23,135	54,79	42,22	167,18	0,73	0,46	A 30 cm
19,5	7,35	20,84	18,94	0,12	-0,31	0,4	0,13	-21,918	34,18	40,25	162,62	1,4	0,53	Final suelo
19,97	8,3	21,63	19,5	-0,15	-0,36	0,04	0,37	-0,034	31,07	40,91	164,13	1,44	0,6	Final suelo
21,19	9,35	23,16	19,25	-1,4	-0,37	9,37	0,18	44,606	30,61	41,21	164,84	1,53	0,68	Final suelo
29,12	10	30,79	19,58	-2,79	-0,7	12,42	1,04	172,245	31,11	41,59	165,73	2,1	0,72	Final suelo
34,57	11,64	36,48	23,15	-2,35	-0,64	8,62	0,41	237,56	30,58	41,37	165,22	2,5	0,84	Final suelo
34,35	9,98	35,77	25,63	-0,92	-0,21	2,67	0,83	244,465	32,6	23,44	123,52	2,48	0,72	Final suelo

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto bajo compuerta, muestreado a 25 Hz y $Q = 12 \text{ m}^3/\text{h}$

Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
12-1a	25	100 cm/s	0,74	Todos	0,02-300,9	1-7523	7523	7130	94,78	Métrico	86,37	0,84	86,38	106,65
12-1b	25	100 cm/s	1,52	Todos	0,02-310,42	1-7761	7761	7237	93,25	Métrico	30,66	-7,73	31,62	78,89
12-1c	25	100 cm/s	2,42	Todos	0,02-301,38	1-7535	7535	6238	82,79	Métrico	8,62	-3,29	9,23	56,64
12-2a	25	100 cm/s	0,72	Todos	0,02-301,18	1-7530	7530	7463	99,11	Métrico	54,52	3,16	54,61	55,6
12-2b	25	100 cm/s	1,47	Todos	0,02-300,82	1-7521	7521	7419	98,64	Métrico	62,01	4,58	62,18	63,69
12-2c	25	100 cm/s	2,46	Todos	0,02-300,7	1-7518	7518	7419	98,68	Métrico	67,13	6	67,4	69,62
12-2d	25	100 cm/s	3,49	Todos	0,02-302,22	1-7556	7556	7501	99,27	Métrico	57,74	6,28	58,08	63,53
12-2e	25	100 cm/s	4,46	Todos	0,02-301,22	1-7531	7531	7322	97,22	Métrico	56,99	7,67	57,51	68,18
12-2f	25	100 cm/s	5,44	Todos	0,02-300,58	1-7515	7515	5867	78,07	Métrico	45,05	8,7	45,88	58,15
12-3a	25	100 cm/s	0,77	Todos	0,02-300,38	1-7510	7510	7508	99,97	Métrico	47,37	0,49	47,37	47,61
12-3b	25	100 cm/s	1,52	Todos	0,02-300,54	1-7514	7514	7512	99,97	Métrico	49,36	0,44	49,36	49,69
12-3c	25	100 cm/s	2,46	Todos	0,02-300,74	1-7519	7519	7516	99,96	Métrico	50,45	0,42	50,45	50,81
12-3d	25	100 cm/s	3,52	Todos	0,02-300,26	1-7507	7507	7507	100	Métrico	48,98	0,38	48,98	49,35
12-3e	25	100 cm/s	4,48	Todos	0,02-301,06	1-7527	7527	7517	99,87	Métrico	53,42	1,57	53,44	53,93
12-3f	25	100 cm/s	5,48	Todos	0,02-310,34	1-7759	7759	7747	99,85	Métrico	52,07	1,96	52,1	52,62

RMS Vx'	RMS Vy'	RMS V'	RMS Vmag'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
68,93	15,84	70,73	32,99	-1,43	-1	0,73	0,47	739,745	35,07	34,21	148,55	3,23	0,74	Mitad resalto
79,19	18,42	81,31	37,22	0	-0,04	-1,54	-1,2	1077,231	29,89	36,62	154,16	3,69	0,86	Mitad resalto
62,7	15,7	64,64	32,48	0,09	-0,04	-0,91	-0,74	612,319	21,47	37,87	157,06	3,14	0,79	Mitad resalto
21,01	9,03	22,87	20,35	0,09	-0,38	0,18	0,24	-23,522	44,47	39,28	160,34	0,96	0,41	Final resalto
22,43	10,66	24,83	20,65	-0,8	-0,28	5,73	0,04	-6,674	39,8	39,53	160,92	1,03	0,49	Final resalto
24,08	11,73	26,78	20,33	-1,77	-0,35	10,92	-0,12	23,253	37,93	39,15	160,04	1,11	0,54	Final resalto
30,87	11,46	32,93	20,53	-2,79	-0,38	12,56	0,03	136,984	35,77	39,23	160,22	1,41	0,52	Final resalto
41,88	14,03	44,17	24,68	-2,42	-0,49	7,47	-0,28	301,517	33,83	39,9	161,8	1,94	0,65	Final resalto
42,37	13,84	44,57	26,64	-2,07	-0,45	5,81	-0,31	296,348	33,05	38,13	157,67	2,19	0,72	Final resalto
10,02	4,68	11,05	9,96	0,13	-0,17	-0,16	0,39	-8,28	71,52	38,92	159,52	0,46	0,21	A 30 cm
10,25	5,54	11,65	10,15	0,06	-0,2	0,38	0,29	-6,356	71,47	38,93	159,53	0,47	0,25	A 30 cm
9,9	5,94	11,55	9,83	0,03	-0,19	0,04	0,07	-3,08	70,46	38,77	159,15	0,45	0,27	A 30 cm
10,85	5,86	12,34	10,76	-0,02	-0,16	0,17	0,15	5,186	55,77	38,96	159,61	0,5	0,27	A 30 cm
10,38	7,02	12,53	10,24	-0,18	-0,14	1,56	0,06	12,839	64,94	39,16	160,06	0,47	0,32	A 30 cm
10,33	7,25	12,62	10,24	-0,1	-0,08	1,17	-0,07	21,064	65,13	40,93	164,19	0,46	0,33	A 30 cm

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto bajo compuerta, muestreado a 10 Hz, durante 10 minutos y $Q = 12 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
12-1a	10	100 cm/s	0,71	Todos	0,05-600,35	1-6004	6004	5712	95,14	Métrico	104,15	3,65	104,22	115,09
12-1b	10	100 cm/s	1,54	Todos	0,05-601,15	1-6012	6012	5238	87,13	Métrico	23,9	-7,98	25,19	70,47
12-1c	10	100 cm/s	2,5	Todos	0,05-601,65	1-6017	6017	4247	70,58	Métrico	4,95	-1,07	5,06	37,59
12-2a	10	100 cm/s	0,75	Todos	0,05-600,75	1-6008	6008	5877	97,82	Métrico	61,77	4,33	61,92	62,51
12-2b	10	100 cm/s	1,47	Todos	0,05-600,95	1-6010	6010	5900	98,17	Métrico	72,41	6,1	72,66	73,48
12-2c	10	100 cm/s	2,51	Todos	0,05-601,25	1-6013	6013	5913	98,34	Métrico	72,2	8,27	72,67	76,42
12-2d	10	100 cm/s	3,53	Todos	0,05-613,85	1-6139	6139	6000	97,74	Métrico	53,67	7,53	54,2	62,87
12-2e	10	100 cm/s	4,5	Todos	0,05-601,25	1-6013	6013	5851	97,31	Métrico	56,26	8,94	56,96	62,83
12-2f	10	100 cm/s	5,49	Todos	0,05-600,75	1-6008	6008	4790	79,73	Métrico	40,5	9,93	41,7	50,61
12-3a	10	100 cm/s	0,77	Todos	0,05-601,15	1-6012	6012	6012	100	Métrico	45,44	0,49	45,44	45,61
12-3b	10	100 cm/s	1,52	Todos	0,05-600,45	1-6005	6005	6001	99,93	Métrico	48,44	0,69	48,45	48,67
12-3c	10	100 cm/s	2,49	Todos	0,05-600,75	1-6008	6008	6007	99,98	Métrico	48,92	0,59	48,92	49,17
12-3d	10	100 cm/s	3,52	Todos	0,05-600,45	1-6005	6005	6005	100	Métrico	47,78	0,53	47,78	48
12-3e	10	100 cm/s	4,53	Todos	0,05-601,05	1-6011	6011	6007	99,93	Métrico	50,73	1,11	50,75	51,03
12-3f	10	100 cm/s	5,52	Todos	0,05-600,35	1-6004	6004	5999	99,92	Métrico	50,11	1,6	50,13	50,45

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
55,75	13,86	57,45	30,26	-2,06	-1,67	3,34	2,45	617,347	29,49	35,03	150,47	2,92	0,73	Mitad resalto
73,54	18,27	75,77	37,53	0,19	-0,05	-1,42	-1,28	1132,157	20,01	36,79	154,55	4,02	1	Mitad resalto
44,9	12,25	46,54	27,9	0,09	-0,31	-0,06	-0,03	394,653	15,13	36,52	153,93	2,73	0,74	Mitad resalto
20,28	7,45	21,6	19,84	-0,06	-0,3	-0,12	0,16	-14,623	31,99	39,47	160,79	1,05	0,38	Final resalto
21,1	8,58	22,77	19,99	-0,72	-0,38	3,64	0,22	20,532	30,54	39,53	160,94	1,09	0,44	Final resalto
29,37	10,27	31,12	20,24	-2,88	-0,79	14,08	1,24	147,97	31,71	39,61	160,61	1,51	0,53	Final resalto
37,16	11,31	38,84	22,2	-2,37	-0,79	7,26	0,88	295,139	27,78	40,59	162,91	1,9	0,58	Final resalto
33,26	11,74	35,27	23,26	-2,34	-0,64	9,18	0,34	231,812	30,83	40,52	163,23	1,72	0,61	Final resalto
36,31	11,54	38,1	25,08	-1,98	-0,6	6,33	0,51	268,797	30,83	37,59	156,42	2,08	0,66	Final resalto
9,4	3,74	10,12	9,34	0,13	-0,15	-0,11	0,55	-6,213	69,07	40,81	163,91	0,48	0,19	A 30 cm
9,62	4,51	10,63	9,54	0,1	-0,18	-0,01	0,41	-4,871	64,5	41,12	164,14	0,49	0,23	A 30 cm
8,83	4,68	10	8,72	-0,04	-0,2	1,65	0,38	-2,211	64,72	41,02	165,4	0,45	0,24	A 30 cm
8,4	4,52	9,54	8,35	-0,05	-0,17	-0,02	0,1	1,297	59,4	40,84	164,48	0,43	0,23	A 30 cm
8,19	5,26	9,74	8,1	-0,13	-0,2	1,65	0,17	6,707	61,99	40,25	163,09	0,42	0,27	A 30 cm
8,25	5,57	9,96	8,19	-0,12	-0,16	1,37	0,15	13,583	60,31	40,12	162,31	0,42	0,28	A 30 cm

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto bajo compuerta con $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestreros tomados	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
10-1a	10	100 cm/s	0,79	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2928	97,28	Métrico	102,27	6,91	102,51	108,58
10-1a2	10	100 cm/s	1,08	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2819	93,78	Métrico	78,71	3,97	78,81	95,56
10-1b	10	100 cm/s	1,46	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2704	90,04	Métrico	46,66	1	46,67	80,25
10-1c	10	100 cm/s	2	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2549	84,71	Métrico	36,48	1,81	36,53	66,71
10-2a	10	100 cm/s	0,77	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	2963	98,37	Métrico	52,93	3,79	53,06	53,72
10-2b	10	100 cm/s	1,54	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2933	97,47	Métrico	58,51	5,75	58,8	59,5
10-2c	10	100 cm/s	2,49	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2920	97,01	Métrico	62,67	6,63	63,02	63,83
10-2d	10	100 cm/s	3,46	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2996	99,73	Métrico	53,85	7,18	54,32	55,23
10-2e	10	100 cm/s	4,5	Todos	0,05-303,15	1-3032	3032	2652	87,47	Métrico	53,64	9,52	54,48	56,78
10-3a	10	100 cm/s	0,76	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	3011	100	Métrico	42,29	0,32	42,29	42,43
10-3b	10	100 cm/s	1,48	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	3012	100	Métrico	45,4	0,44	45,41	45,61
10-3c	10	100 cm/s	2,46	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	3006	99,97	Métrico	48,39	0,86	48,4	48,63
10-3d	10	100 cm/s	3,47	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	3009	100	Métrico	46,05	0,97	46,06	46,29
10-3e	10	100 cm/s	4,5	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	3002	99,97	Métrico	47,39	1,07	47,4	47,68
10-3f	10	100 cm/s	5,43	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	1223	40,69	Métrico	47,65	1,29	47,67	47,96

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V_z'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
41,32	10,8	42,71	23,28	-2,83	-2,04	8,66	5,22	340,557	31,44	31,97	143,34	3,02	0,79	Mitad resalto
60,88	14,97	62,7	31,75	-1,44	-1,27	0,99	0,94	743,55	24,6	33,23	146,29	4,54	1,12	Mitad resalto
71,24	17,65	73,39	33,51	-0,65	-0,69	-0,99	-0,79	1114,59	22,81	34,07	148,22	5,43	1,34	Mitad resalto
62,91	16,02	64,92	33,12	-0,57	-0,67	-0,77	-0,52	857,47	20,31	34,5	149,24	4,93	1,26	Mitad resalto
18,12	7,16	19,48	17,59	-0,04	-0,37	-0,12	0,18	-19,145	35,37	34,91	150,7	1,32	0,52	Final resalto
18,57	8,07	20,25	18,07	-0,07	-0,36	0,08	0,1	-7,252	32,86	35,18	150,82	1,36	0,59	Final resalto
18,47	8,67	20,41	17,72	-0,4	-0,35	1,31	0,17	13,508	32,07	35,3	151,08	1,35	0,64	Final resalto
17,7	7,81	19,34	16,57	-1,22	-0,12	9,4	0,24	55,259	31,72	35,62	151,84	1,28	0,56	Final resalto
24,87	9,85	26,75	21,44	-1,67	-0,49	9,32	0,35	112,319	30,12	34,53	149,79	1,91	0,76	Final resalto
8,13	3,39	8,81	8,09	0,15	-0,16	-0,24	0,49	-4,703	69,27	35,02	150,44	0,59	0,24	A 30 cm
8,63	4,15	9,57	8,55	-0,01	-0,09	-0,13	0,49	-4,955	66,23	35,25	150,48	0,62	0,3	A 30 cm
8,51	4,65	9,7	8,45	-0,03	-0,12	-0,01	0,14	-1,232	63	35,11	150,64	0,61	0,34	A 30 cm
8,66	4,56	9,79	8,61	-0,14	-0,12	-0,05	0,06	3,627	50,62	35,25	150,97	0,63	0,33	A 30 cm
7,6	5,04	9,12	7,57	0,08	-0,12	0,65	0,29	6,456	63,64	35,25	150,97	0,55	0,36	A 30 cm
8,04	5,21	9,58	8	-0,2	-0,22	0,6	0,09	11,226	60,24	31,42	142,08	0,91	0,59	A 30 cm

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto bajo compuerta con $Q = 8 \text{ m}^3/\text{h}$

Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
8-1a	10	100 cm/s	0,43	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2568	85,37	Métrico	64,64	5,47	64,87	72,38
8-1b	10	100 cm/s	0,9	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2342	77,94	Métrico	38,1	3,92	38,3	58,36
8-2a	10	100 cm/s	0,71	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2920	97,14	Métrico	65,49	5,64	65,74	66,18
8-2b	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2975	98,84	Métrico	70,63	9,2	71,23	72,37
8-2c	10	100 cm/s	2,51	Todos	0,05-309,35	1-3094	3094	3025	97,77	Métrico	61,87	11,43	62,91	66,09
8-2d	10	100 cm/s	3,04	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2749	91,48	Métrico	52,92	11,91	54,24	58,12
8-3a	10	100 cm/s	0,75	Todos	0,05-327,65	1-3277	3277	3277	100	Métrico	34,72	0,64	34,72	34,89
8-3b	10	100 cm/s	1,48	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	3004	100	Métrico	36,94	0,62	36,95	37,18
8-3c	10	100 cm/s	2,47	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	3000	99,9	Métrico	39,82	1,03	39,83	40,14
8-3d	10	100 cm/s	3,47	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	3008	100	Métrico	37,39	1,85	37,43	37,72
8-3e	10	100 cm/s	3,98	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2958	98,34	Métrico	39,7	1,82	39,74	40,03

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V_z'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% V_x	Interv. de conf. del 95% V_y	Comentarios
45,38	10,39	46,55	33,71	-1,03	-0,9	1,22	2,18	239,987	15,78	30,3	139,45	3,55	0,81	Mitad resalto
53,95	13,91	55,71	34,12	-0,58	-0,85	-0,16	0,52	566,204	14,88	32,36	143,77	4,41	1,14	Mitad resalto
19,38	6,59	20,48	18,99	-0,16	-0,26	0,19	0,61	-5,077	28,94	29,72	137,11	1,42	0,48	Final resalto
21,63	7,46	22,88	18,98	-1,77	-0,68	11,31	1,89	51,83	32,04	31,26	140,69	1,57	0,54	Final resalto
27,56	9,11	29,03	20,8	-2,56	-0,92	13,36	2,12	142,298	31,86	33,31	145,46	1,98	0,66	Final resalto
28,33	9,12	29,76	21,22	-2,45	-0,98	11,76	2,45	159,055	32,01	32,54	145,18	2,14	0,69	Final resalto
7,83	3,27	8,48	7,76	0,08	-0,19	-0,26	0,48	-4,887	63,3	29,69	138,05	0,54	0,23	A 30 cm
7,87	3,97	8,82	7,79	0,18	-0,09	0	0,29	-5,575	67,27	30,11	138,53	0,57	0,29	A 30 cm
8,97	4,64	10,1	8,79	-0,09	-0,12	0,77	0,23	-1,835	64,42	30,41	138,72	0,65	0,34	A 30 cm
9,19	4,53	10,24	9,11	-0,09	-0,09	-0,04	0,05	2,978	47,32	30,58	139,13	0,66	0,33	A 30 cm
7,49	4,72	8,85	7,42	0	-0,09	0,23	0,11	3,284	66,46	30,1	138,5	0,55	0,34	A 30 cm

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto sumergido bajo compuerta con $Q = 12 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
12-0a	10	100 cm/s	0,49	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2848	94,59	Métrico	146,04	2,65	146,06	154,47
12-0b	10	100 cm/s	0,95	Todos	0,05-307,45	1-3075	3075	2781	90,44	Métrico	74,88	-8,88	75,41	108,81
12-0c	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2260	75,06	Métrico	48,78	-10,75	49,95	86,59
12-0d	10	100 cm/s	1,9	Todos	0,05-301,35	1-3014	3014	1540	51,09	Métrico	19,17	-9,9	21,57	60,09
12-1a	10	100 cm/s	0,73	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2936	97,64	Métrico	87,76	-1,56	87,77	107,7
12-1b	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-301,25	1-3013	3013	2873	95,35	Métrico	40,83	-8,63	41,73	83,12
12-1c	10	100 cm/s	2,51	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2828	93,98	Métrico	24,3	-6,7	25,21	68,85
12-1d	10	100 cm/s	3,53	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2667	88,69	Métrico	13,08	-3,07	13,43	42,75
12-1e	10	100 cm/s	4,51	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2307	76,72	Métrico	3,16	-1,54	3,52	41,09
12-2a	10	100 cm/s	0,79	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2931	97,6	Métrico	56,36	3,77	56,49	57,42
12-2b	10	100 cm/s	1,5	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2923	97,24	Métrico	62,5	5,21	62,71	64,04
12-2c	10	100 cm/s	2,46	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2916	97,04	Métrico	62,31	6,21	62,62	65,38
12-2d	10	100 cm/s	3,54	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2969	98,8	Métrico	52,05	5,52	52,34	57,95
12-2e	10	100 cm/s	4,47	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2907	96,58	Métrico	54,5	6,84	54,93	61,9
12-2f	10	100 cm/s	5,45	Todos	0,05-301,25	1-3013	3013	2899	96,22	Métrico	42,73	5,58	43,09	55,32
12-2g	10	100 cm/s	6,5	Todos	0,05-300,05	1-3001	3001	2606	86,84	Métrico	36,08	6,29	36,62	46,67
12-2h	10	100 cm/s	7,46	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	1052	34,95	Métrico	35,96	9,44	37,17	43,52
12-3a	10	100 cm/s	0,75	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	3008	99,97	Métrico	40,66	0,96	40,67	40,91
12-3b	10	100 cm/s	1,54	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	3004	99,97	Métrico	42,12	0,99	42,14	42,5
12-3c	10	100 cm/s	2,49	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	3009	99,9	Métrico	44,39	0,95	44,4	44,75
12-3d	10	100 cm/s	3,48	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	3011	100	Métrico	40,6	0,67	40,6	40,95
12-3e	10	100 cm/s	4,48	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	3005	99,9	Métrico	45,28	1,49	45,3	45,75
12-3f	10	100 cm/s	5,5	Todos	0,05-302,05	1-3021	3021	3021	100	Métrico	45,23	1,78	45,27	45,8
12-3g	10	100 cm/s	6,5	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	3004	99,73	Métrico	43,82	1,96	43,86	44,41
12-3h	10	100 cm/s	7,51	Todos	0,05-303,55	1-3036	3036	2784	91,7	Métrico	42,96	2,77	43,05	43,65

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

RMS Vx'	RMS Vy'	RMS V'	RMS Vmag'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
62,79	14,47	64,44	40,33	-2,31	-0,11	3,86	5,9	-18,948	56,62	33,97	148	4,66	1,07	Bajo compuerta
95,32	24,25	98,36	59,31	-0,25	0	-1,54	-0,55	1186,39	38,13	33,75	147,49	7,16	1,82	Bajo compuerta
87,52	20,97	90	55,64	0,22	-0,01	-1,54	-0,88	1178,538	26,14	32,46	144,49	7,29	1,75	Bajo compuerta
69,53	17,86	71,79	44,8	0,75	-0,12	-0,56	-0,82	760,077	19,34	31,56	142,39	7,02	1,8	Bajo compuerta
69,52	16,62	71,48	34,82	-1,27	-0,96	0,31	0,06	813,922	31,82	35,38	151,28	5,08	1,21	Mitad resalto
78,81	18,66	80,98	37,26	-0,14	-0,06	-1,58	-1,3	1136,914	29,28	36,56	154,03	5,82	1,38	Mitad resalto
69,7	16,46	71,62	31,98	-0,16	0,17	-1,25	-0,93	751,038	25,41	37,79	156,88	5,19	1,23	Mitad resalto
46,96	12,13	48,5	26,54	-0,4	0,02	-0,16	0,07	263,549	19,35	38,2	157,83	3,6	0,93	Mitad resalto
48,2	13,64	50,09	28,85	-0,54	0	0,23	-0,08	314,827	24,77	36,6	154,12	3,97	1,12	Mitad resalto
23,21	8,24	24,63	22,39	0	-0,34	0,71	0,25	-9,471	32,53	37,53	156,27	1,7	0,6	Final resalto
24	10,13	26,05	22,6	-0,46	-0,43	2,54	0,12	14,9	30,88	38,01	157,4	1,76	0,74	Final resalto
26,67	11,31	28,97	22,03	-1,68	-0,43	9,43	0,02	59,82	30,68	38,29	158,06	1,96	0,83	Final resalto
29,87	11,24	31,92	19,99	-2,53	-0,46	10,7	0,31	161,989	29,35	38,14	157,7	2,17	0,82	Final resalto
33,83	13,45	36,41	22,63	-2,56	-0,5	10,72	-0,2	199,151	29,46	38,14	157,69	2,49	0,99	Final resalto
39,93	14,83	42,59	24,71	-2,24	-0,36	6,68	-0,5	320,236	29,52	39,05	159,82	2,94	1,09	Final resalto
35,22	14,3	38,01	24,65	-2,17	-0,28	8,11	-0,39	265,51	30,33	37,97	157,3	2,73	1,11	Final resalto
30,1	13,68	33,06	24,09	-1,4	-0,21	6,77	-0,39	209,549	26,61	34,75	151,3	3,68	1,67	Final resalto
10,3	4,28	11,15	10,22	0,29	-0,27	0,05	1,04	-1,847	68,27	37,3	156,25	0,74	0,31	A 30 cm
11	5,1	12,13	10,78	0,07	-0,14	0,87	0,62	-3,569	66,03	37,61	156,46	0,8	0,37	A 30 cm
10,77	5,46	12,07	10,7	0,17	-0,16	-0,04	0,14	2,677	63,34	37,86	157,04	0,78	0,39	A 30 cm
9,93	5,16	11,19	9,83	0,08	-0,18	-0,08	0,12	1,367	53,45	38,2	157,34	0,72	0,37	A 30 cm
9,65	6,37	11,56	9,63	0,22	-0,15	0,13	0,28	12,802	61,59	37,96	157,28	0,7	0,46	A 30 cm
9,69	6,83	11,86	9,6	0,12	-0,04	1,38	0,34	15,377	60,69	37,9	157,14	0,7	0,49	A 30 cm
9,31	6,98	11,64	9,31	-0,02	-0,06	0,65	0,06	16,071	60,19	37,99	157,34	0,67	0,5	A 30 cm
10,35	7,21	12,61	10,35	-0,01	0,02	0,95	0	24,661	42,76	37,04	155,13	0,78	0,54	A 30 cm

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto sumergido bajo compuerta con $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$

Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestreros tomados	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	N° de muestras	N° muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
10-0a	10	100 cm/s	0,52	Todos	0,05-301,35	1-3014	3014	2967	98,44	Métrico	157,94	2,36	157,96	161,48
10-0b	10	100 cm/s	0,96	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2906	96,77	Métrico	119,86	1,51	119,87	136,5
10-0c	10	100 cm/s	1,47	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2693	89,65	Métrico	107,86	-3,09	107,91	123,84
10-0d	10	100 cm/s	1,94	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	1967	65,44	Métrico	61,31	-6,54	61,66	86,32
10-1a	10	100 cm/s	0,71	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2934	97,64	Métrico	89,76	-4,68	89,88	113,46
10-1b	10	100 cm/s	1,51	Todos	0,05-300,15	1-3002	3002	2908	96,87	Métrico	55,04	-7,4	55,54	90,31
10-1c	10	100 cm/s	2,5	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2845	94,74	Métrico	28,79	-5,63	29,33	67,76
10-1d	10	100 cm/s	3,5	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2143	71,31	Métrico	13,57	-2,47	13,79	39,45
10-2a	10	100 cm/s	0,73	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2903	96,41	Métrico	68,01	4,04	68,13	69,43
10-2b	10	100 cm/s	1,55	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2919	96,94	Métrico	67,08	5,58	67,31	70,69
10-2c	10	100 cm/s	2,53	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2899	96,38	Métrico	60,71	5,2	60,94	69,14
10-2d	10	100 cm/s	3,5	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2925	97,14	Métrico	43,59	3,73	43,75	55,43
10-2e	10	100 cm/s	4,51	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2879	95,65	Métrico	36,49	2,96	36,61	52,84
10-2f	10	100 cm/s	5,5	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2627	87,33	Métrico	28,71	3,01	28,87	42,14
10-3a	10	100 cm/s	0,8	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	3011	99,97	Métrico	37,66	1,28	37,69	37,98
10-3b	10	100 cm/s	1,52	Todos	0,05-301,25	1-3013	3013	3010	99,9	Métrico	39,56	1,3	39,58	39,95
10-3c	10	100 cm/s	2,53	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	3004	99,87	Métrico	41,06	2,26	41,12	41,61
10-3d	10	100 cm/s	3,48	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	3012	100	Métrico	39,18	2,01	39,23	39,65
10-3e	10	100 cm/s	4,44	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	3004	99,9	Métrico	41,99	2,6	42,07	42,68
10-3f	10	100 cm/s	5,53	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2995	99,63	Métrico	41,97	3,14	42,09	42,72
10-3g	10	100 cm/s	6,52	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2992	99,57	Métrico	40,01	3,79	40,19	40,93
10-3h	10	100 cm/s	7,55	Todos	0,05-301,65	1-3017	3017	1163	38,55	Métrico	38,9	3,47	39,05	39,84

RMS V _x '	RMS V _y '	RMS V'	RMS V _{mag} '	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
40,88	9,74	42,02	25,33	-4,17	-0,93	16,42	16,59	54,404	58,6	33,16	146,12	2,97	0,71	Bajo compuerta
78,13	19,38	80,5	47,06	-1,41	-0,22	0,37	1,78	66,31	42,41	33,29	146,41	5,74	1,42	Bajo compuerta
72,25	16,52	74,11	42,41	-1,39	-1,01	0,47	0,79	802,622	30,79	33,21	146,22	5,51	1,26	Bajo compuerta
70,95	16,99	72,96	40,88	-0,52	-0,45	-1,1	-0,86	925,731	23,22	32,24	143,97	6,34	1,52	Bajo compuerta
77,38	18,26	79,51	39,07	-1,07	-0,85	-0,43	-0,58	1154,787	34,83	33,2	146,21	5,66	1,33	Mitad resalto
78,53	17,99	80,57	37,66	-0,48	-0,27	-1,26	-1,22	1116,926	29,93	34,42	149,04	5,77	1,32	Mitad resalto
66,29	16,23	68,25	30,42	-0,44	0,02	-0,94	-0,93	719,864	25,94	34,87	150,08	4,92	1,2	Mitad resalto
43,18	12,59	44,98	25,62	-0,68	-0,01	0,89	0,3	257,1	20,44	33,43	146,74	3,69	1,08	Mitad resalto
25,13	9,4	26,83	23,26	-0,85	-0,62	4,26	0,54	27,372	28,93	34,63	149,04	1,85	0,69	Final resalto
29,19	11,95	31,54	23	-1,87	-0,65	9,03	0,22	97,414	29,82	34,66	149,09	2,14	0,88	Final resalto
38,19	13,85	40,62	24,13	-2,18	-0,58	7,04	-0,11	277,019	29,37	34,33	148,35	2,81	1,02	Final resalto
39,36	13,27	41,53	23,79	-2	-0,37	5,23	-0,32	330,792	27,18	34,85	149,54	2,88	0,97	Final resalto
43,32	15,63	46,05	25,85	-1,89	-0,19	4,37	-0,71	380,345	29,07	35,11	150,14	3,2	1,15	Final resalto
36,26	15,5	39,44	24,75	-1,96	-0,06	6,29	-0,58	293,217	29,81	34,32	148,82	2,8	1,2	Final resalto
11,36	4,31	12,15	11,19	0,07	-0,35	0,18	0,78	-5,319	64,32	34,22	148,58	0,82	0,31	A 30 cm
11,28	5,1	12,38	11,13	0,07	-0,29	-0,15	0,45	0,543	64,4	34,26	148,18	0,81	0,37	A 30 cm
11,18	5,82	12,61	10,89	-0,08	-0,36	0,9	0,57	3,254	61,75	34,54	148,34	0,81	0,42	A 30 cm
9,78	5,58	11,26	9,68	-0,02	-0,24	-0,08	0,06	7,291	51,15	34,48	148,69	0,71	0,4	A 30 cm
10,81	6,94	12,85	10,63	-0,03	-0,14	1,63	0,13	19,115	59,92	34,71	148,73	0,78	0,5	A 30 cm
10,27	7,09	12,48	10,11	-0,19	-0,09	2,35	-0,02	20,128	59,68	34,77	148,85	0,74	0,51	A 30 cm
10,29	7,79	12,91	10,3	0,11	-0,15	0,8	0,02	30,609	58,95	34,32	148,31	0,75	0,56	A 30 cm
11,09	7,97	13,66	11,16	0,02	-0,04	0,26	-0,15	32,745	37,51	31,76	142,35	1,29	0,93	A 30 cm

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto sumergido bajo compuerta con $Q = 8 \text{ m}^3/\text{h}$

Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
8-0a	10	100 cm/s	0,48	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2444	81,33	Métrico	156,27	1,44	156,28	159,29
8-0b	10	100 cm/s	0,97	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	1041	34,64	Métrico	74,32	-10,32	75,03	102,54
8-1a	10	100 cm/s	0,51	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2909	96,87	Métrico	110,72	-1,08	110,73	119,79
8-1b	10	100 cm/s	0,99	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2885	95,85	Métrico	59,13	-7,32	59,58	88,17
8-1c	10	100 cm/s	1,52	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2810	93,57	Métrico	51,53	-4,79	51,75	79,92
8-1d	10	100 cm/s	2,01	Todos	0,05-301,45	1-3015	3015	2083	69,09	Métrico	36,05	-3,3	36,21	63,31
8-1e	10	100 cm/s	2,5	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	1017	33,79	Métrico	25,77	-1,78	25,83	52,98
8-2a	10	100 cm/s	0,76	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	2849	94,59	Métrico	71,9	5,43	72,1	73,29
8-2b	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-301,25	1-3013	3013	2902	96,32	Métrico	70,8	6,19	71,07	74,7
8-2c	10	100 cm/s	2,5	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2885	95,94	Métrico	55,32	4,73	55,52	64,72
8-2d	10	100 cm/s	3,51	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2861	95,24	Métrico	32,84	2,94	32,98	43,99
8-2e	10	100 cm/s	4,55	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	1646	54,68	Métrico	28,3	4,14	28,6	43,52
8-3a	10	100 cm/s	0,75	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2877	95,58	Métrico	29,77	1,28	29,8	30,09
8-3b	10	100 cm/s	1,5	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2872	95,48	Métrico	33,96	1,61	34	34,44
8-3c	10	100 cm/s	2,51	Todos	0,05-304,85	1-3049	3049	2942	96,49	Métrico	34,79	2,01	34,85	35,32
8-3d	10	100 cm/s	3,51	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2928	97,37	Métrico	32,47	2,22	32,54	33,02
8-3e	10	100 cm/s	4,5	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2920	97,17	Métrico	36,61	3,13	36,74	37,29
8-3f	10	100 cm/s	5,53	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2944	97,9	Métrico	35,34	3,09	35,47	36,06

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

RMS Vx'	RMS Vy'	RMS V'	RMS Vmag'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
39,14	9,44	40,26	25,9	-4,01	-2,44	15,81	17,2	172	45,2	26	127	3,13	0,76	Inicio resalto
82,02	20,8	84,62	47,7	-0,41	-0,42	-1,63	-1,45	1528	28,2	26	128	10,1	2,55	Inicio resalto
54,84	13,8	56,55	33,3	-1,86	-1,75	2,66	2,64	621	33,2	25	126	4,03	1,01	Mitad resalto
72,64	18,1	74,85	37,1	-0,49	-0,4	-1,32	-1,27	1171	28,3	27	131	5,36	1,33	Mitad resalto
66,42	16,8	68,51	31,4	-0,71	-0,37	-0,75	-1,01	930	27,4	28	132	4,96	1,26	Mitad resalto
57,7	15	59,62	29,3	-0,71	-0,17	-0,37	-0,75	668	26,3	27	132	5,01	1,31	Mitad resalto
52,21	14,1	54,07	28	-0,84	-0,06	0,24	-0,61	514	26,3	27	132	6,48	1,74	Mitad resalto
25,29	9,9	27,16	23,8	-0,58	-0,58	2,22	0,31	30,5	26,3	27	130	1,88	0,73	Final resalto
31,86	11,4	33,84	24,8	-1,69	-0,68	6,63	0,42	154	28,8	27	131	2,34	0,84	Final resalto
39,4	13,7	41,71	25,2	-1,93	-0,5	5,61	-0,27	327	29,3	27	131	2,9	1,01	Final resalto
36,18	11,9	38,1	24,6	-1,54	-0,24	4,16	-0,1	299	25,8	28	133	2,68	0,88	Final resalto
39,17	15,2	42	26,2	-1,76	-0,22	4,78	-0,6	366	29,8	27	132	3,82	1,48	Final resalto
10,1	3,86	10,81	9,96	0,09	-0,29	-0,41	0,5	-2,73	60,8	26	129	0,75	0,28	A 30 cm
10,62	5,04	11,76	10,4	0	-0,25	-0,06	0,49	-0,52	61	26	129	0,79	0,37	A 30 cm
9,82	5,4	11,21	9,65	-0,04	-0,28	0,29	0,36	4,63	64,9	26	129	0,72	0,39	A 30 cm
9,83	5,35	11,19	9,68	-0,09	-0,06	0,01	-0,11	6,73	47,8	26	130	0,72	0,39	A 30 cm
9,44	6,2	11,3	9,34	0,18	-0,06	1,07	0,13	14,6	64,7	26	129	0,69	0,45	A 30 cm
8,86	6,47	10,97	8,83	0	-0,16	0,1	0,06	15,2	64,4	27	131	0,65	0,47	A 30 cm

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto aguas abajo de aliviadero y $Q = 12 \text{ m}^3/\text{h}$

Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
12-1a	10	100 cm/s	0,81	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2649	87,98	Métrico	64,48	0,96	64,49	73,88
12-1b	10	100 cm/s	1,51	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2679	89,03	Métrico	48,27	2,04	48,32	58,8
12-1c	10	100 cm/s	2,52	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2776	92,23	Métrico	26,86	3,2	27,05	37,8
12-1d	10	100 cm/s	3,52	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2582	85,89	Métrico	12,03	5,5	13,23	25,55
12-2a	10	100 cm/s	0,75	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2968	98,77	Métrico	81,09	5,03	81,25	81,53
12-2b	10	100 cm/s	1,48	Todos	0,05-301,55	1-3016	3016	2976	98,67	Métrico	79,56	7,21	79,88	81,1
12-2c	10	100 cm/s	2,47	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2965	98,6	Métrico	69,86	8,5	70,37	72,84
12-2d	10	100 cm/s	3,54	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2982	99,17	Métrico	52,39	9,21	53,2	58,33
12-2e	10	100 cm/s	4,51	Todos	0,05-302,15	1-3022	3022	2963	98,05	Métrico	42,91	9,65	43,99	49,74
12-2f	10	100 cm/s	5,49	Todos	0,05-300,05	1-3001	3001	2415	80,47	Métrico	27,91	10,92	29,97	35,95

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V_z'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
50,17	11,99	36,89	36,89	-0,72	-0,99	0,42	1,77	319,785	15,95	40,02	161,56	3,86	0,92	Mitad
44,74	11,24	31,69	31,69	-0,69	-0,81	0,6	1,37	298,109	16,87	42,13	166,47	3,42	0,86	Mitad
34,67	9,31	24,33	24,33	-0,61	-0,42	1,21	0,88	184,777	18,37	43,25	169,58	2,61	0,7	Mitad
27,82	8,23	19,07	19,07	-0,48	-0,11	2,29	0,84	94,962	18,58	39,68	161,27	2,17	0,64	Mitad
20,8	5,98	20,57	20,57	-0,11	-0,18	0,14	0,48	0,698	31,96	37,3	155,74	1,51	0,43	Final
24,72	7,69	21,8	21,8	-1,38	-0,65	7,59	1,84	59,421	32,47	37,98	157,33	1,79	0,56	Final
27,37	8,63	21,69	21,69	-2,1	-0,87	10,68	2,24	128,444	32,22	38,87	159,39	1,99	0,63	Final
30,85	9,87	21,84	21,84	-2,29	-0,77	9,25	1,49	206,412	29,83	40,21	162,52	2,24	0,72	Final
30,65	10,58	22,63	22,63	-2,1	-0,65	8,4	0,79	204,625	31,33	41,51	165,54	2,23	0,77	Final
27,67	9,61	21,52	21,52	-1,65	-0,4	7,61	0,57	150,997	31,28	38,15	157,73	2,23	0,77	Final

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto aguas abajo de aliviadero y $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestreros tomados	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
10-1a	10	100 cm/s	0,74	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2309	76,86	Métrico	27,26	1,57	27,31	43,36
10-1b	10	100 cm/s	1,52	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2641	87,71	Métrico	26,72	2,74	26,86	37,29
10-1c	10	100 cm/s	2,51	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2573	85,48	Métrico	15,52	5,05	16,32	27,7
10-2a	10	100 cm/s	0,77	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2968	98,8	Métrico	75,51	5,91	75,74	76,13
10-2b	10	100 cm/s	1,54	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2946	98,1	Métrico	62,25	7,33	62,68	68,75
10-2c	10	100 cm/s	2,55	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2950	98,14	Métrico	55,64	9,07	56,37	60,53
10-2d	10	100 cm/s	3,5	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2969	98,8	Métrico	37,14	9,14	38,24	46,25
10-2e	10	100 cm/s	4,51	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2570	85,5	Métrico	25,88	10,06	27,77	34,76

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V_z'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% V_x	Interv. de conf. del 95% V_y	Comentarios
45,05	10,83	46,34	31,82	-0,11	-0,44	0,57	1,03	192,58	12,15	41,02	163,9	3,71	0,89	Medio
35,2	8,91	36,31	25,46	-0,33	-0,42	0,85	1,47	142,817	15,04	42,62	167,62	2,71	0,69	Medio
29,05	7,79	30,07	20,08	-0,1	-0,16	1,32	1,19	90,472	16,03	40,96	163,75	2,27	0,61	Medio
20,73	6,11	21,62	20,22	-0,41	-0,25	1,64	0,81	18,609	32,69	36,57	153,56	1,51	0,44	Final
36,25	10,15	37,64	24,87	-1,81	-1,2	5,55	2,74	239,495	28,67	38,43	157,87	2,64	0,74	Final
30,26	9,49	31,71	22,79	-2,02	-0,84	8,62	1,9	184,607	31,6	39,88	161,24	2,21	0,69	Final
32,72	10,17	34,26	22,31	-2,15	-0,77	7,31	1,38	232,294	29,36	41,59	165,22	2,38	0,74	Final
28,43	9,6	30,01	21,52	-1,8	-0,36	7,96	0,81	152,172	30,92	39,22	159,71	2,22	0,75	Final

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto aguas abajo de aliviadero y $Q = 8 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestreros tomados	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
8-1a	10	100 cm/s	0,52	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2411	80,23	Métrico	3,18	1,31	3,44	24,23
8-1b	10	100 cm/s	1,03	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	1702	56,62	Métrico	1,79	1,49	2,32	22,61
8-1c	10	100 cm/s	1,49	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2553	84,96	Métrico	20,06	3,74	20,41	34,53
8-1d	10	100 cm/s	2	Todos	0,05-302,35	1-3024	3024	2581	85,35	Métrico	15,07	4,98	15,88	29,96
8-2a	10	100 cm/s	0,74	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2976	99,1	Métrico	62,31	7,24	62,73	63,28
8-2b	10	100 cm/s	1,48	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2990	99,34	Métrico	56,33	9,55	57,13	60,87
8-2c	10	100 cm/s	2,51	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2934	97,67	Métrico	39,37	10,71	40,8	52,33
8-2d	10	100 cm/s	3,46	Todos	0,05-301,25	1-3013	3013	2585	85,79	Métrico	22,31	11,31	25,01	34,39

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V_z'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% V_x	Interv. de conf. del 95% V_y	Comentarios
29,14	7,65	30,12	18,21	0	-0,12	1,02	0,89	38,597	12,14	40,33	161,8	2,35	0,62	Medio
26,8	7,11	27,73	16,21	0,09	0	0,56	0,67	28,401	12,72	37,92	156,18	2,57	0,68	Medio
35,74	9,65	37,02	24,38	-0,4	-0,46	0,9	1,36	183,171	14,12	42,25	166,25	2,8	0,76	Medio
32,11	8,8	33,3	21,52	-0,44	-0,4	1,24	1,62	131,29	14,4	41,72	165,02	2,5	0,69	Medio
21,55	6,39	22,48	20,9	-0,38	-0,33	1,51	0,57	30,004	32,59	36,39	153,12	1,56	0,46	Final
30,08	9	31,4	23,32	-1,78	-1	7,3	2,83	153,402	30,31	38,62	158,32	2,18	0,65	Final
39,79	11,56	41,44	25,36	-1,81	-1,1	4,38	1,77	349,748	27,96	41,38	164,22	2,91	0,85	Final
31,2	9,55	32,63	22,52	-1,45	-0,54	5,09	1,22	187,512	24,35	39,22	159,21	2,43	0,74	Final

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto sumergido hasta mitad del aliviadero y $Q = 12 \text{ m}^3/\text{h}$

Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
12-0a	10	100 cm/s	0,49	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2959	98,44	Métrico	51,17	22,1	55,74	99,02
12-0b	10	100 cm/s	1,03	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2920	97,24	Métrico	60,21	20,21	63,51	102,81
12-0c	10	100 cm/s	1,45	Todos	0,05-301,75	1-3018	3018	2894	95,89	Métrico	86,86	10,96	87,54	116,91
12-0d	10	100 cm/s	2,03	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2606	86,58	Métrico	83,85	4,79	83,99	106,84
12-0e	10	100 cm/s	2,46	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2006	66,62	Métrico	50,98	0,07	50,98	73,86
12-1a	10	100 cm/s	0,73	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2976	99,07	Métrico	121,53	0,98	121,54	123,94
12-1b	10	100 cm/s	1,51	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2934	97,67	Métrico	92,73	1,38	92,74	99,4
12-1c	10	100 cm/s	2,53	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2927	97,27	Métrico	62,06	1,07	62,07	70,89
12-1d	10	100 cm/s	3,51	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2914	96,78	Métrico	35,37	-0,7	35,38	44,21
12-1e	10	100 cm/s	4,54	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2869	95,35	Métrico	22,03	-3,81	22,36	34,36
12-1f	10	100 cm/s	5,49	Todos	0,05-304,65	1-3047	3047	1982	65,05	Métrico	4,17	-5,01	6,52	23,32
12-2a	10	100 cm/s	0,75	Todos	0,05-300,15	1-3002	3002	2944	98,07	Métrico	88,08	3,74	88,16	88,55
12-2b	10	100 cm/s	1,5	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	2924	97,08	Métrico	84,05	4,62	84,18	85,27
12-2c	10	100 cm/s	2,48	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2896	96,37	Métrico	73,84	4,51	73,98	76,34
12-2d	10	100 cm/s	3,49	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2991	99,5	Métrico	53,86	3,3	53,97	57,47
12-2e	10	100 cm/s	4,49	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2898	96,41	Métrico	47,63	2,18	47,68	52,03
12-2f	10	100 cm/s	5,46	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2927	97,4	Métrico	34,92	0,32	34,93	40,06
12-2g	10	100 cm/s	6,52	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2449	81,34	Métrico	24,71	-0,34	24,71	31,06

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

RMS Vx'	RMS Vy'	RMS V'	RMS Vmag'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
96,37	22,21	98,9	55,5	0,31	-0,31	-1,87	-1,79	-2064,27	54,67	35,68	150,98	7,02	1,62	Inicio
96,62	21,61	99,01	57,14	0,12	-0,14	-1,87	-1,75	-1965,5	46,31	35,6	150,8	7,08	1,58	Inicio
91,68	20,48	93,93	53,08	-0,55	0,31	-1,49	-0,77	-1434,34	34,7	35,55	150,67	6,75	1,51	Inicio
80,19	17,14	82	48,6	-0,74	0,34	-0,93	0,3	-632,024	23,39	34,84	149,53	6,22	1,33	Inicio
67,59	14,75	69,18	43,92	-0,3	-0,68	-1,03	0,39	501,769	17,2	33,01	145,77	5,98	1,3	Inicio
34,31	8,13	35,26	25,54	-2,84	-1,62	12,41	5,98	158,706	35,62	38,86	158,88	2,49	0,59	Mitad
43,66	11,39	45,12	27,47	-2,08	-1,19	5,37	1,94	342,706	31,1	39,25	159,79	3,19	0,83	Mitad
41,4	12,46	43,23	26,39	-1,87	-0,49	5,32	0,1	304,465	29,28	39,29	159,87	3,03	0,91	Mitad
33,35	11,84	35,39	23,44	-1,46	-0,18	4,83	-0,13	215,027	27,34	39,94	160,87	2,45	0,87	Mitad
30,79	14,53	34,05	21,86	-0,78	-0,02	4,71	-0,31	214,492	29,29	39,6	160,58	2,28	1,07	Mitad
23,29	13,24	26,79	14,71	-0,47	0,16	2,91	-0,07	118,65	30,36	36,27	152,85	2,07	1,18	Mitad
20,83	7,17	22,03	20,4	-0,46	-0,68	0,67	1,09	29,577	31,79	38,77	158,66	1,52	0,52	Final
25,33	9,1	26,92	23,23	-1,26	-0,68	6,77	0,58	93,295	30,11	38,56	158,68	1,86	0,67	Final
28,03	11,23	30,2	23,6	-1,52	-0,54	6,85	0,06	163,99	29,29	39,32	159,93	2,06	0,83	Final
26,53	10,63	28,58	20,64	-1,96	-0,32	9,41	0,01	177,043	33,62	38,94	159,55	1,92	0,77	Final
27,47	13,12	30,44	22,19	-1,56	-0,14	7,88	-0,57	195,874	29,6	39,38	160,58	2,02	0,97	Final
25,29	13,17	28,52	20,7	-1,17	0,01	6,65	-0,4	174,738	30,95	38,85	159,35	1,85	0,96	Final
23,66	12,62	26,82	19,11	-0,79	0,19	6,26	-0,2	137,349	32,87	37,65	156,57	1,89	1,01	Final

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto sumergido hasta mitad del aliviadero y $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
10-0a	10	100 cm/s	0,51	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2961	98,5	Métrico	130,68	5,11	130,78	144,62
10-0b	10	100 cm/s	1,06	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2961	98,47	Métrico	140,15	2,68	140,18	148,41
10-0c	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2887	96,11	Métrico	125,98	0,65	125,98	134,33
10-0d	10	100 cm/s	2,11	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2766	92,11	Métrico	73,51	-1,61	73,53	96,26
10-0e	10	100 cm/s	2,53	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	2289	76	Métrico	37,87	0,47	37,88	62,86
10-1a	10	100 cm/s	0,8	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2978	98,94	Métrico	117,73	2,34	117,75	119,5
10-1b	10	100 cm/s	1,51	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2939	97,71	Métrico	91,45	3,39	91,51	97,27
10-1c	10	100 cm/s	2,5	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2889	96,17	Métrico	58,46	2,44	58,51	67,43
10-1d	10	100 cm/s	3,53	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2949	97,94	Métrico	29,09	0,49	29,1	37,49
10-1e	10	100 cm/s	4,5	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2418	80,31	Métrico	12,96	-2,1	13,13	27,68
10-2a	10	100 cm/s	0,79	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2933	97,47	Métrico	90,17	2,87	90,21	90,67
10-2b	10	100 cm/s	1,49	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2908	96,61	Métrico	80,97	3,78	81,06	82,24
10-2c	10	100 cm/s	2,5	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2903	96,54	Métrico	64,75	3,33	64,83	67,3
10-2d	10	100 cm/s	3,5	Todos	0,05-300,15	1-3002	3002	2976	99,13	Métrico	43,89	2,11	43,94	46,95
10-2e	10	100 cm/s	4,46	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2912	96,78	Métrico	32,74	-0,93	32,76	37,9
10-2f	10	100 cm/s	5,53	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2698	89,84	Métrico	19,06	-2,65	19,25	27,29
10-2g	10	100 cm/s	6,24	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	887	29,52	Métrico	17,2	-1,79	17,29	25,68

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

RMS Vx'	RMS Vy'	RMS Vz'	RMS Vmag'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
72,67	16,77	74,58	41,82	-1,77	1,72	1,23	1,18	-1178,8	53,16	33,23	145,79	5,29	1,22	Inicio
58,09	12,83	59,49	34,09	-2,57	2,04	5,11	4,75	-599,505	42,46	33,73	146,44	4,23	0,93	Inicio
56,42	13,01	57,9	34,31	-2,29	-1,45	4,3	4,15	387,106	31,46	33,96	146,97	4,16	0,96	Inicio
70,94	17,26	73,01	38,33	-0,87	-0,89	-0,73	-0,4	1026,225	23,9	34,45	148,12	5,34	1,3	Inicio
59,07	14,6	60,84	34,42	-0,45	-0,59	-0,8	-0,36	685,515	20,84	33,18	145,67	4,89	1,21	Inicio
31,39	7,55	32,28	25,06	-2,46	-1,75	10,71	6,8	143,383	33,86	36,04	151,82	2,28	0,55	Medio
41,07	11,14	42,55	26,88	-2,09	-1,39	5,8	2,61	339,325	30,63	36,53	152,95	3	0,81	Medio
40,72	12,75	42,67	26,39	-1,55	-0,61	3,29	0,07	371,591	29	37,03	154,11	3	0,94	Medio
29,86	11,24	31,91	21,43	-1,16	-0,21	3,9	0,29	204,387	26,57	37,29	154,73	2,18	0,82	Medio
28,14	13	31	19,14	-0,76	-0,06	3,62	-0,14	186,198	29,72	35,29	150,07	2,27	1,05	Medio
21,96	7,19	23,11	21,25	-0,84	-0,67	3,03	1,08	39,403	30,23	35,59	150,77	1,61	0,53	Final
25,46	9,59	27,21	23,39	-1,01	-0,65	3,7	0,49	115,682	29,03	35,91	151,51	1,87	0,7	Final
27,74	11,28	29,94	23,89	-1,35	-0,5	6,63	-0,01	170,832	28,83	36,29	152,41	2,04	0,83	Final
23,75	10,41	25,93	19,96	-1,32	-0,19	7,08	0,14	146,601	33,54	36,33	152,5	1,72	0,76	Final
24,71	12,62	27,75	20,16	-0,75	-0,05	4,55	-0,31	152,391	29,34	36,45	152,76	1,81	0,93	Final
22,53	12,44	25,74	16,97	-0,14	0,13	2,29	-0,14	126,614	33,33	35,55	150,67	1,72	0,95	Final
21,42	12,67	24,89	16,08	0,19	0,17	0,81	-0,18	109,74	33,94	32,95	144,62	2,85	1,68	Final

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto sumergido hasta mitad del aliviadero y $Q = 8 \text{ m}^3/\text{h}$

Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	Nº de muestras	Nº muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
8-0a	10	100 cm/s	0,51	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2921	97,01	Métrico	151,41	1,06	151,41	152,44
8-0b	10	100 cm/s	1	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2939	97,71	Métrico	136,57	2,44	136,6	139,96
8-0c	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-304,95	1-3050	3050	2952	96,79	Métrico	101,15	2,94	101,19	114,72
8-0d	10	100 cm/s	2,04	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2817	93,56	Métrico	71,27	4,39	71,41	85,74
8-0e	10	100 cm/s	2,57	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2624	87,32	Métrico	39,15	4,94	39,46	60,91
8-1a	10	100 cm/s	0,75	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2992	99,5	Métrico	122,55	3,93	122,62	123,96
8-1b	10	100 cm/s	1,5	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2931	97,5	Métrico	86,59	4,76	86,72	97,46
8-1c	10	100 cm/s	2,47	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2871	95,6	Métrico	55	4,03	55,15	70,6
8-1d	10	100 cm/s	3,49	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2844	94,67	Métrico	29,48	2,7	29,6	40,39
8-1e	10	100 cm/s	4,5	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	514	17,11	Métrico	14,01	2,64	14,26	29,82
8-2a	10	100 cm/s	0,77	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2954	98,17	Métrico	92,5	4,87	92,62	93,04
8-2b	10	100 cm/s	1,5	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2919	96,94	Métrico	84,74	6,96	85,03	86,53
8-2c	10	100 cm/s	2,48	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2908	96,58	Métrico	66,92	7,01	67,28	70,3
8-2d	10	100 cm/s	3,53	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2961	98,44	Métrico	41,68	5,17	42	46,57
8-2e	10	100 cm/s	4,51	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2890	96,21	Métrico	33,2	3,37	33,37	39,51
8-2f	10	100 cm/s	5,44	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	1155	38,44	Métrico	19,74	3,56	20,05	29,75

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
23,99	5,55	24,62	17,12	-5,68	1,64	40,22	26,44	-40,679	41,41	28,02	133,17	1,76	0,41	Inicio
37,39	9,18	38,5	23,49	-3,72	-2,88	14,7	11,99	252,177	35,73	28,59	134,48	2,73	0,67	Inicio
60,05	14,93	61,88	30,13	-1,85	-1,75	2,12	2,08	812,678	29,99	29,67	136,99	4,38	1,09	Inicio
53,18	13,28	54,82	27,4	-1,62	-1,3	1,92	1,33	602,995	26,77	30,81	139,65	3,97	0,99	Inicio
52,41	13,68	54,16	27,92	-1,16	-0,72	0,59	-0,01	616,122	25,71	31,23	140,62	4,05	1,06	Inicio
28,29	7,15	29,18	22,78	-2,78	-2,24	13,17	10,25	132,988	33,83	29,46	136,51	2,05	0,52	Medio
50,12	13,3	51,86	26,65	-1,96	-1,55	3,55	2,16	570,238	30,21	30,66	139,3	3,67	0,97	Medio
49,66	14,07	51,61	26,83	-1,49	-0,76	1,94	0	567,129	28,57	31,06	140,23	3,67	1,04	Medio
34,64	11,8	36,6	24,16	-1,24	-0,19	3,18	-0,18	270,178	25,22	31,69	141,69	2,57	0,88	Medio
30,69	14,06	33,76	21,28	-0,86	-0,06	3,53	-0,42	237,66	30,25	29,69	137,04	5,36	2,46	Medio
21,95	6,76	22,96	21,21	-0,87	-0,67	3	1,53	29,779	29,62	28,56	134,41	1,6	0,49	Final
26,7	9,08	28,2	23,16	-1,69	-0,96	7,84	1,59	126,377	29,11	29,28	136,1	1,96	0,67	Final
28,72	10,82	30,69	22,96	-1,91	-0,75	8,45	0,56	185,528	29,16	29,95	137,64	2,11	0,79	Final
27,39	10,59	29,37	21,39	-1,74	-0,29	7,43	0,12	191,799	29,27	30,19	138,21	1,99	0,77	Final
27,26	13,05	30,23	21,6	-1,2	-0,16	5,46	-0,34	201,52	29,65	30,2	138,23	2,01	0,96	Final
26,73	13,32	29,87	20,22	-1,14	0,04	6,09	-0,41	192,768	31,68	28,96	135,34	3,11	1,55	Final

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero y $Q = 12 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	N° de muestras	N° de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
12-0a	10	100 cm/s	0.74	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2992	99.47	Métrico	-5.85	1.22	5.97	95.2
12-0b	10	100 cm/s	1.47	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	3002	99.83	Métrico	-33.1	8.87	34.27	96.84
12-0c	10	100 cm/s	3.03	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	3008	100	Métrico	-9.5	6.13	11.31	98.73
12-0d	10	100 cm/s	4.54	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2951	98.17	Métrico	75.62	-13.81	76.88	89.65
12-0e	10	100 cm/s	5.98	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2907	96.71	Métrico	36.26	-7.77	37.08	39.17
12-0f	10	100 cm/s	7.52	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2974	99	Métrico	-4.49	-5.39	7.02	14.89
12-0g	10	100 cm/s	8.98	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	3001	99.8	Métrico	-15.48	-6.09	16.63	18.02
12-0h	10	100 cm/s	10.03	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	1916	63.8	Métrico	-17.16	-5.6	18.05	19.05
12-1a	10	100 cm/s	0.74	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	3001	99.77	Métrico	110.78	-0.65	110.78	110.86
12-1b	10	100 cm/s	1.46	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	2998	99.54	Métrico	104.1	-0.65	104.1	104.33
12-1c	10	100 cm/s	3.01	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2989	99.37	Métrico	82.36	0.54	82.36	83.09
12-1d	10	100 cm/s	4.51	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2946	97.97	Métrico	59.49	-0.02	59.49	61.94
12-1e	10	100 cm/s	5.97	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2940	97.67	Métrico	31.3	-1.92	31.36	37.04
12-1f	10	100 cm/s	7.46	Todos	0,05-309,85	1-3099	3099	3042	98.16	Métrico	7.06	-4.44	8.34	21.27
12-1g	10	100 cm/s	9	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2966	98.54	Métrico	-9.55	-7.24	11.99	20.63
12-1h	10	100 cm/s	9.99	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	1957	65	Métrico	-14.34	-7.45	16.16	21.85
12-2a	10	100 cm/s	0.76	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2997	99.6	Métrico	90.67	2.16	90.69	90.82
12-2b	10	100 cm/s	1.52	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2992	99.37	Métrico	86.04	2.89	86.09	86.32
12-2c	10	100 cm/s	2.99	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2996	99.67	Métrico	73.56	3.15	73.63	74.2
12-2d	10	100 cm/s	4.49	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2957	98.34	Métrico	59.84	2.81	59.91	60.99
12-2e	10	100 cm/s	5.99	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2966	98.51	Métrico	44.22	2.15	44.28	46.31
12-2f	10	100 cm/s	7.51	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2962	98.47	Métrico	28.5	1.14	28.52	31.82
12-2g	10	100 cm/s	9	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2993	99.44	Métrico	11.58	-1.02	11.63	19.55
12-2h	10	100 cm/s	10.51	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2524	83.88	Métrico	3.93	-0.46	3.96	16.31

RMS V _x '	RMS V _y '	RMS V'	RMS V _{mag} '	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
93.7	20.93	96.01	13.68	0.03	-0.11	-1.95	-1.84	-1.883.572	48.64	38.44	157.39	6.78	1.51	Inicio
88.91	19.67	91.06	9.22	0.81	-0.8	-1.31	-1.23	-1.705.748	61.22	38.56	157.68	6.43	1.42	Inicio
96.39	20.87	98.62	10.09	0.38	-0.37	-1.84	-1.77	-1.973.978	59.55	38.82	158.28	6.96	1.51	Inicio
47.2	11.01	48.47	14.89	-3	2.04	8.28	4.48	-417.398	33.5	38.77	158.17	3.44	0.8	Inicio
20.32	8.25	21.93	17.92	0.18	0.11	0.36	0.08	41.894	31.12	38.11	157.13	1.49	0.61	Inicio
13.44	8.24	15.76	8.71	1.35	0.23	5.81	0.55	34.416	43.92	37.87	156.07	0.98	0.6	Inicio
7.77	6.18	9.93	7.1	0.25	0.12	1.67	0.32	10.479	73.08	37.57	155.88	0.56	0.45	Inicio
7.77	5.3	9.41	7.15	0.52	0.12	2.59	-0.02	8.945	76.53	35.54	151.15	0.7	0.48	Inicio
10.45	4.08	11.22	10.37	-0.69	0.14	2.95	1.87	10.419	50.93	38.42	157.84	0.76	0.3	Medio
13.31	5.87	14.55	12.77	-1.63	-0.63	9.99	2.3	34.04	43.71	38.35	157.68	0.96	0.42	Medio
18.29	8.75	20.28	17.04	-1.4	-0.69	8.35	0.56	97.695	38.76	38.27	157.51	1.32	0.63	Medio
23.35	13.05	26.75	20.47	-1.18	-0.46	7.06	-0.32	166.673	33.34	38.15	157.21	1.7	0.95	Medio
22.8	14.2	26.86	18.25	-0.58	0.02	3.05	-0.42	163.516	35.25	38.05	157	1.67	1.04	Medio
18.59	13.79	23.15	12.37	-0.1	0.25	2.89	-0.14	123.391	36.19	37.84	156.51	1.33	0.99	Medio
15.57	12.22	19.79	10.48	0.43	0.42	1.12	0.52	72.492	50.79	37.82	155.95	1.13	0.89	Medio
14.24	11.17	18.1	10.54	0.47	0.44	0.89	0.59	45.619	53.66	36.46	152.79	1.28	1	Medio
11.59	4.48	12.42	11.45	-0.91	-1.24	2.78	5.53	21.293	56.09	43.06	168.64	0.84	0.32	Final
12.96	6.04	14.3	12.83	-0.97	-0.71	1.99	2.07	41.129	49.82	43.34	169.29	0.94	0.44	Final
16.15	7.97	18.01	15.46	-1.5	-0.88	14	1.59	70.596	44.17	43.82	170.4	1.17	0.58	Final
17.66	10.16	20.38	16.88	-0.68	-0.6	2.75	0.29	94.587	40	43.65	170.02	1.29	0.74	Final
18.86	11.36	22.02	17.33	-0.3	-0.2	1	-0.43	116.974	40.08	43.49	169.64	1.37	0.83	Final
17.91	11.4	21.23	15.87	0.13	0	0.72	-0.26	111.741	38.41	40.17	161.91	1.3	0.83	Final
15.93	11.22	19.49	11.53	0.29	0.19	0.54	-0.09	84.633	53.27	38	156.36	1.15	0.81	Final
15.19	10.89	18.69	9.95	0.54	0.27	0.81	0.09	71.549	60.09	36.86	154.72	1.2	0.86	Final

**Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos
de algunos tipos de resaltos hidráulicos**

Datos de resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero y $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestreros tomados	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	N° de muestras	N° de muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
10-0a	10	100 cm/s	0.76	Todos	0,05-308,55	1-3086	3086	3084	99.94	Métrico	83.31	-12.79	84.28	103.13
10-0b	10	100 cm/s	1.5	Todos	0,05-303,15	1-3032	3032	3032	100	Métrico	78.44	-12.24	79.39	104.98
10-0c	10	100 cm/s	3.04	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	3008	99.97	Métrico	88.05	-13.02	89.01	92.61
10-0d	10	100 cm/s	4.51	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2938	97.58	Métrico	61.07	-5.43	61.31	61.87
10-0e	10	100 cm/s	6.03	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2994	99.47	Métrico	12.33	-3.64	12.86	17.71
10-0f	10	100 cm/s	7.45	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	3002	99.97	Métrico	-8.76	-4.44	9.82	12.73
10-0g	10	100 cm/s	8.97	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	3005	99.97	Métrico	-14.23	-5.7	15.33	16.27
10-0h	10	100 cm/s	9.97	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2517	83.59	Métrico	-15.33	-4.79	16.06	17.03
10-1a	10	100 cm/s	0.74	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	3010	99.97	Métrico	109.25	-1.63	109.26	109.31
10-1b	10	100 cm/s	1.48	Todos	0,05-301,15	1-3012	3012	3002	99.67	Métrico	101.21	-0.87	101.21	101.35
10-1c	10	100 cm/s	3	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2992	99.37	Métrico	78.36	0.82	78.37	79.01
10-1d	10	100 cm/s	4.51	Todos	0,05-303,15	1-3032	3032	2970	97.96	Métrico	48.57	-0.04	48.57	50.83
10-1e	10	100 cm/s	6.02	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2966	98.64	Métrico	16.27	-3.29	16.6	24.6
10-1f	10	100 cm/s	7.55	Todos	0,05-307,25	1-3073	3073	3023	98.37	Métrico	-3.38	-6.51	7.33	17.46
10-1g	10	100 cm/s	8.99	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2995	99.57	Métrico	-14.57	-7.87	16.56	19.85
10-1h	10	100 cm/s	9.98	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	1748	58.09	Métrico	-18.6	-7.76	20.15	22.37
10-2a	10	100 cm/s	0.78	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2991	99.37	Métrico	91.16	0.67	91.16	91.33
10-2b	10	100 cm/s	1.51	Todos	0,05-300,25	1-3003	3003	2981	99.27	Métrico	82	1.12	82.01	82.43
10-2c	10	100 cm/s	3.01	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2983	99.23	Métrico	64.23	0.34	64.23	65.09
10-2d	10	100 cm/s	4.5	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2963	98.6	Métrico	47.52	0.39	47.52	49.43
10-2e	10	100 cm/s	6.02	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2962	98.44	Métrico	29.64	-0.7	29.64	33.39
10-2f	10	100 cm/s	7.49	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2970	98.7	Métrico	11.98	-2.43	12.23	20
10-2g	10	100 cm/s	8.99	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	2996	99.5	Métrico	-0.95	-3.89	4	15.38
10-2h	10	100 cm/s	10.49	Todos	0,05-300,05	1-3001	3001	1140	37.99	Métrico	-7.2	-3.65	8.07	15.24

RMS V_x'	RMS V_y'	RMS V_z'	RMS V_{mag}'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
58.34	12.9	59.75	6.05	-2.68	2.51	5.31	4.76	-728.51	64.86	35.5	150.56	4.16	0.92	Inicio
67.3	14.93	68.93	5.77	-2.14	2.04	2.61	2.4	-984.871	71.09	35.83	151.32	4.84	1.07	Inicio
26.72	7.03	27.63	10.51	-5.6	2.72	35.14	12.3	-137.848	43.82	35.22	149.91	1.93	0.51	Inicio
16.24	7.07	17.71	15.65	-0.25	0.07	0.84	0.16	20.611	30.53	34.97	149.32	1.19	0.52	Inicio
14.75	7.48	16.54	11.2	0.49	0.15	0.59	0.29	45.608	50.51	34.4	148	1.07	0.54	Inicio
8.16	6.29	10.3	6.36	0.47	0.26	1.98	0.44	14.008	54.96	33.62	146.18	0.59	0.45	Inicio
6.71	4.95	8.33	6.3	0.22	0.14	0.47	0.16	7.855	81.1	33.51	145.94	0.48	0.36	Inicio
6.85	5.04	8.51	6.34	0.29	0.1	0.37	0.17	8.236	81.31	32.99	144.72	0.54	0.4	Inicio
8.41	3.11	8.97	8.28	-1.29	-0.06	9	4.84	8.157	55.28	35	149.4	0.61	0.22	Medio
11.46	4.69	12.38	11.18	-1.5	-0.59	7.23	2.9	24.058	46.66	34.92	149.21	0.83	0.34	Medio
17.02	7.96	18.79	15.86	-1.71	-0.75	13.87	0.76	79.368	38.86	34.61	148.48	1.23	0.58	Medio
21.71	11.36	24.51	19.38	-0.58	-0.2	1.84	-0.37	145.507	34.53	34.44	148.09	1.58	0.83	Medio
19.31	12.16	22.82	13.81	0.2	0.15	0.51	-0.1	125.941	42.13	34.15	147.41	1.4	0.88	Medio
14.93	11.03	18.56	9.65	0.5	0.35	1.08	0.33	69.509	37.82	33.9	146.84	1.08	0.79	Medio
11.28	8.61	14.19	9.02	0.44	0.38	0.73	0.32	32.793	62.64	33.87	146.76	0.82	0.62	Medio
10.44	8.32	13.35	9.15	0.54	0.25	1.81	0.15	23.547	65.04	32.46	143.49	0.99	0.79	Medio
12.54	4.52	13.33	12.12	-1.63	-0.93	7.04	4.05	26.13	50.88	35.16	150.77	0.91	0.33	Final
15.48	6.44	16.77	14.52	-1.98	-0.98	15.65	2.51	54.978	45.27	35.04	150.48	1.12	0.47	Final
17.64	8.68	19.66	16.62	-1.05	-0.67	6.69	0.56	82.359	40.87	34.86	150.08	1.28	0.63	Final
19.06	11.29	22.16	17.5	-0.41	-0.44	0.47	0.01	111.408	38.39	34.94	149.75	1.39	0.82	Final
18.52	11.79	21.96	15.68	-0.22	-0.06	1.96	-0.29	111.51	41.24	34.51	148.75	1.35	0.86	Final
16.71	11.1	20.07	12.32	0.21	0.15	1.92	0.09	78.563	38.65	34.56	148.88	1.21	0.81	Final
13.75	10.28	17.17	8.6	0.4	0.35	0.39	0.25	56.763	58.14	34.28	148.22	0.99	0.74	Final
12.55	8.81	15.33	8.22	0.83	0.45	1.92	1.02	36.281	65.05	32.62	144.87	1.47	1.03	Final

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Datos de resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero y $Q = 8 \text{ m}^3/\text{h}$														
Archivo	Rango de muestreo (Hz)	Rango de velocidad (cm/seg)	Distancia al límite (cm)	Muestras tomadas	Intervalo de tiempo	Intervalo de muestreo	N° de muestras	N° muestras buenas	% muestras buenas	Unidades WinADV	Vx media	Vy media	Magnitud V-media	Vmag media
8-0a	10	100 cm/s	0,7	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	3010	100	Métrico	102,09	-10,06	102,59	102,68
8-0b	10	100 cm/s	1,47	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	3001	99,9	Métrico	100,7	-10,12	101,21	101,26
8-0c	10	100 cm/s	3,04	Todos	0,05-300,15	1-3002	3002	2997	99,83	Métrico	71,5	-2,9	71,56	71,72
8-0d	10	100 cm/s	4,49	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2929	97,5	Métrico	37,89	0,47	37,89	38,69
8-0e	10	100 cm/s	5,99	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2492	82,87	Métrico	1,61	-2,39	2,88	10,17
8-0f	10	100 cm/s	7,49	Todos	0,05-300,85	1-3009	3009	2384	79,23	Métrico	-10,11	-3,93	10,85	12,21
8-0g	10	100 cm/s	8,97	Todos	0,05-299,95	1-3000	3000	2356	78,53	Métrico	-12,97	-4,43	13,71	14,43
8-0h	10	100 cm/s	10,04	Todos	0,05-307,15	1-3072	3072	1207	39,29	Métrico	-13,93	-3,66	14,4	15,12
8-1a	10	100 cm/s	0,77	Todos	0,05-303,25	1-3033	3033	3032	99,97	Métrico	-3,02	10,46	10,89	38,34
8-1b	10	100 cm/s	1,53	Todos	0,05-300,05	1-3001	3001	2997	99,87	Métrico	90,46	-0,46	90,46	90,58
8-1c	10	100 cm/s	2,96	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2996	99,73	Métrico	68,16	1,05	68,16	68,43
8-1d	10	100 cm/s	4,48	Todos	0,05-300,75	1-3008	3008	2942	97,81	Métrico	41,5	1,19	41,51	43,11
8-1e	10	100 cm/s	6,02	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2772	92,28	Métrico	9,95	-2,6	10,28	17,63
8-1f	10	100 cm/s	7,48	Todos	0,05-300,45	1-3005	3005	2723	90,62	Métrico	-7,43	-5,17	9,05	13,91
8-1g	10	100 cm/s	8,97	Todos	0,05-318,75	1-3188	3188	2897	90,87	Métrico	-15,66	-6,35	16,9	18,32
8-1h	10	100 cm/s	10	Todos	0,05-303,55	1-3036	3036	1721	56,69	Métrico	-17,95	-5,73	18,85	19,87
8-2a	10	100 cm/s	0,74	Todos	0,05-300,35	1-3004	3004	2996	99,73	Métrico	89,19	0,34	89,19	89,28
8-2b	10	100 cm/s	1,5	Todos	0,05-301,25	1-3013	3013	2997	99,47	Métrico	78,7	0,99	78,71	78,95
8-2c	10	100 cm/s	3	Todos	0,05-301,05	1-3011	3011	3002	99,7	Métrico	54,72	0,38	54,72	55,24
8-2d	10	100 cm/s	4,49	Todos	0,05-300,95	1-3010	3010	2945	97,84	Métrico	36,99	-0,41	36,99	39,23
8-2e	10	100 cm/s	6	Todos	0,05-300,55	1-3006	3006	2850	94,81	Métrico	14,89	-2,77	15,14	21,2
8-2f	10	100 cm/s	7,52	Todos	0,05-301,55	1-3016	3016	2737	90,75	Métrico	0,01	-4,56	4,56	15,03
8-2g	10	100 cm/s	9,01	Todos	0,05-300,65	1-3007	3007	2797	93,02	Métrico	-9,45	-4,66	10,53	15,74

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

RMS Vx'	RMS Vy'	RMS V'	RMS Vmag'	Sesgo X	Sesgo Y	Kurt X	Kurt Y	Cov XY	COR media	SNR media	Amplitud media	Interv. de conf. del 95% Vx	Interv. de conf. del 95% Vy	Comentarios
5,24	2,63	5,86	3,91	-16,18	0,89	575,73	17,11	-2,08	63,82	28,21	133,6	0,38	0,19	Inicio
4,68	3,17	5,65	4,64	-0,9	0,4	2,91	0,99	0,984	59,84	28,14	133,45	0,34	0,23	Inicio
10,1	4,66	11,12	10,06	-0,17	0,17	-0,03	0,08	0,086	42,06	27,43	131,79	0,73	0,34	Inicio
13,9	6,67	15,41	13,27	-0,1	-0,03	1,34	0,36	50,388	43,79	26,76	130,22	1,02	0,49	Inicio
9,91	6,42	11,81	6,66	0,87	0,28	3,21	0,59	26,025	67,84	26,51	129,65	0,79	0,51	Inicio
6,39	4,68	7,92	5,59	0,15	0,12	0,06	0,16	7,281	50,03	25,9	128,23	0,52	0,38	Inicio
5,48	4,27	6,95	5,29	0,12	0,16	-0,03	0,16	5,248	86,02	25,79	127,97	0,45	0,35	Inicio
5,83	4,02	7,08	5,36	0,36	0,3	0,43	0,25	4,672	86,79	25,2	126,61	0,66	0,46	Inicio
42,42	12,08	44,11	24,36	0,18	-1,04	0,49	0,6	-9,129	49,3	28,62	135,57	3,05	0,87	Medio
9,25	4,21	10,16	9,1	-0,98	-0,22	6,09	1,23	19,228	50,99	28,53	135,34	0,67	0,3	Medio
11,66	5,85	13,05	11,56	-0,57	-0,48	0,62	0,4	37,471	44,82	27,69	133,41	0,84	0,42	Medio
18,56	9,34	20,78	17,22	-0,19	-0,11	0,18	-0,24	114,588	40,48	26,84	131,43	1,36	0,68	Medio
15,73	9,3	18,28	11,36	0,55	0,36	0,4	0,08	87,82	53,76	26,65	130,98	1,18	0,7	Medio
10,37	7,53	12,82	7,26	0,59	0,46	3,18	0,56	33,131	45,76	26,65	130,49	0,79	0,57	Medio
7,93	6,42	10,2	7,35	0,34	0,23	0,98	0,25	18,574	75,25	26,29	129,64	0,58	0,47	Medio
7,43	5,53	9,26	6,81	0,51	0,4	0,56	0,25	8,944	78,19	25,95	128,85	0,71	0,53	Medio
10,01	3,45	10,58	9,83	-1,34	-0,63	6,63	3,35	16,518	51,38	28,1	133,86	0,72	0,25	Final
12,92	5,4	14	12,59	-1,2	-0,99	3,66	3,03	41,452	48,75	27,79	133,13	0,93	0,39	Final
13,96	6,86	15,56	13,6	-0,44	-0,57	0,17	0,45	52,818	45,67	27,13	131,6	1,01	0,5	Final
18,14	9,94	20,69	16,03	-0,28	-0,22	1,16	0,1	103,555	42,63	26,85	130,43	1,32	0,73	Final
16,15	9,91	18,95	11,78	-0,06	0,14	1,23	-0,07	79,386	49,81	26,71	130,62	1,2	0,73	Final
13,85	9,54	16,82	8,82	0,61	0,33	1,08	0,32	60,876	39,26	26,59	130,34	1,05	0,72	Final
11,24	8,32	13,99	7,67	0,57	0,22	0,72	0,14	33,48	66,77	26,7	130,09	0,84	0,62	Final

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

ANEJO 2. GRÁFICAS COMPARATIVAS
A2.1 GRÁFICAS DE VELOCIDAD FRENTE CALADO

Comparación muestreos en mitad del resalto para Q=4,18 l/seg

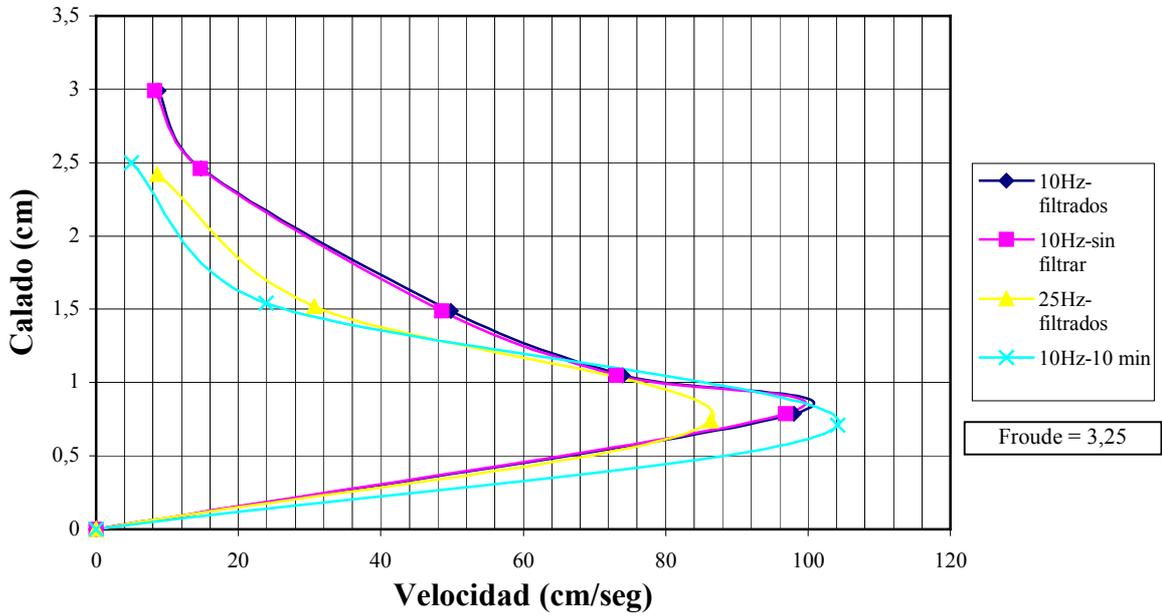


Figura A2-1

Comparación perfiles al final del resalto para Q=4,18 l/seg

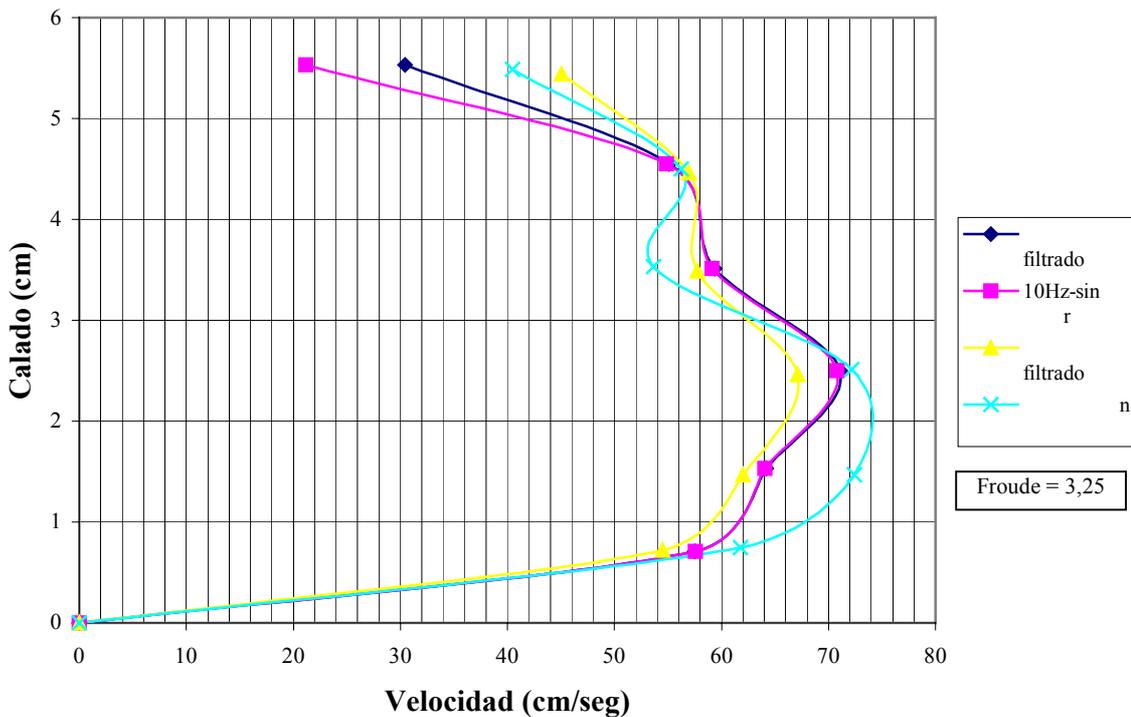


Figura A2-2

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Comparación perfiles a 30 cm del final del resalto para $Q=4,18 \text{ l/seg}$

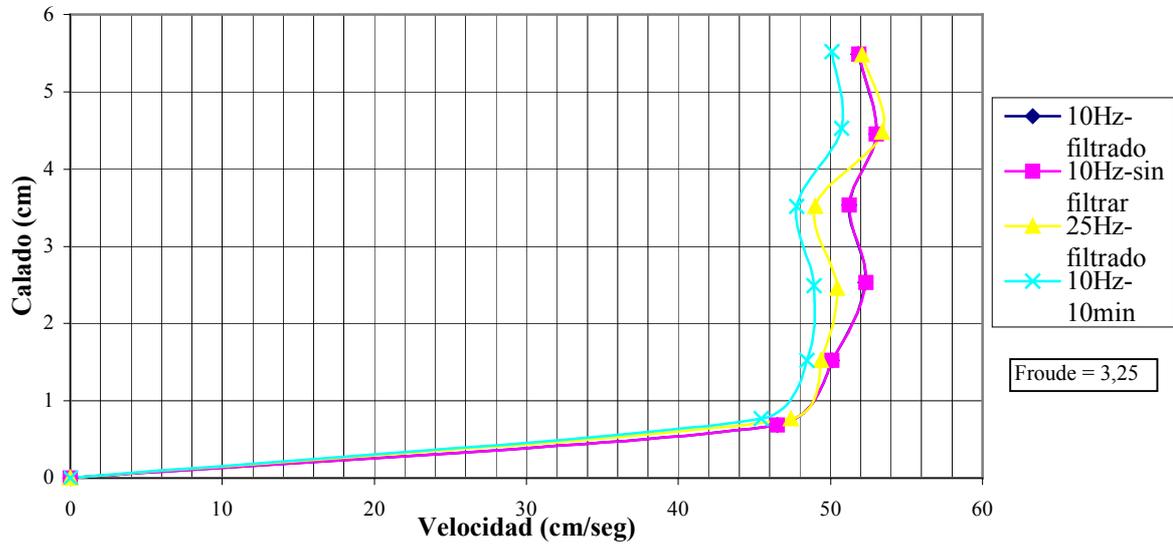


Figura A2-3

Perfil de velocidad central del resalto tras compuerta

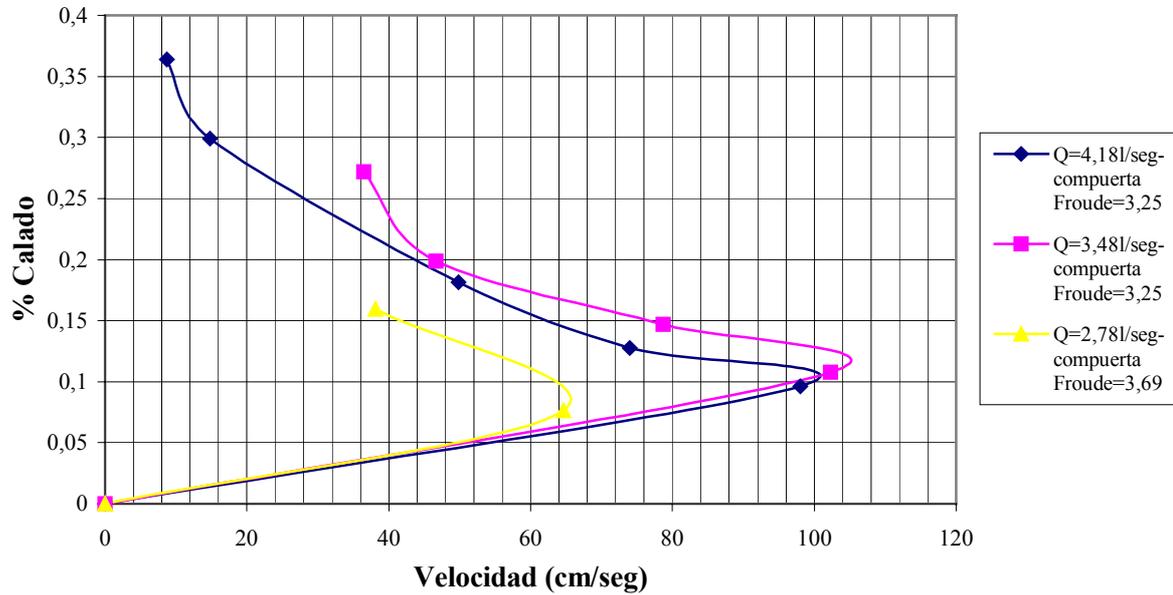


Figura A2-4

Perfil de velocidad central del resalto tras aliviadero

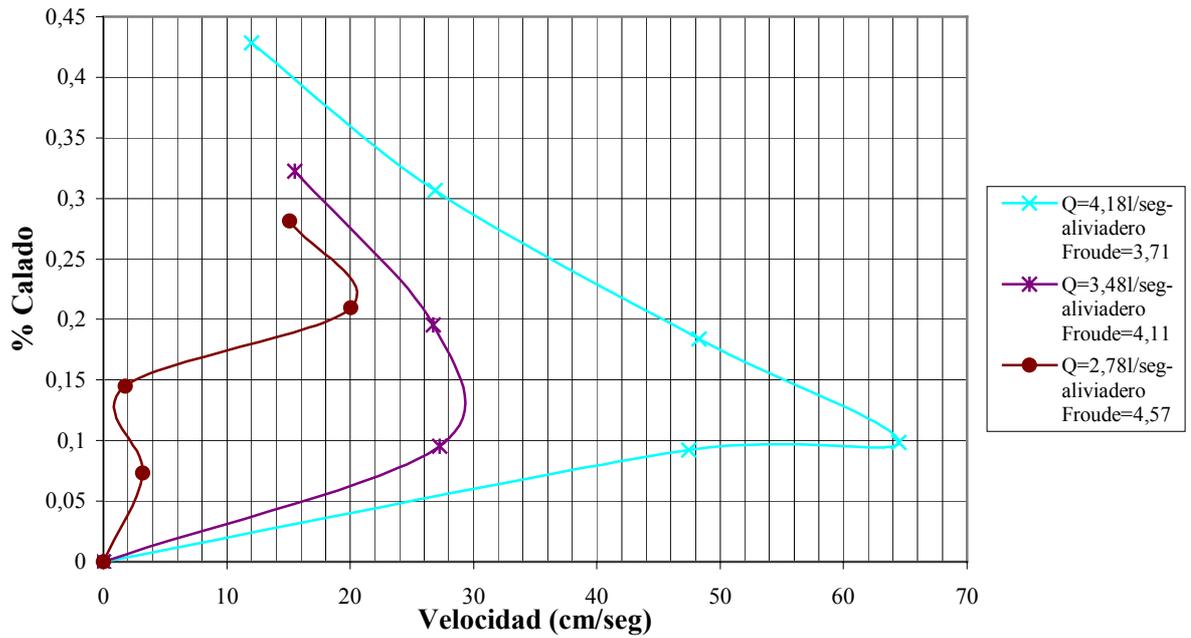


Figura A2-5

Perfil de velocidad central del resalto

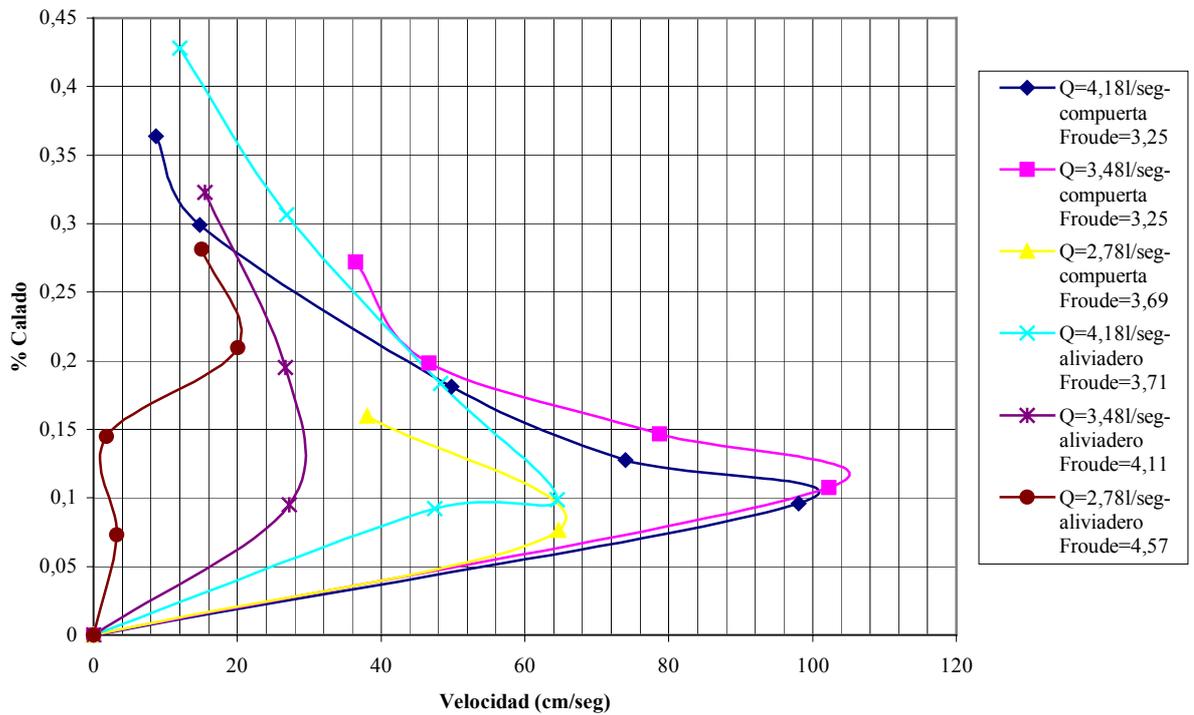


Figura A2-6

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

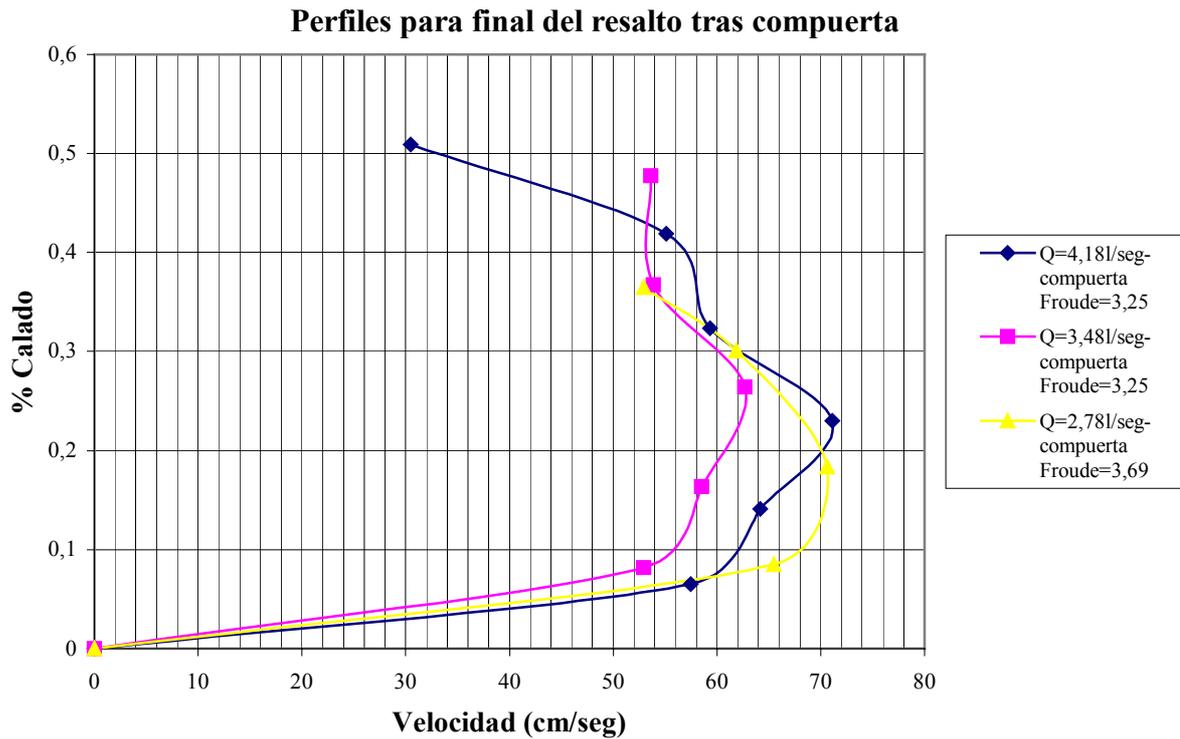


Figura A2-7

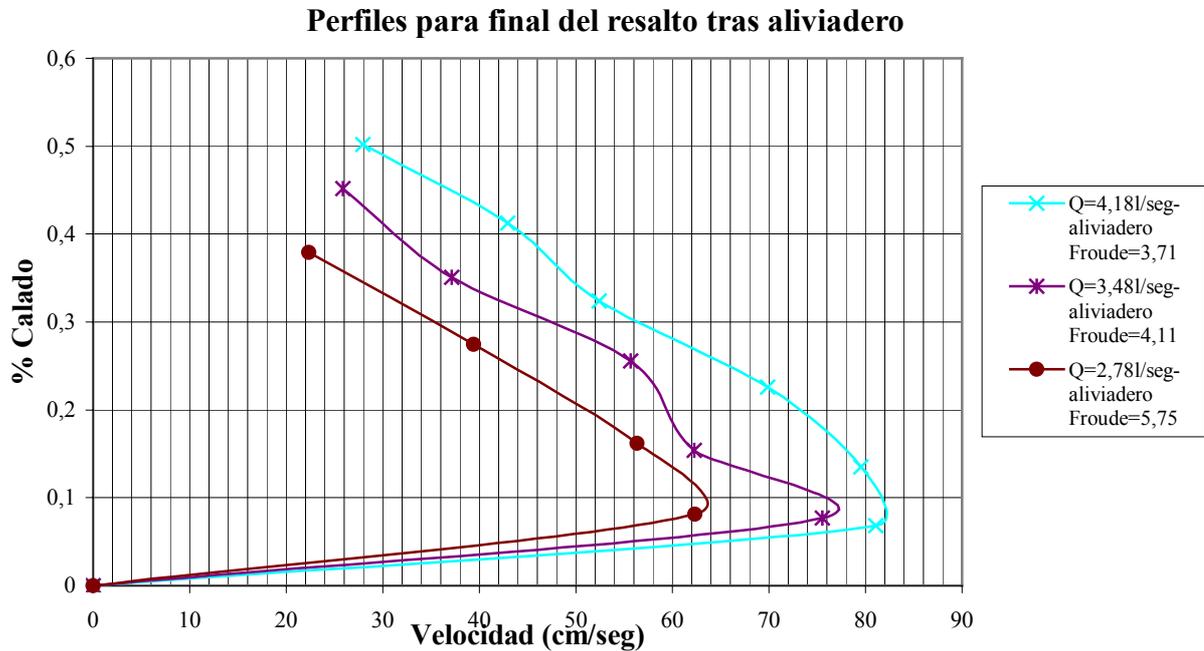


Figura A2-8

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

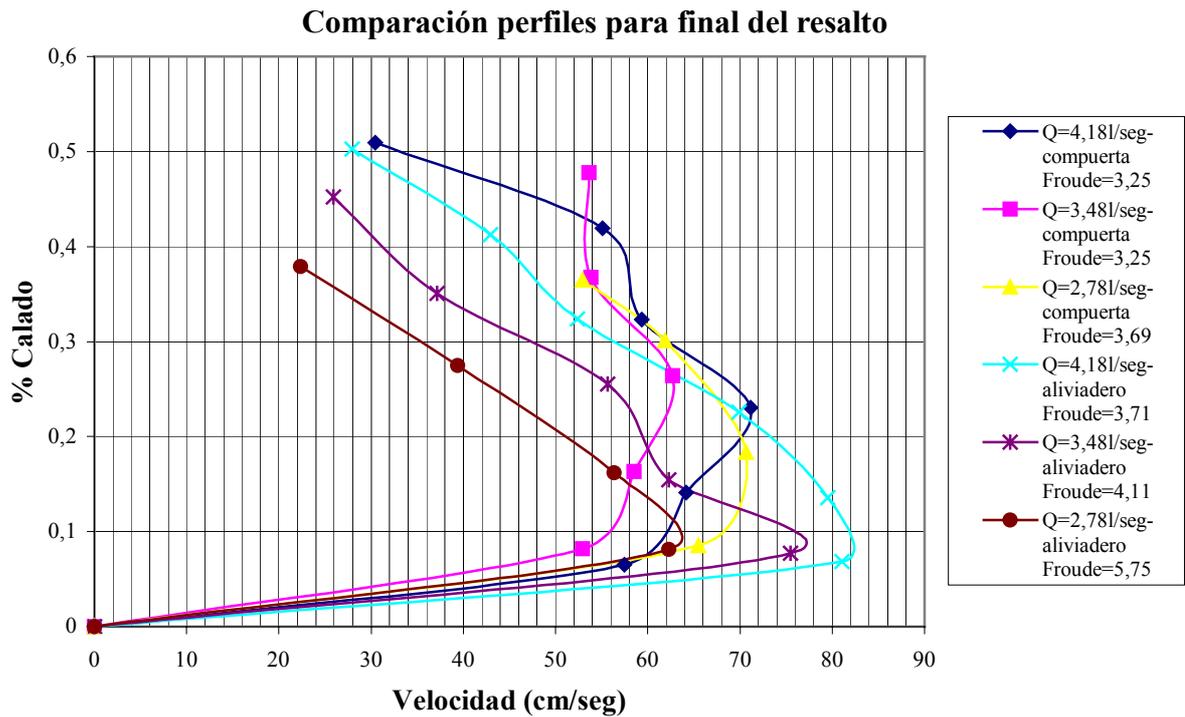


Figura A2-9

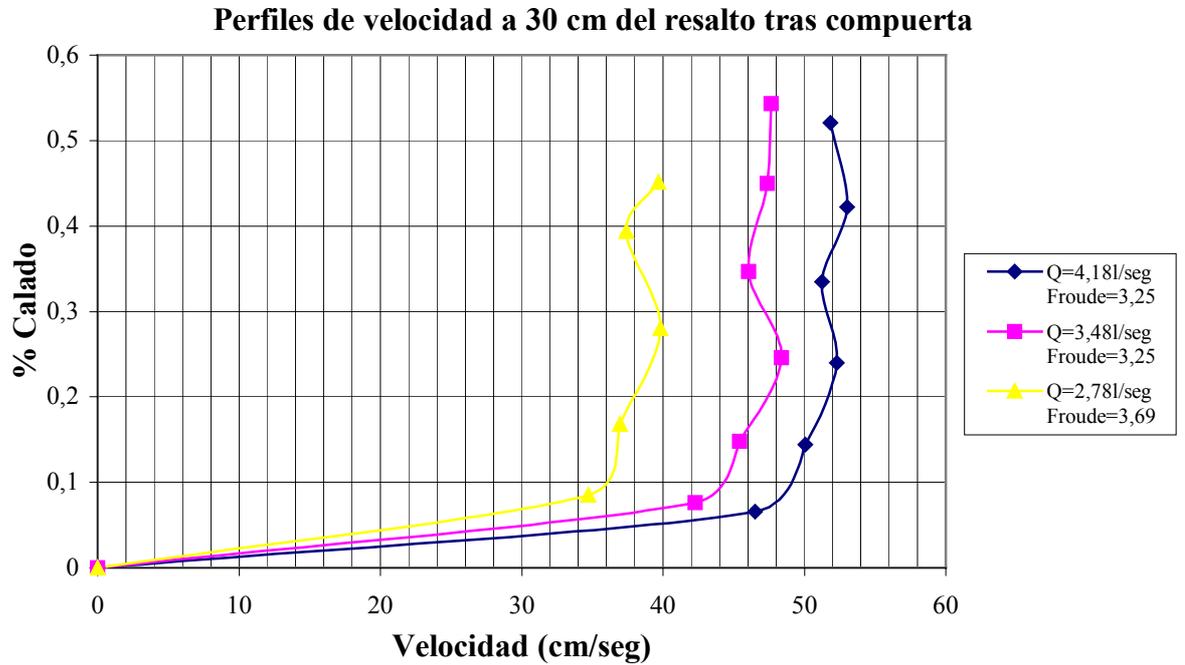


Figura A2-10

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Perfiles al inicio del resalto sumergido tras compuerta

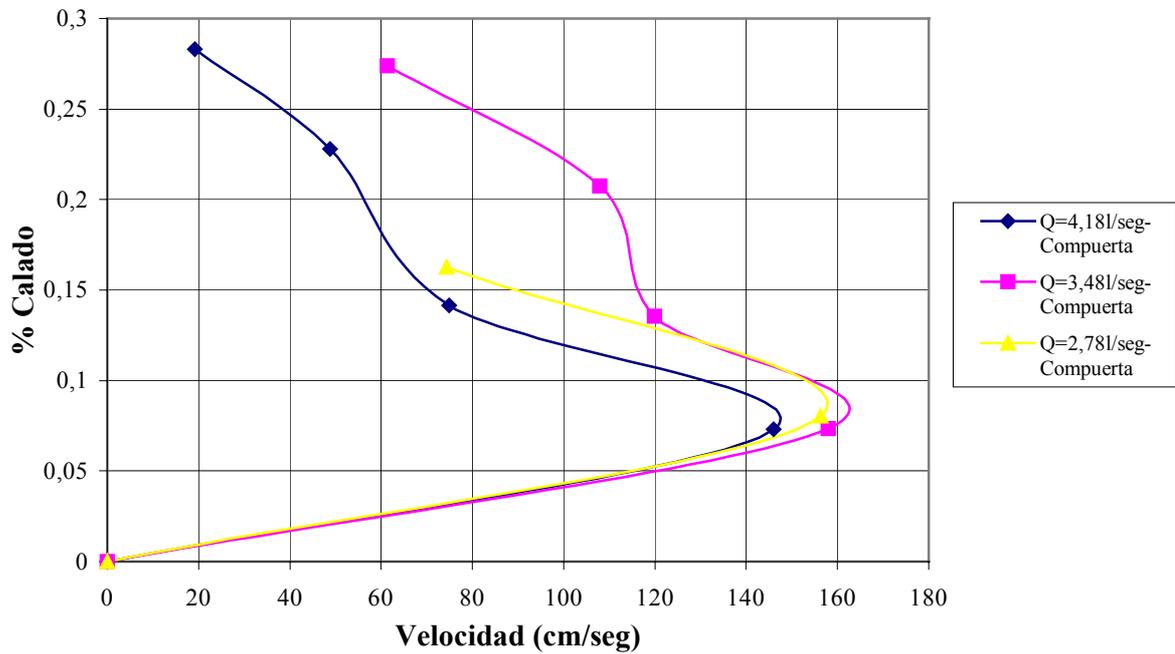


Figura A2-11

Perfiles al inicio del resalto sumergido hasta mitad del aiviadero

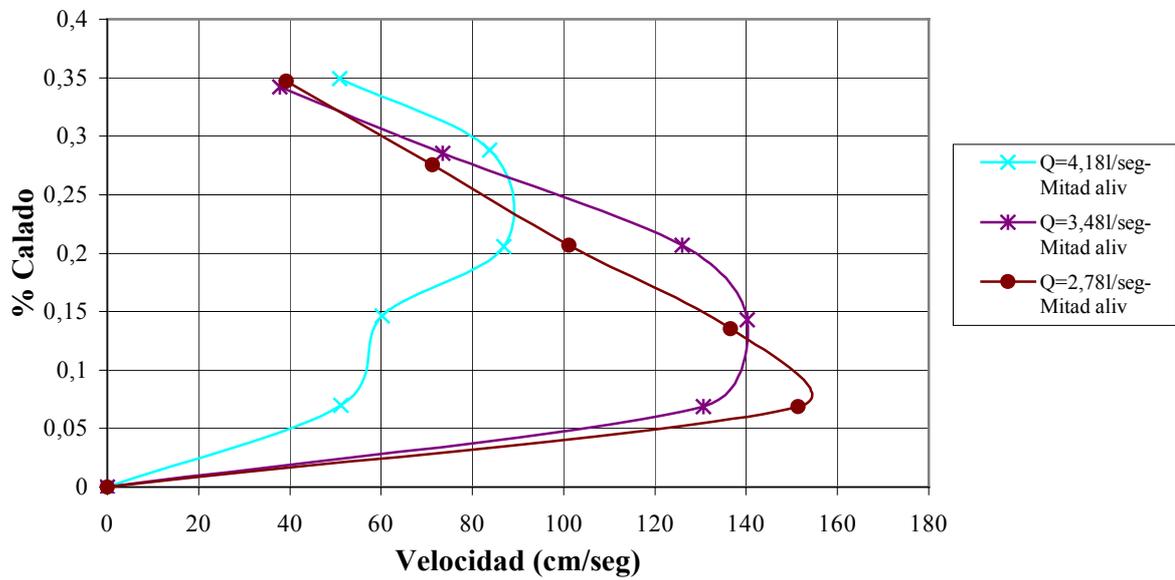


Figura A2-12

Perfiles al inicio del resalto sumergido hasta coronación del aliviadero

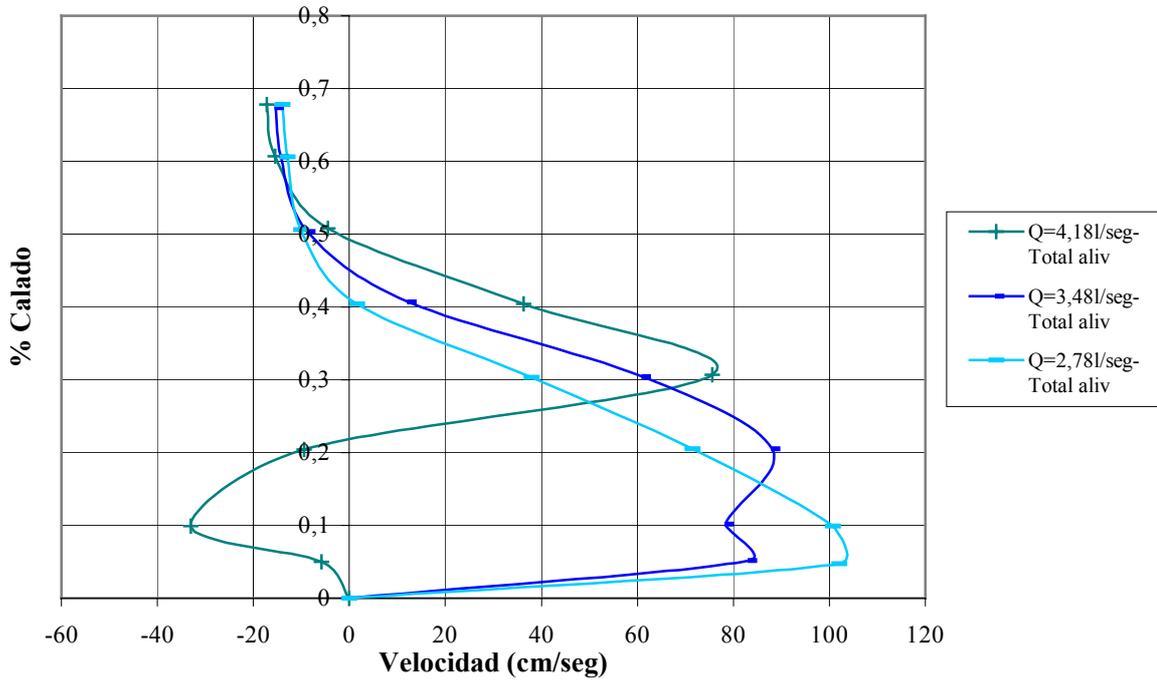


Figura A2-13

Perfiles al inicio del resalto sumergido para Q=4,18 l/seg

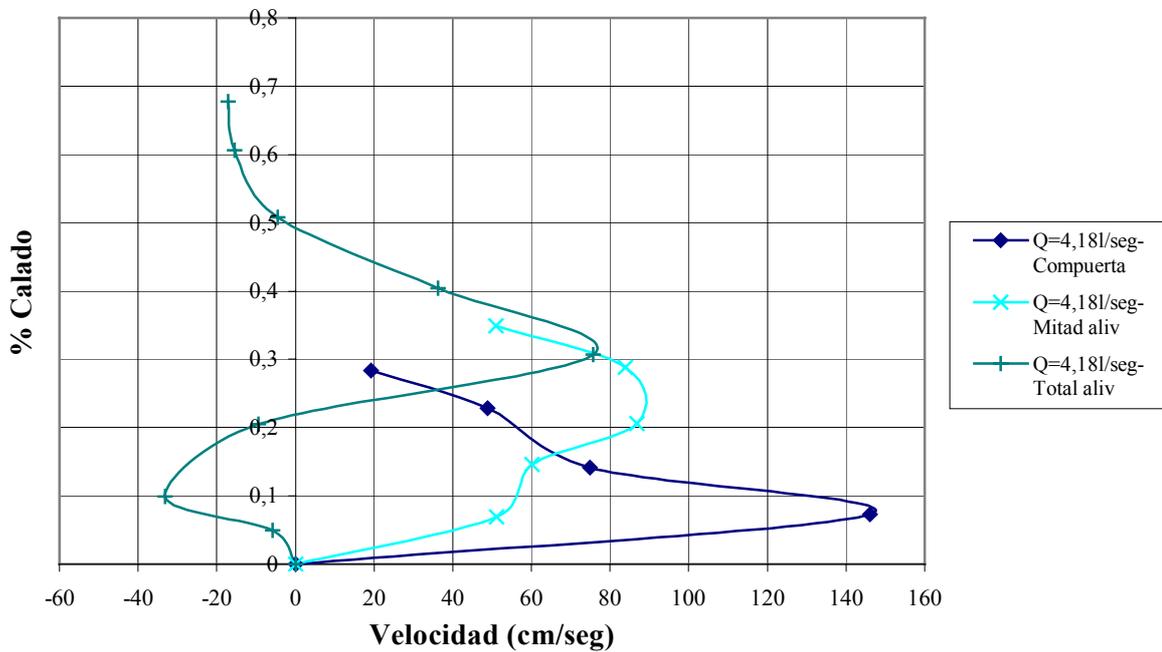


Figura A2-14

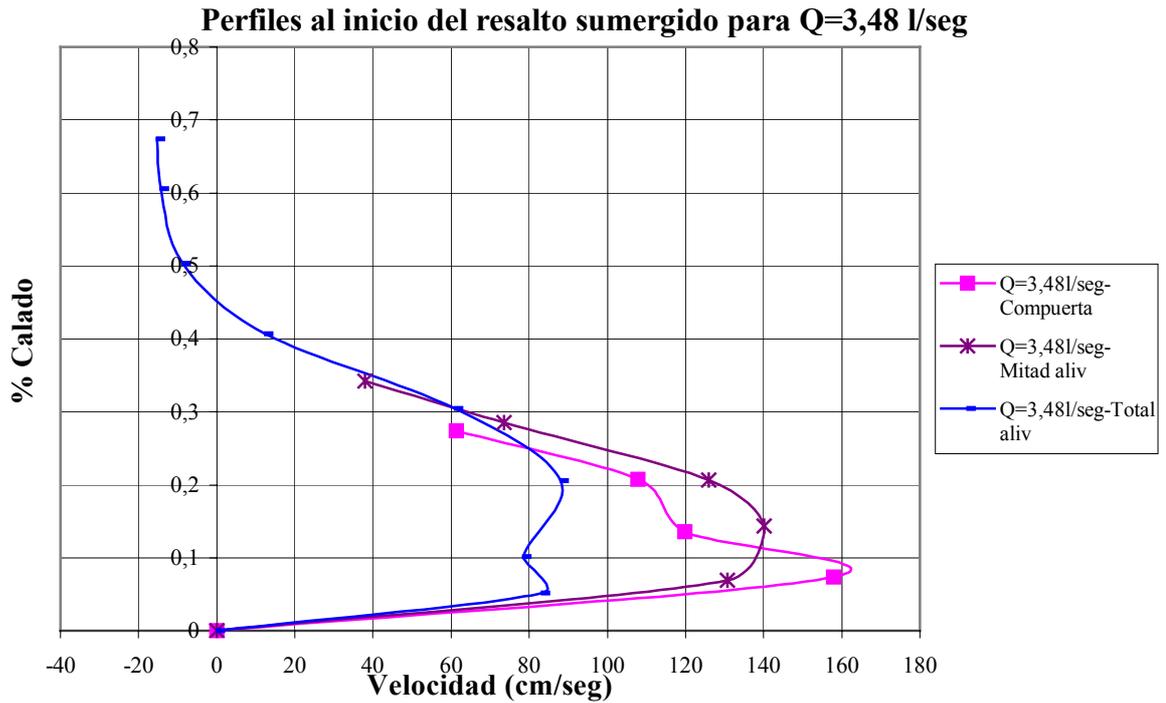


Figura A2-15

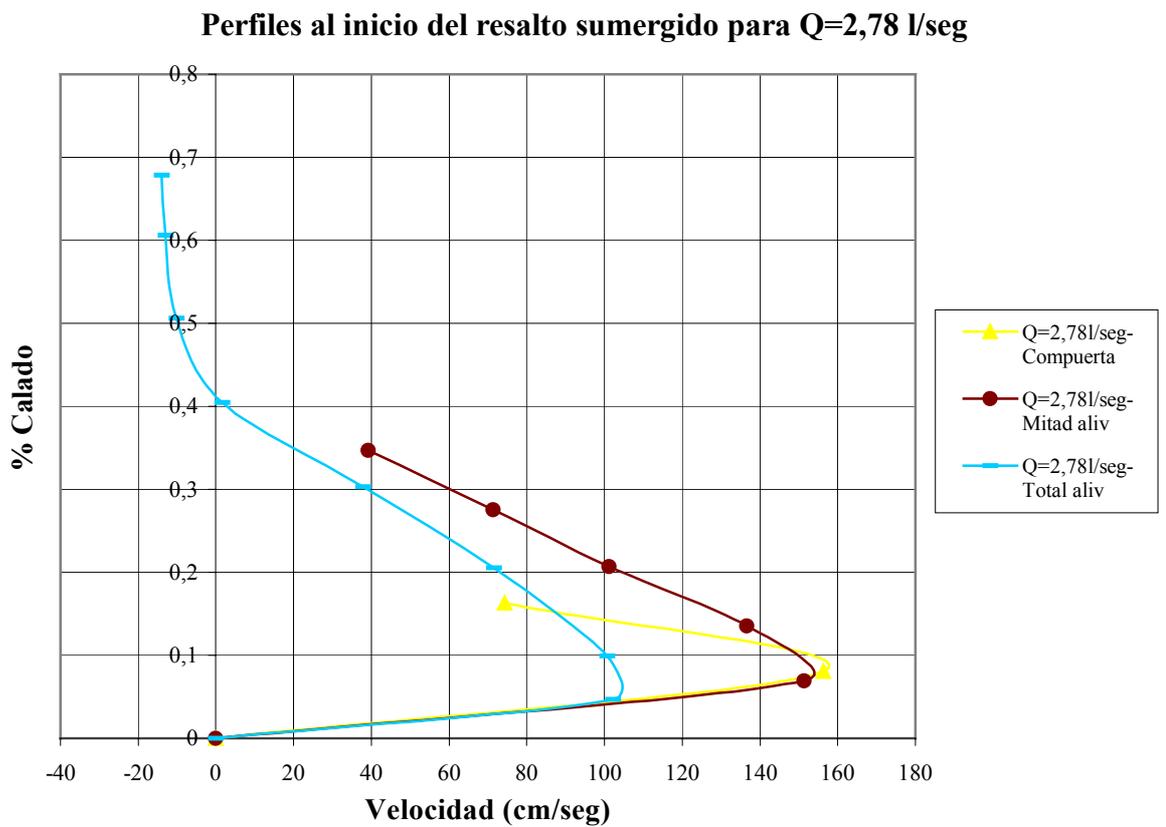


Figura A2-16

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

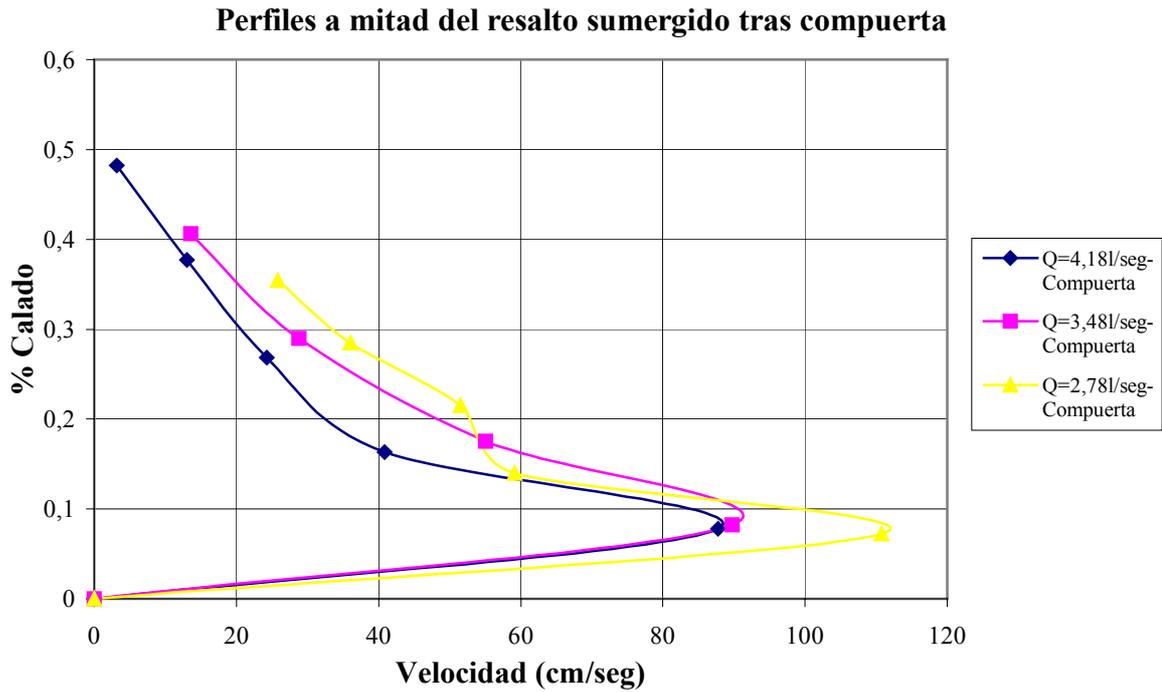


Figura A2-17

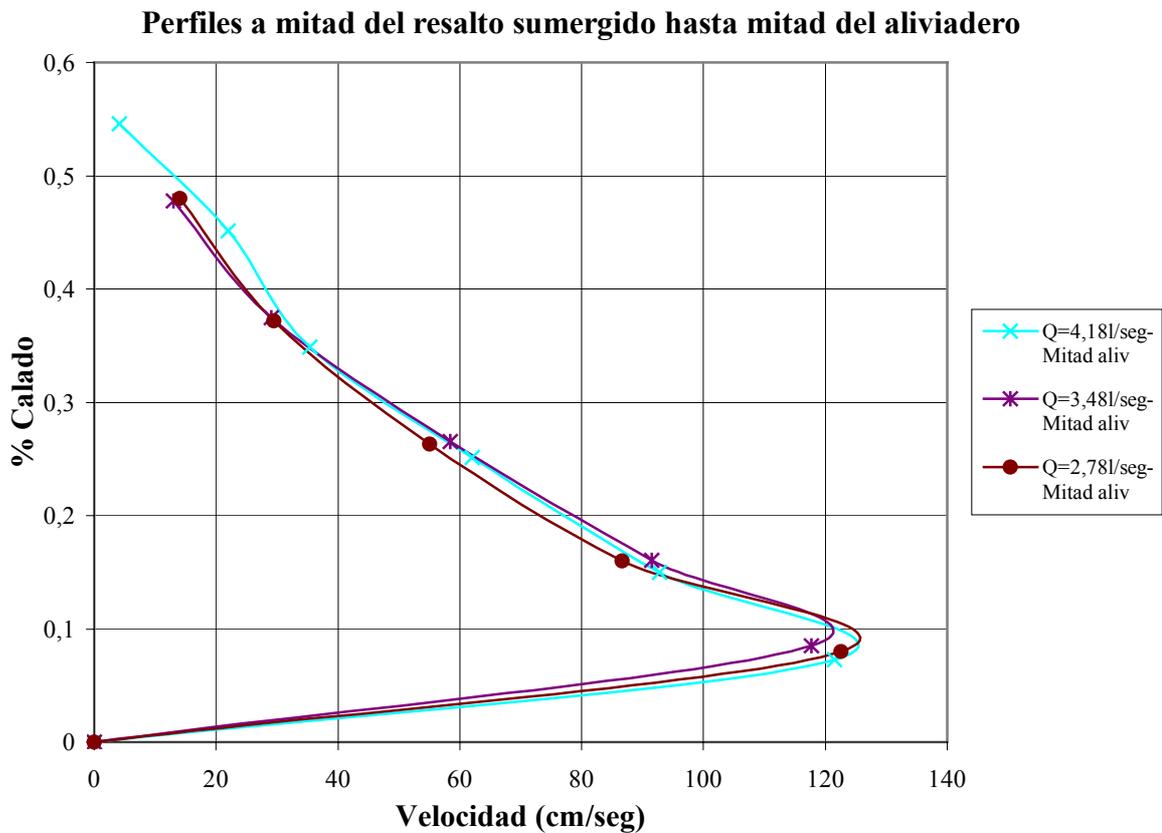


Figura A2-18

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Perfiles a mitad del resalto sumergido hasta coronación del aliviadero

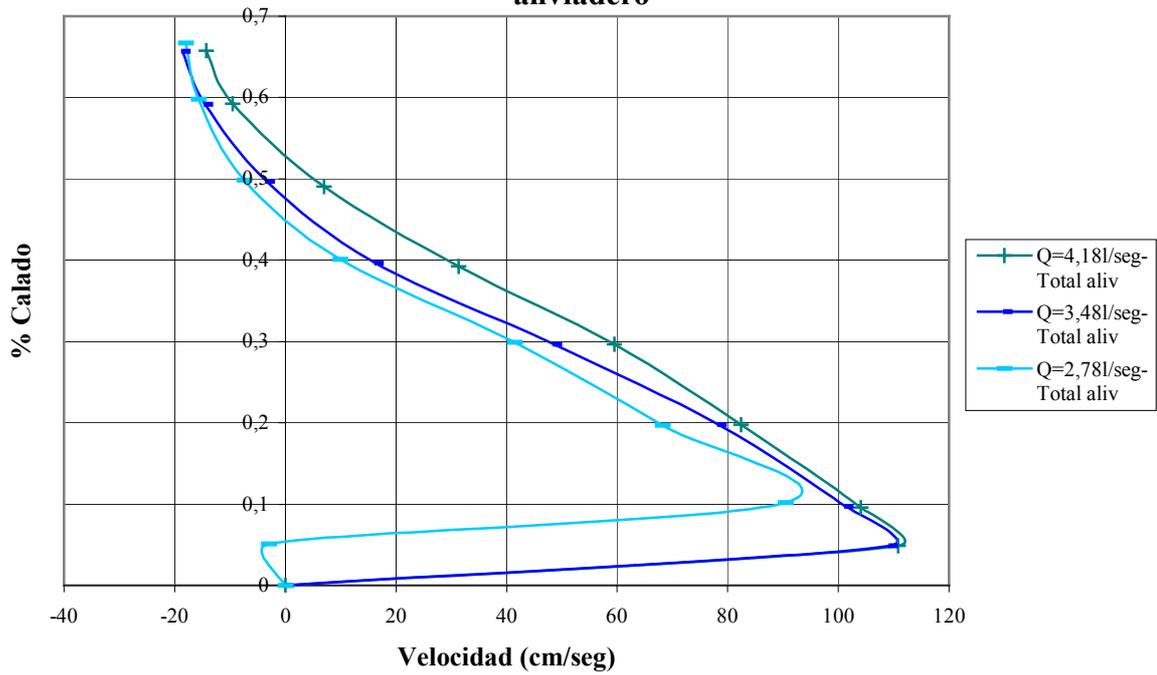


Figura A2-19

Perfiles a mitad del resalto sumergido para Q=4,18 l/seg

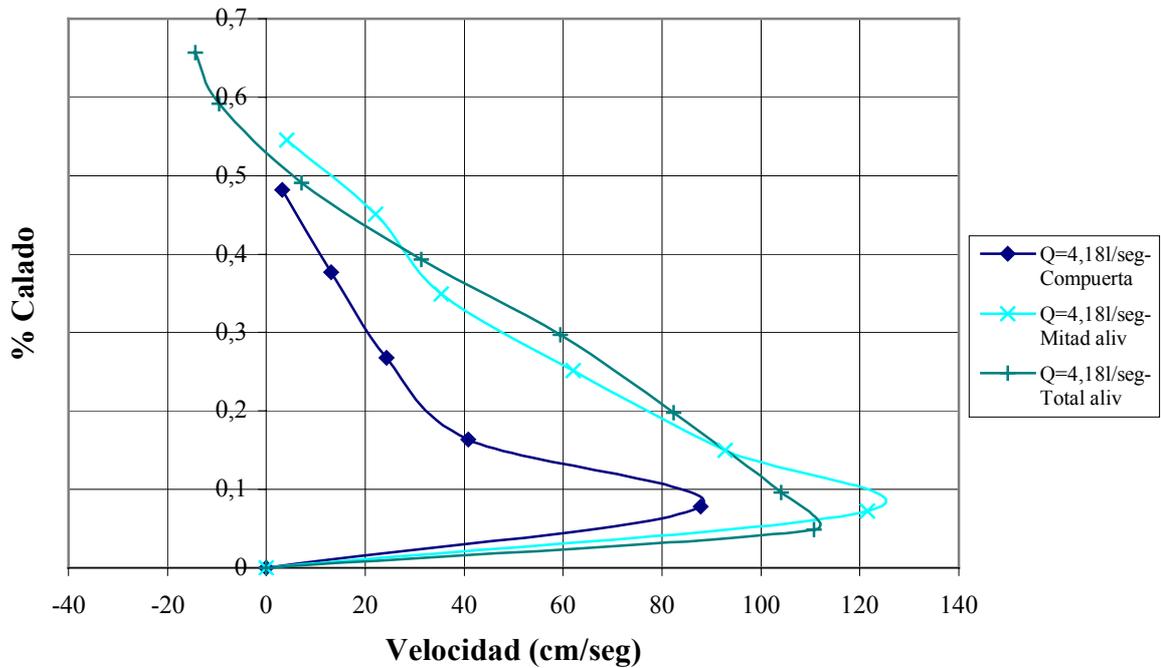


Figura A2-20

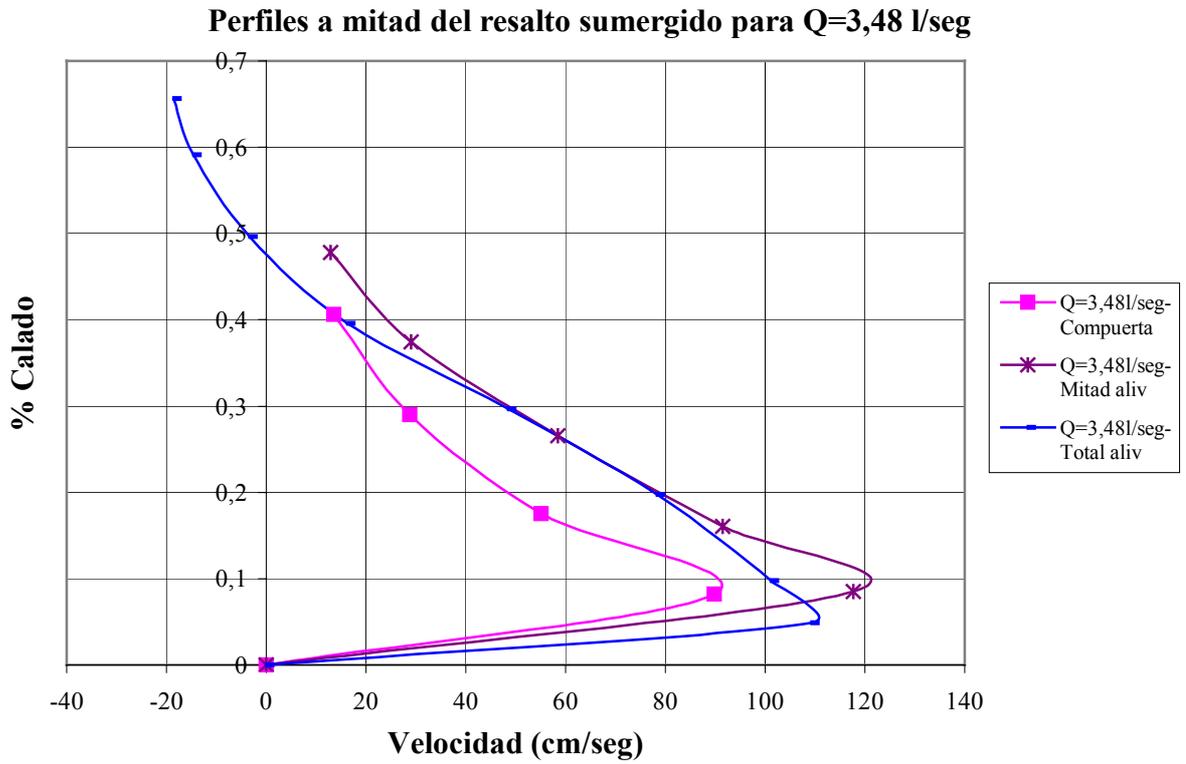


Figura A2-21

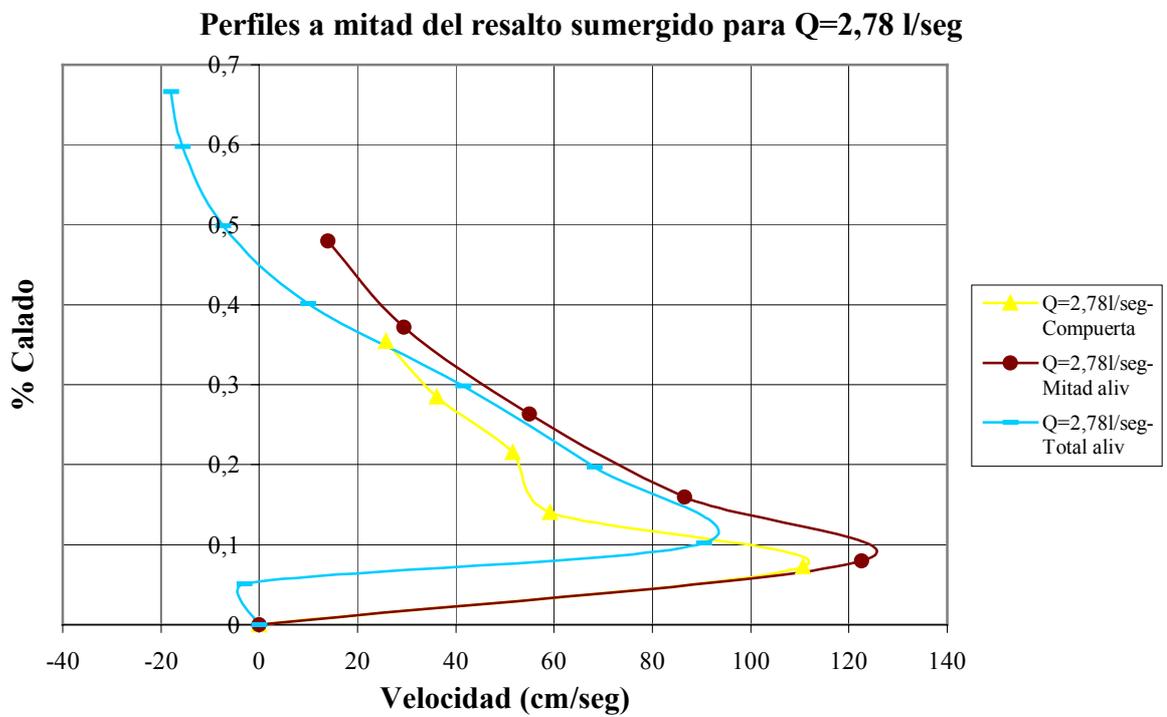


Figura A2-22

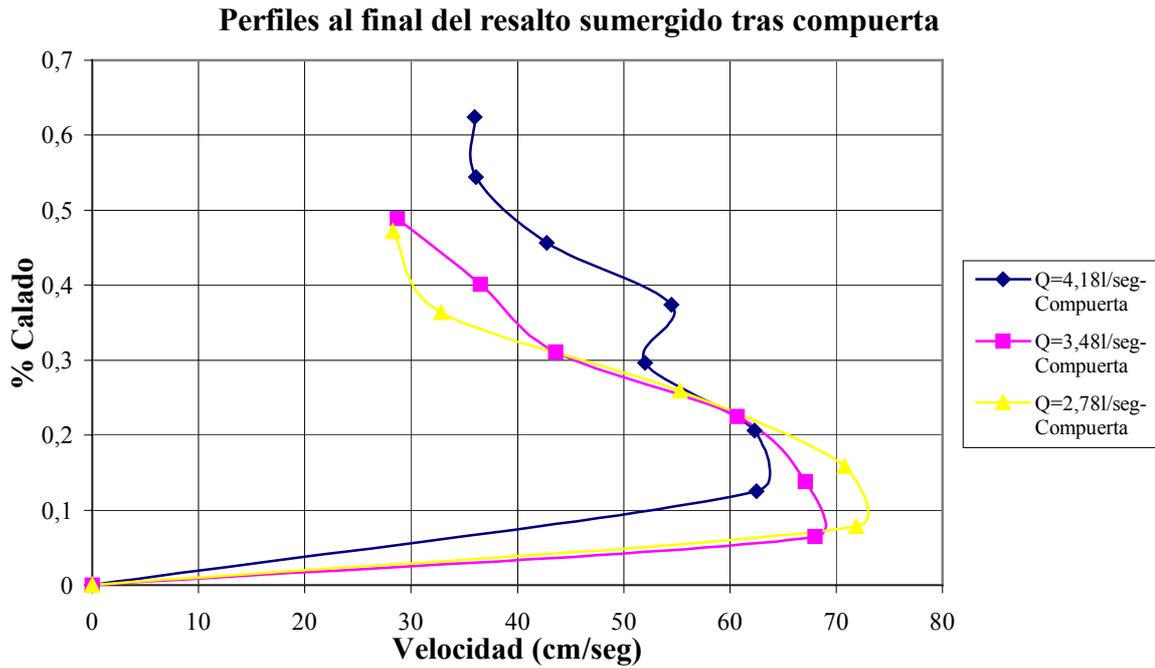


Figura A2-23

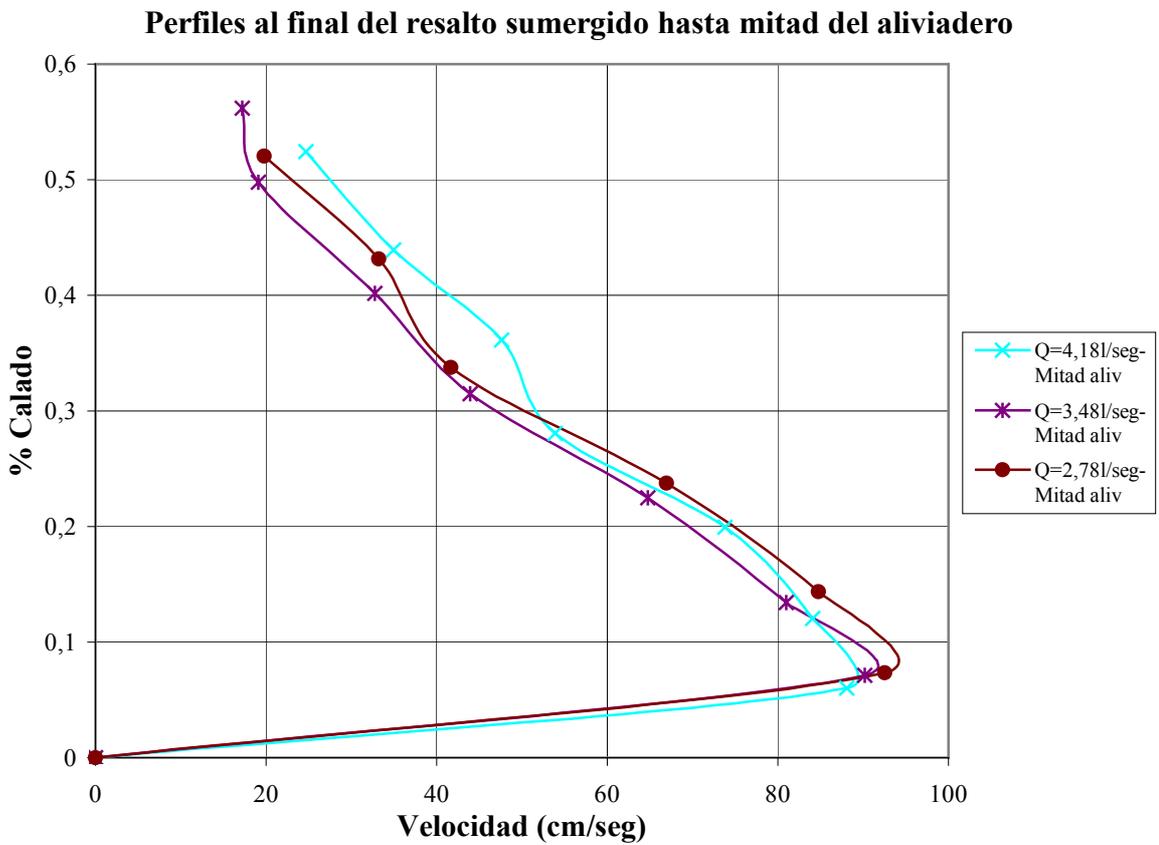


Figura A2-24

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

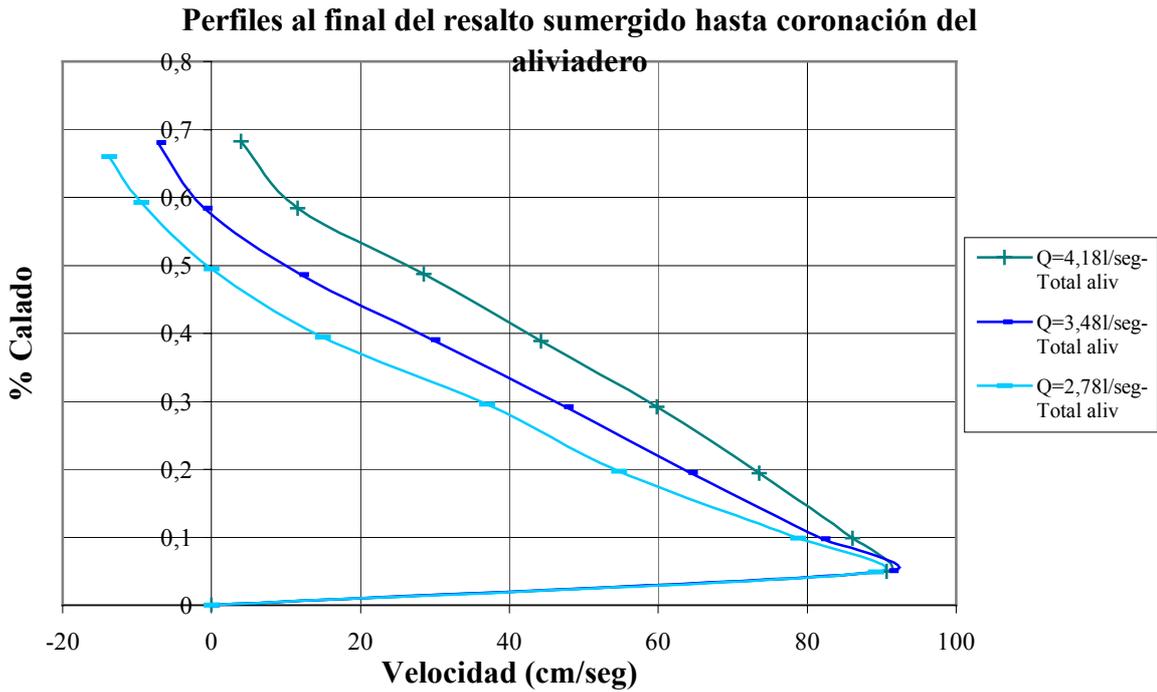


Figura A2-25

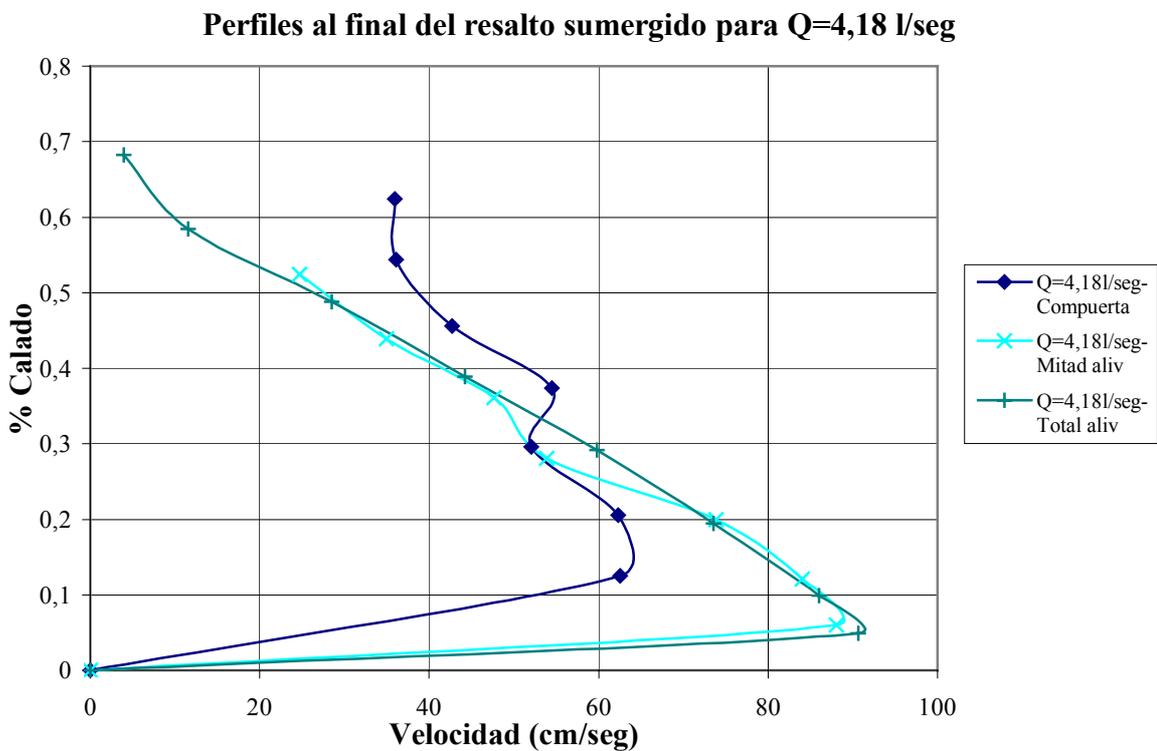


Figura A2-26

Perfiles al final del resalto sumergido para $Q=3,48$ l/seg

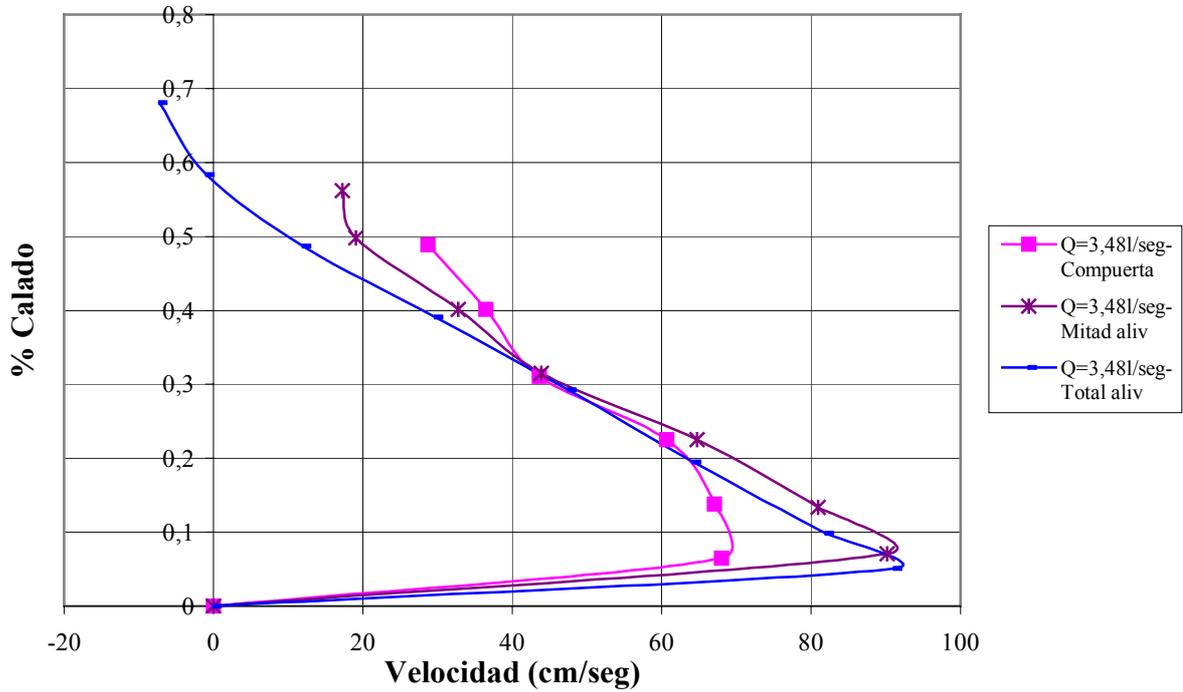


Figura A2-27

Perfiles al final del resalto sumergido para $Q=2,78$ l/seg

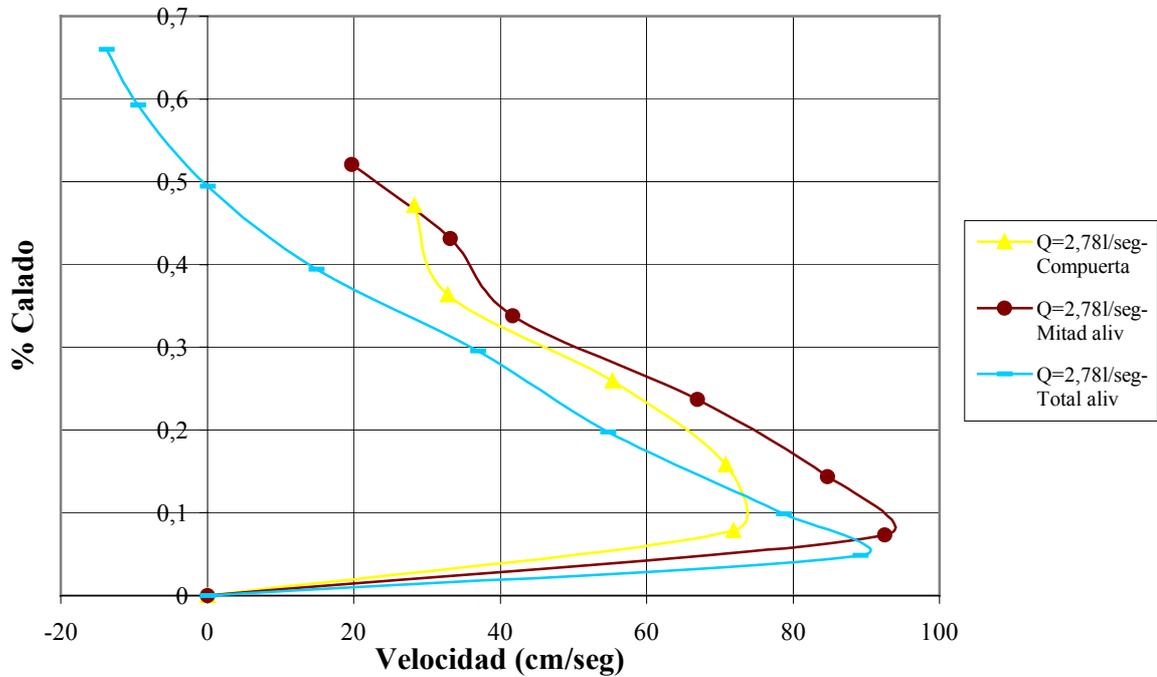


Figura A2-28

Perfiles a 30 cm del resalto sumergido

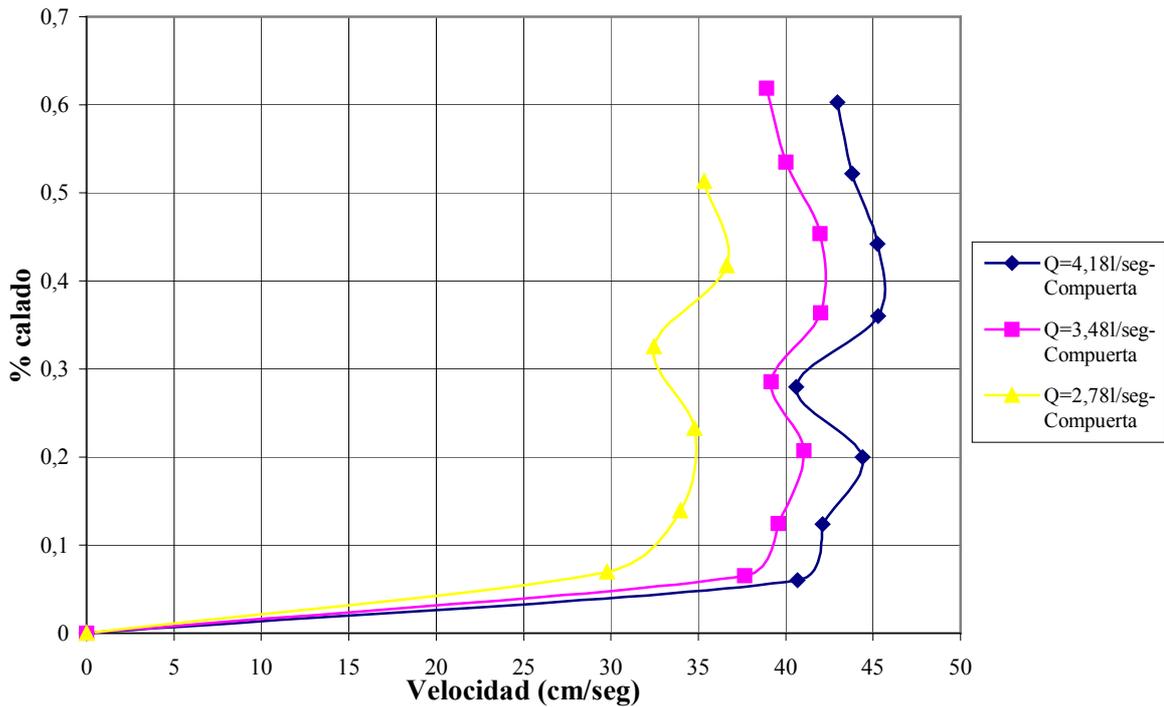
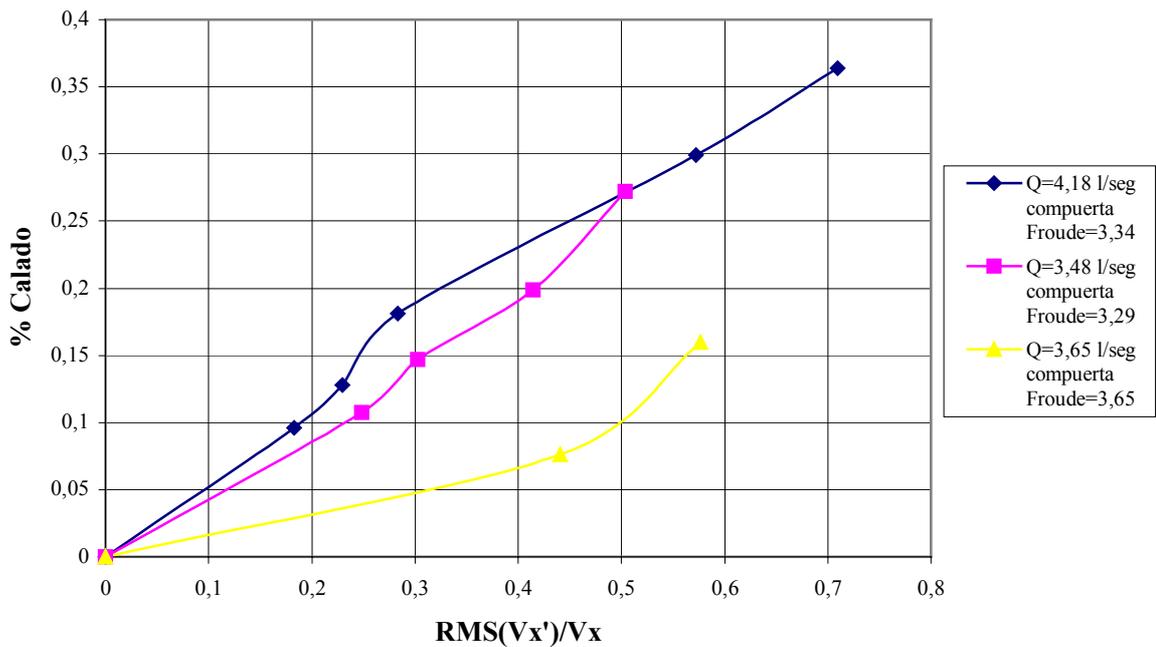


Figura A2-29

A2.2 GRÁFICAS COMPARATIVAS DE VELOCIDAD TURBULENTA ADIMENSIONAL FRENTE A CALADO RELATIVO

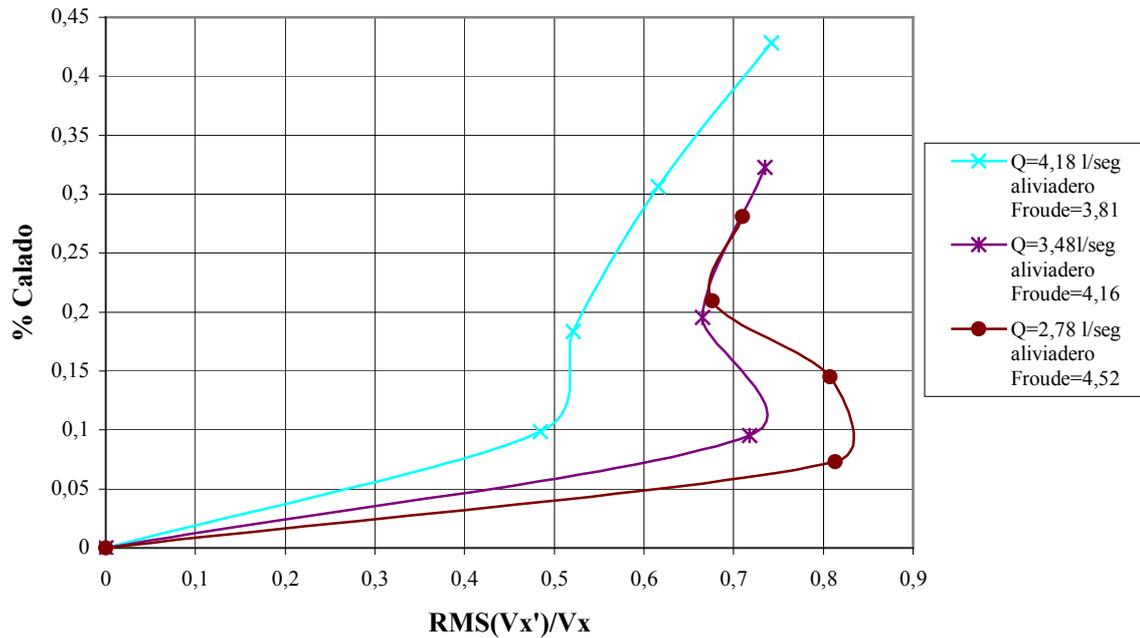
Perfiles de velocidad central del resalto tras compuerta



A2-30

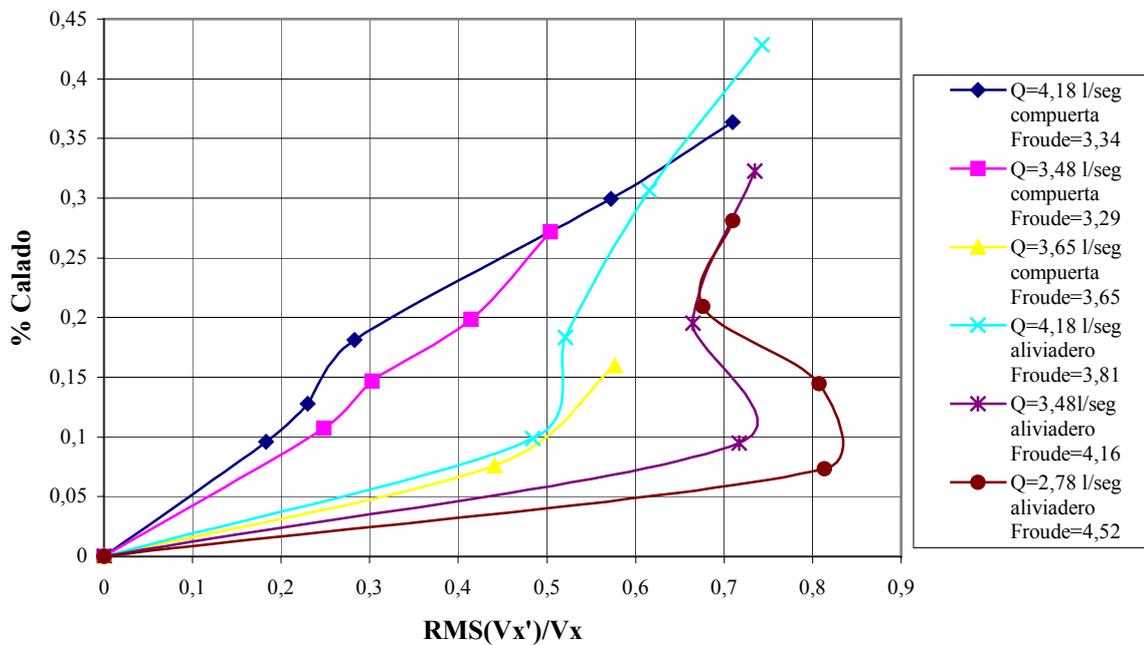
Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Perfiles de velocidad central del resalto tras aliviadero



A2-31

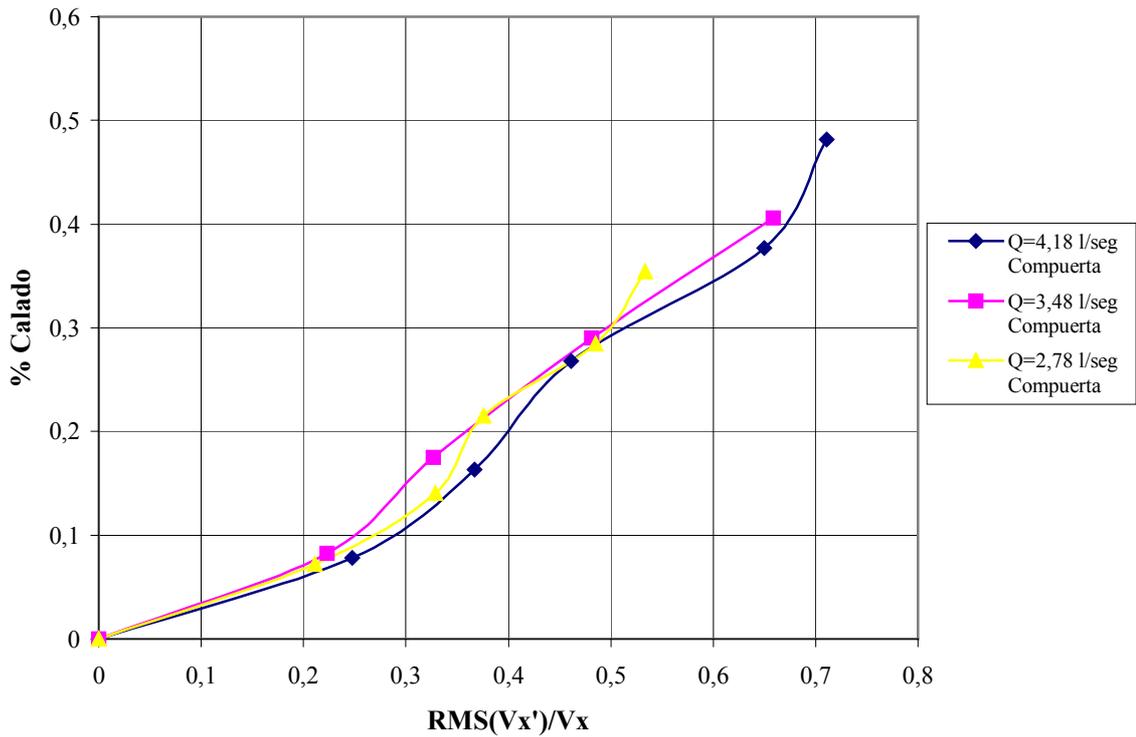
Perfiles de velocidad central del resalto



A2-32

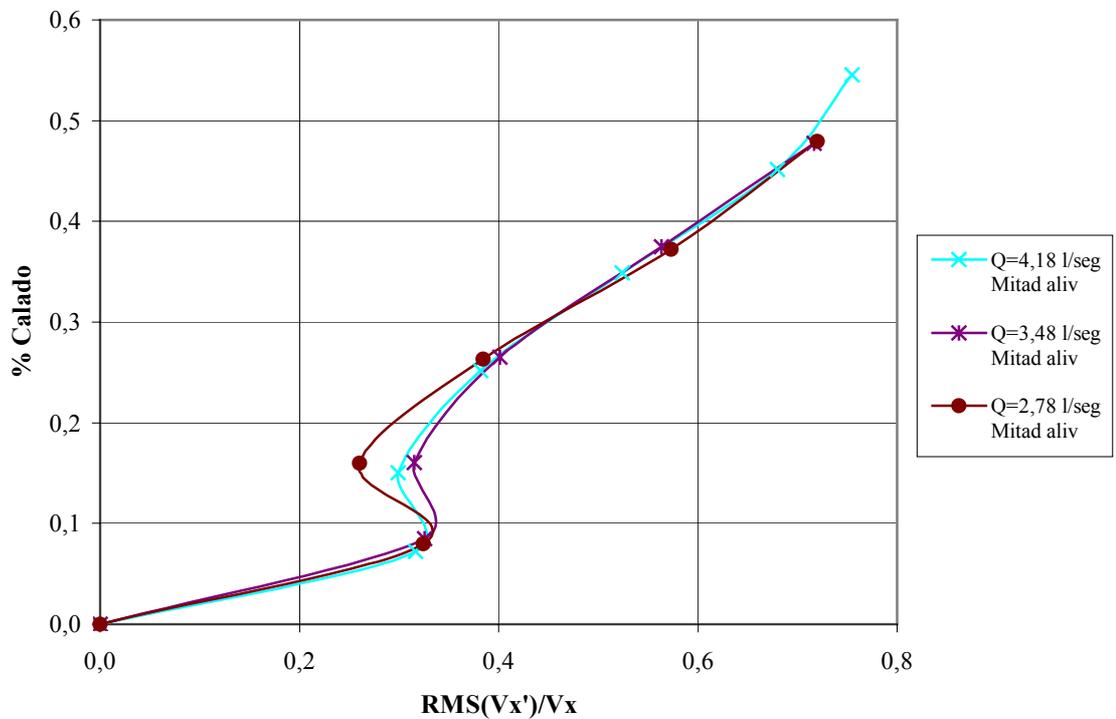
Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Perfiles a mitad del resalto sumergido tras compuerta



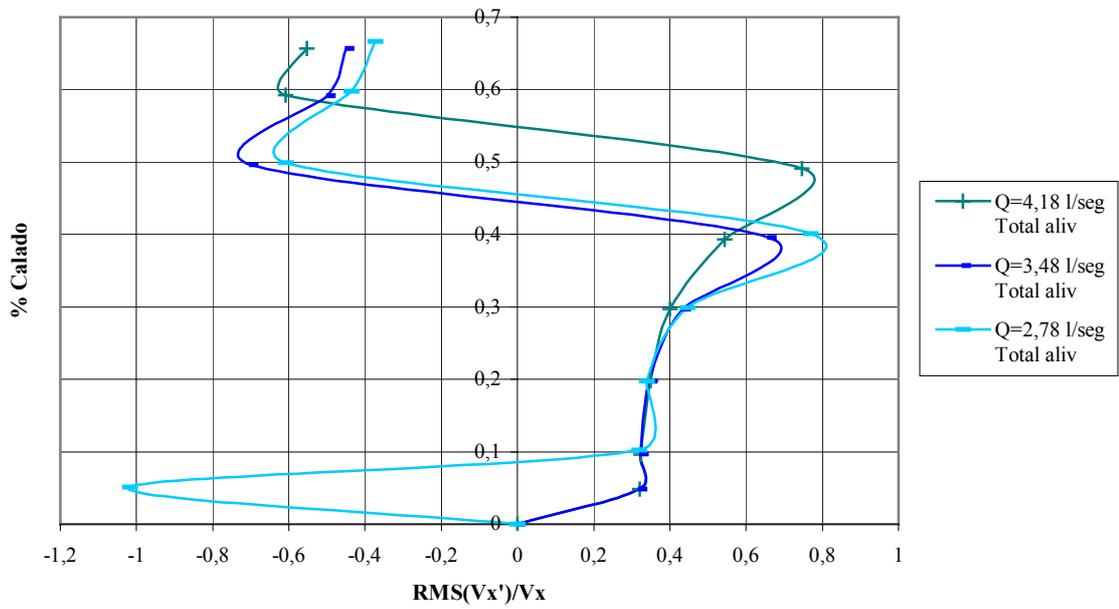
A2-33

Perfiles a mitad del resalto sumergido hasta mitad del aliviadero



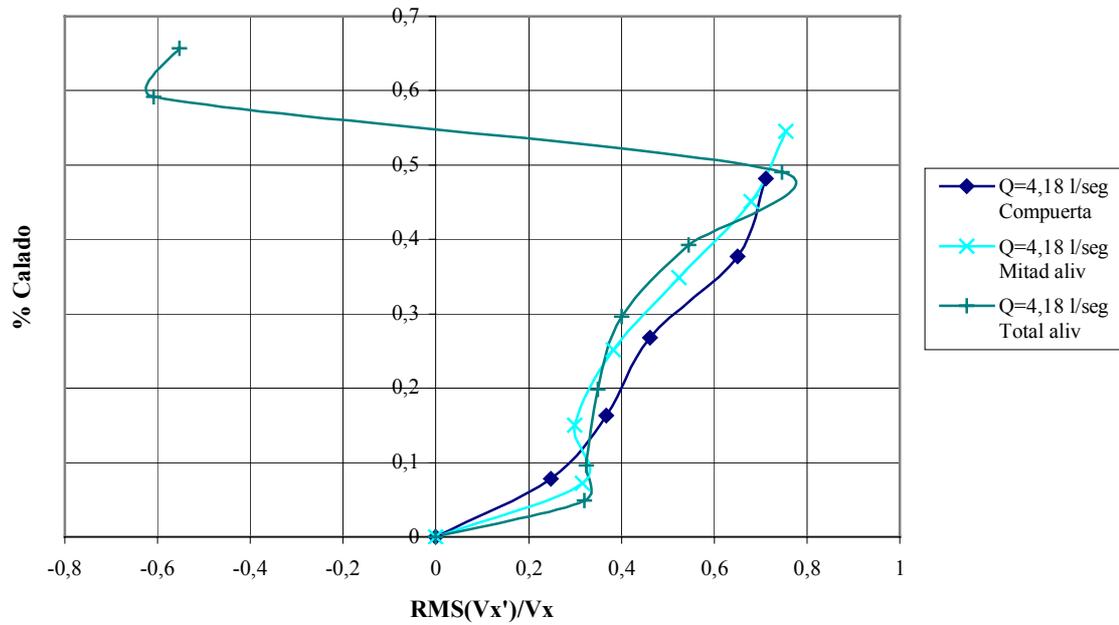
A2-34

Perfiles a mitad del resalto sumergido hasta coronación del aliviadero



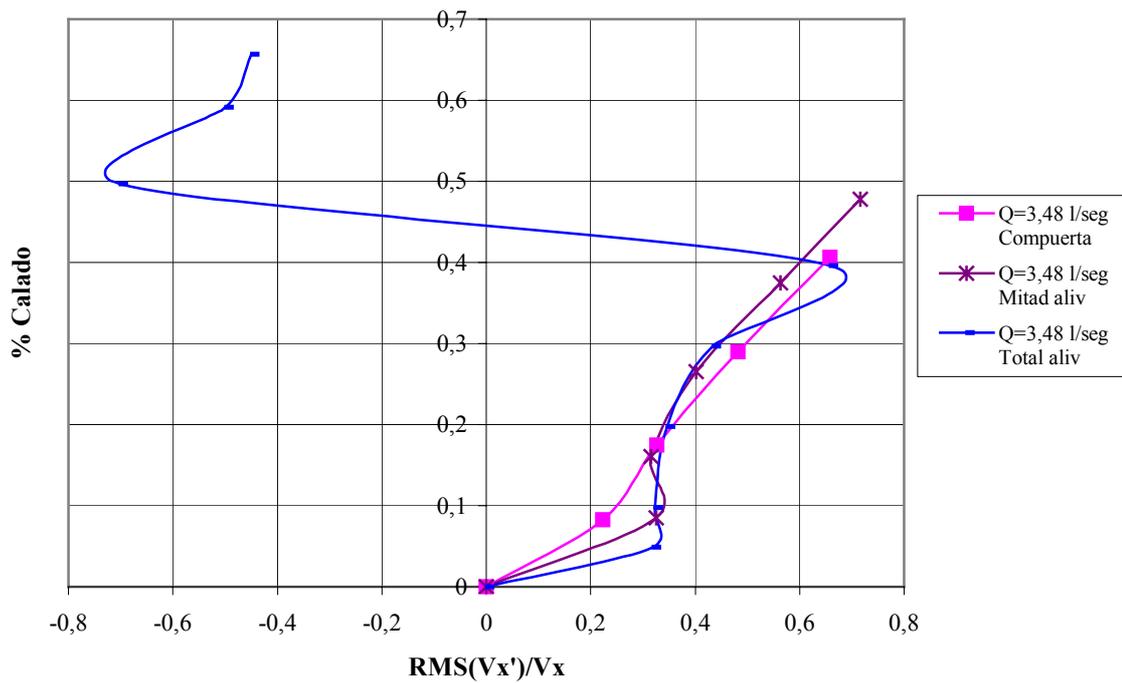
A2-35

Perfiles a mitad del resalto sumergido para $Q=4,18$ l/seg



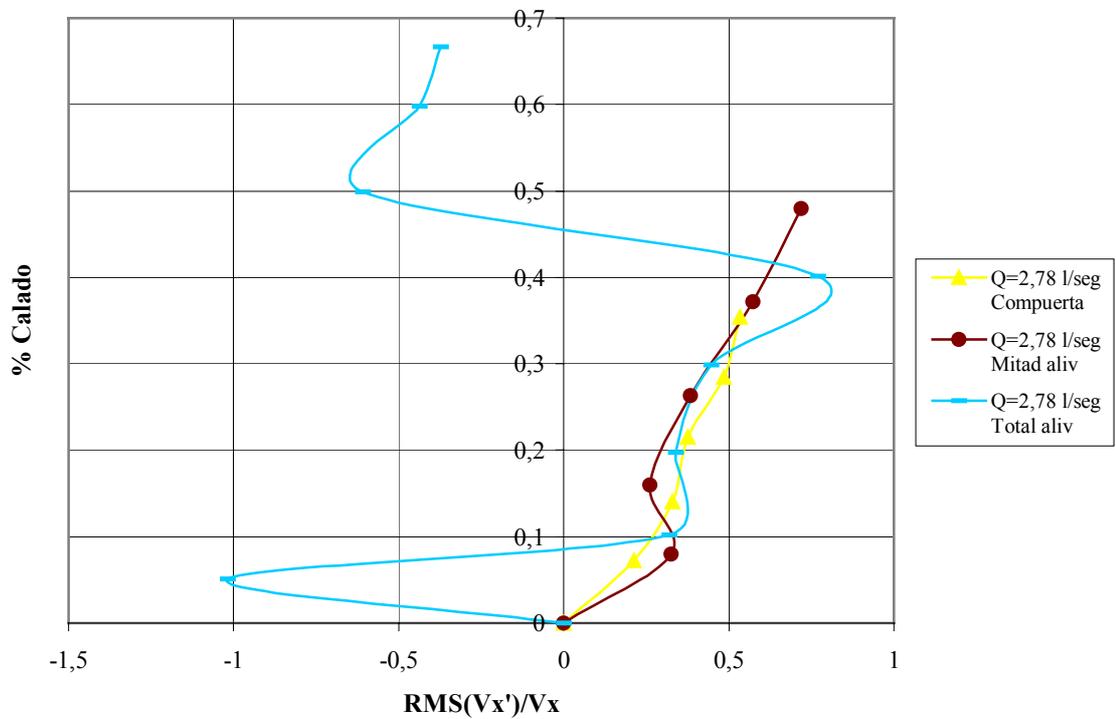
A2-36

Perfiles a mitad del resalto sumergido para Q=3,48 l/seg



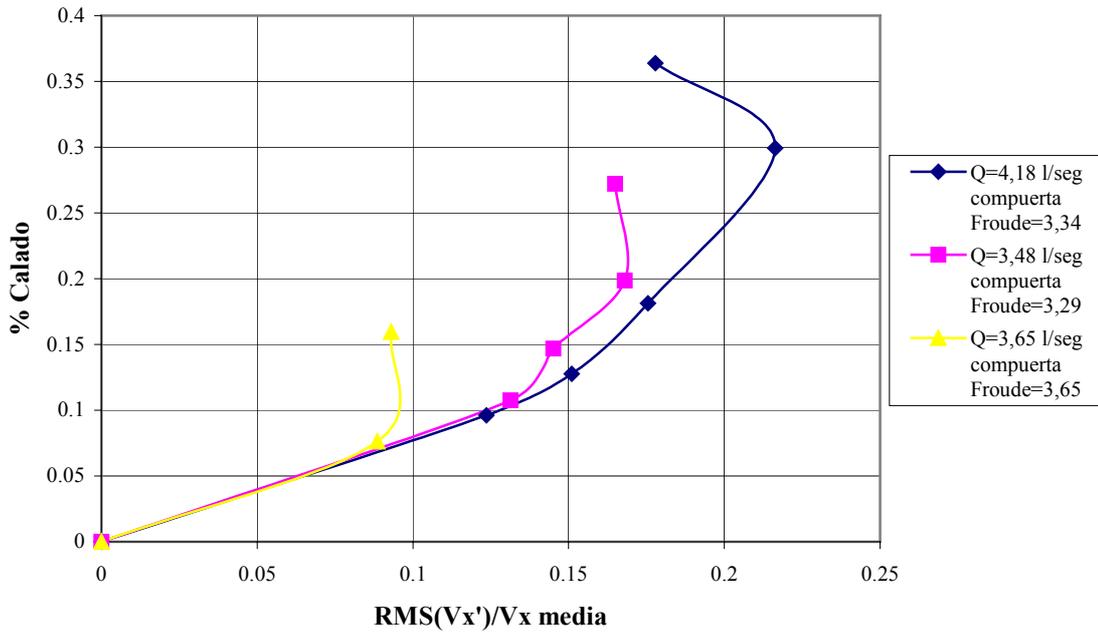
A2-37

Perfiles a mitad del resalto sumergido para Q=2,78 l/seg



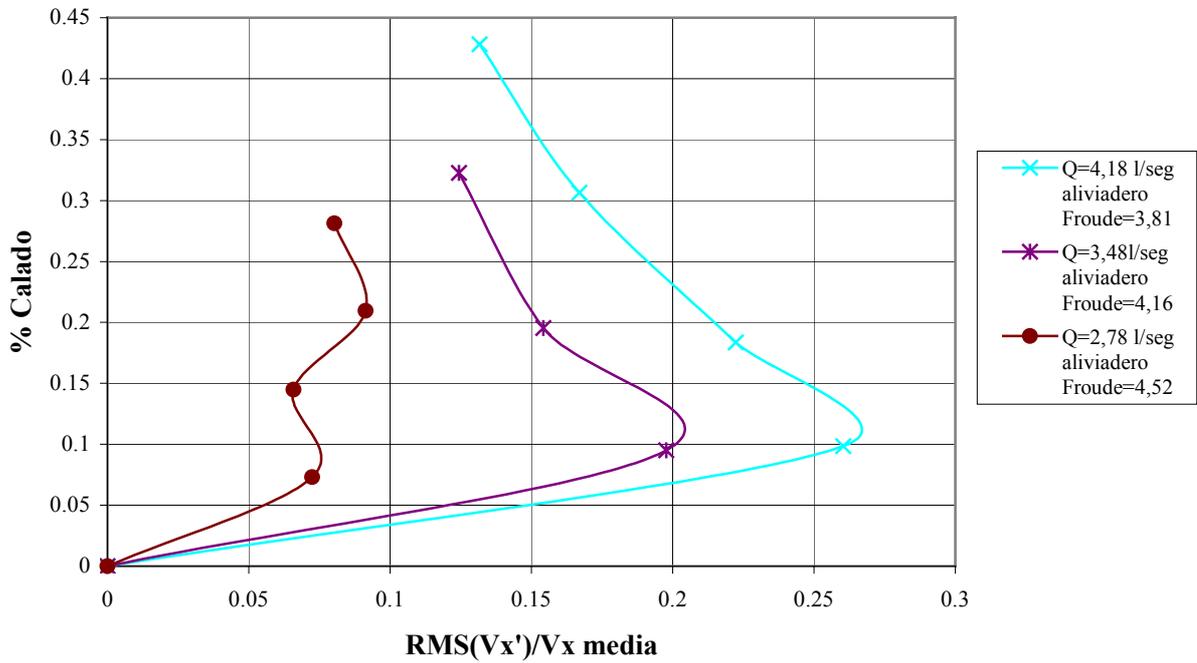
A2-38

Perfiles de velocidad central del resalto tras compuerta



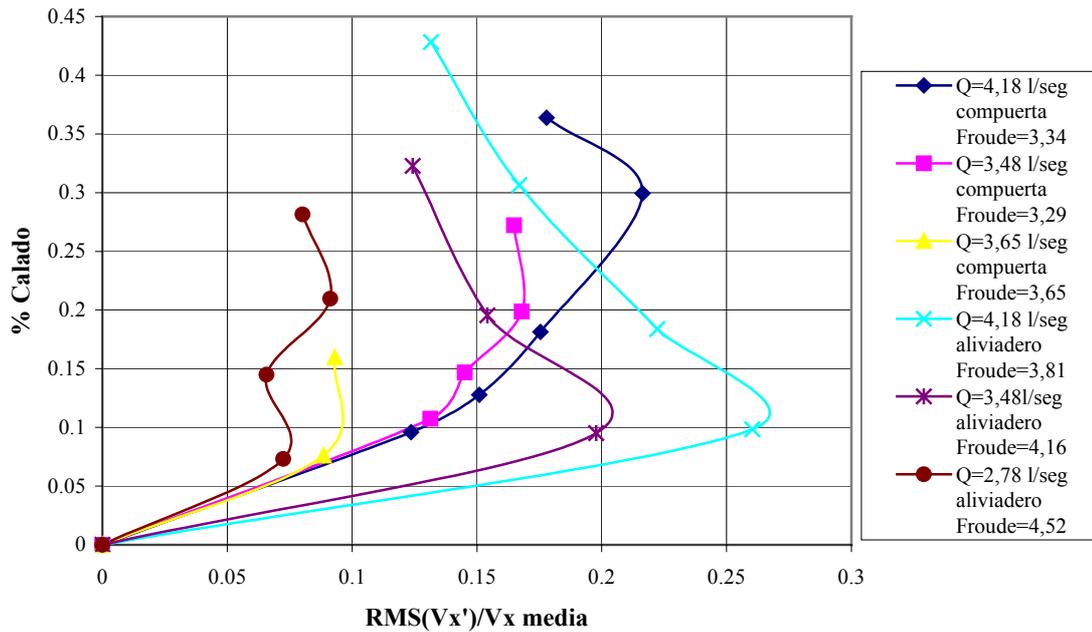
A2-39

Perfiles de velocidad central del resalto tras aliviadero



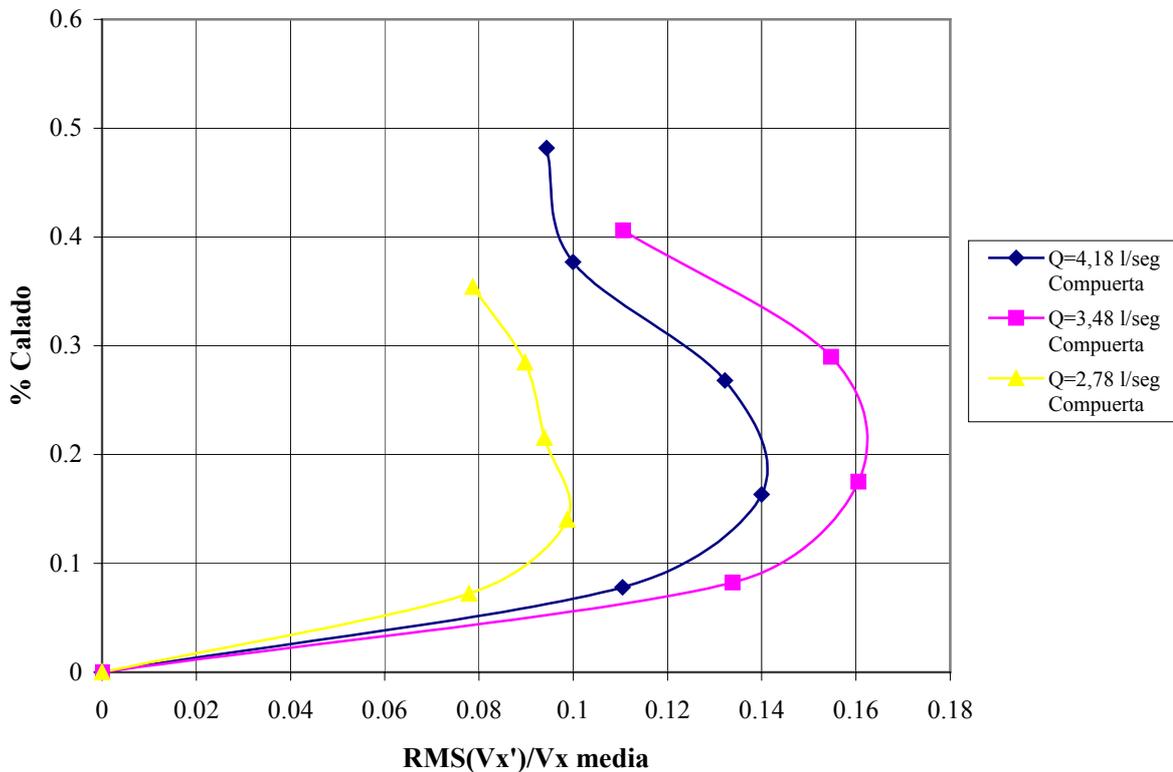
A2-40

Perfiles de velocidad central del resalto



A2-41

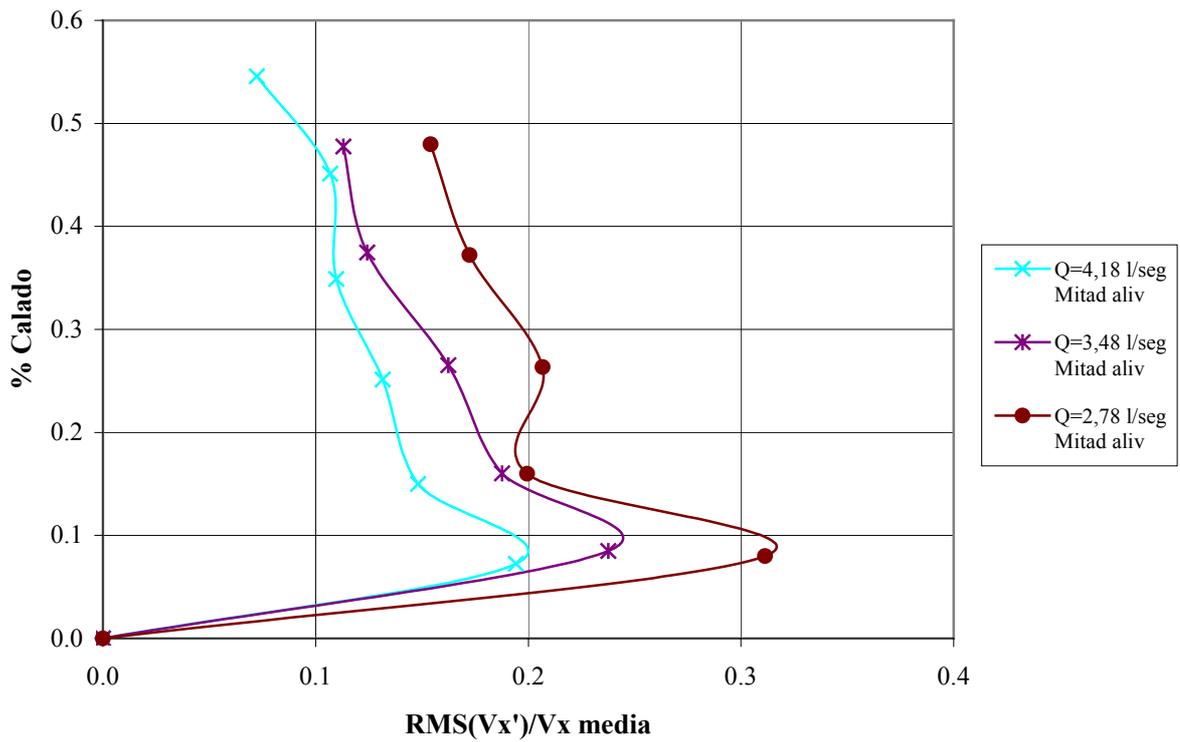
Perfiles a mitad del resalto sumergido tras compuerta



A2-42

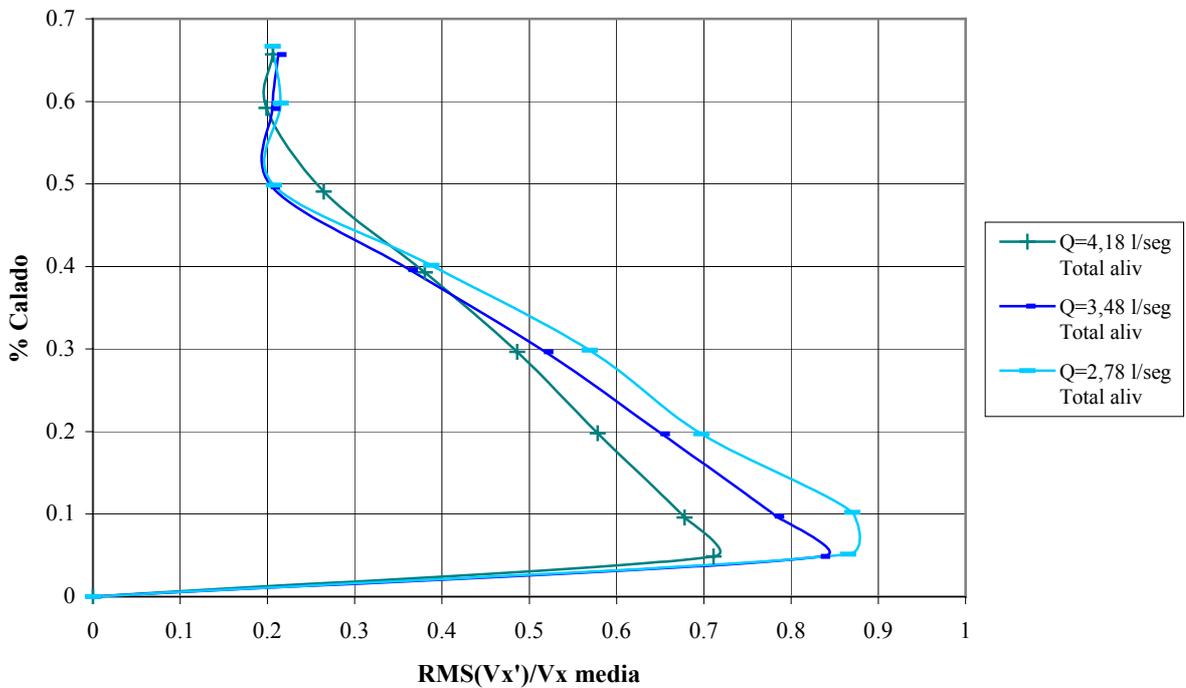
Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Perfiles a mitad del resalto sumergido hasta mitad del aliviadero



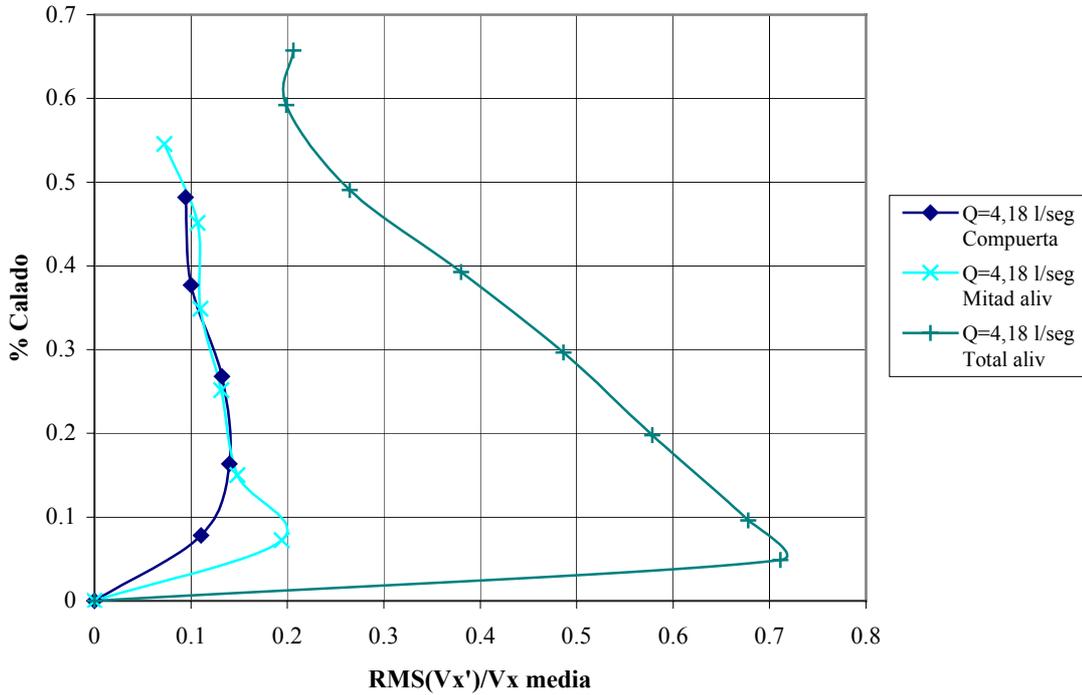
A2-43

Perfiles a mitad del resalto sumergido hasta coronación del aliviadero



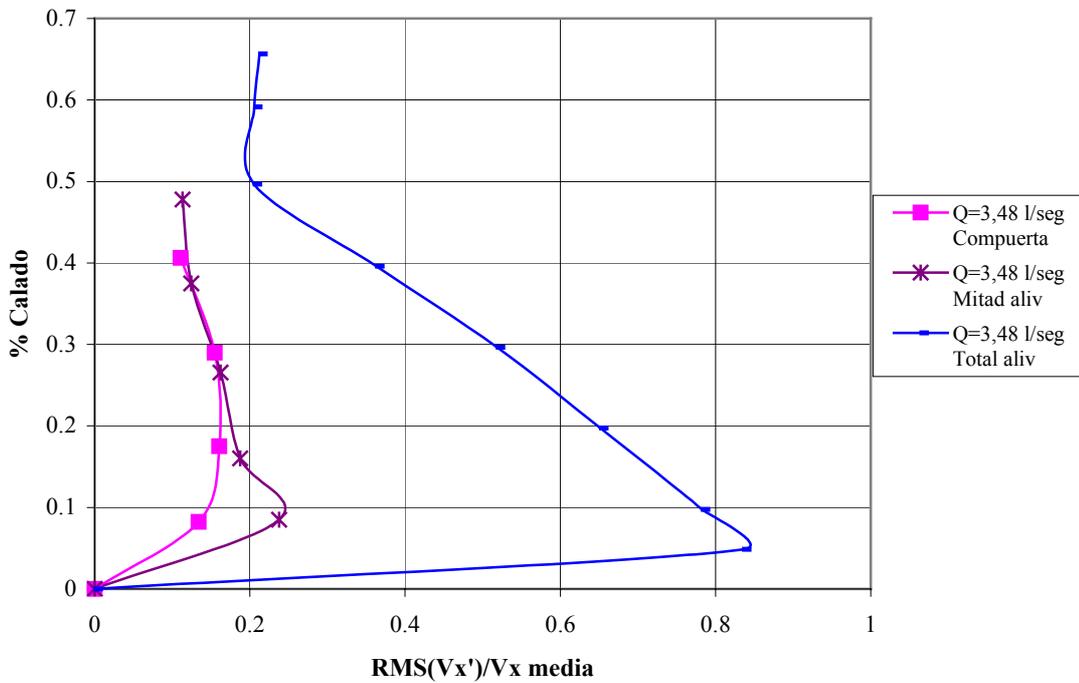
A2-44

Perfiles a mitad del resalto sumergido para Q=4,18 l/seg



A2-45

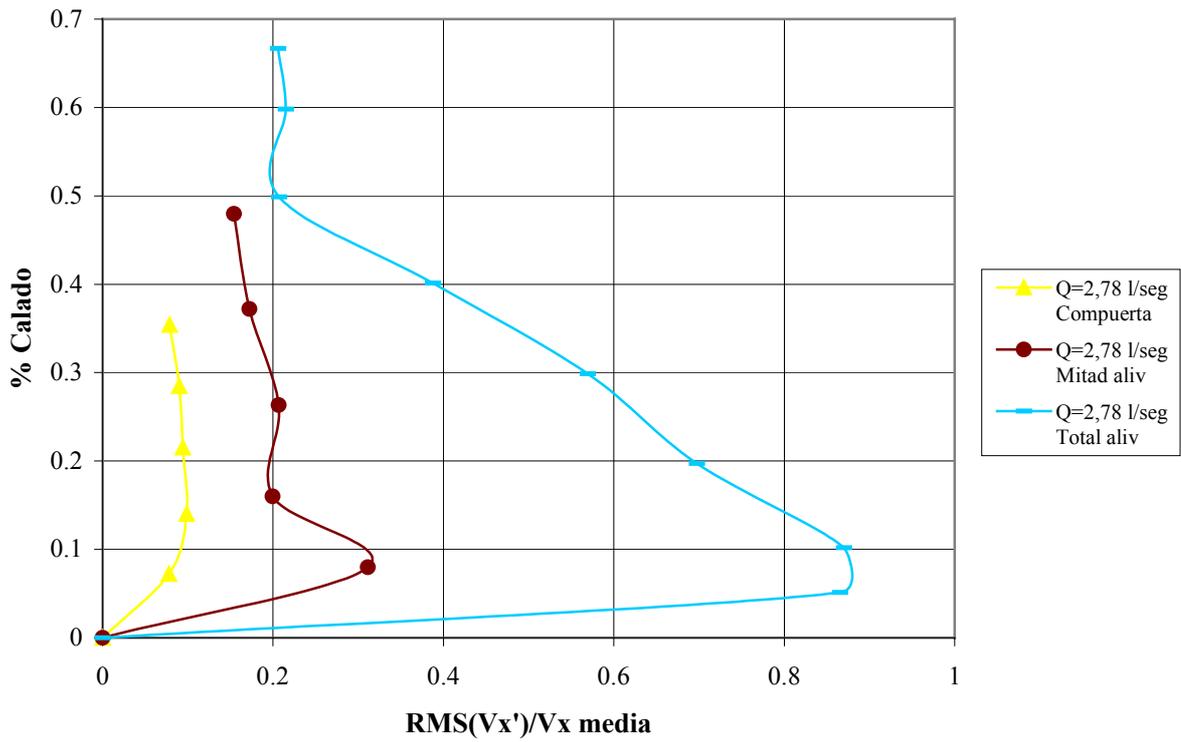
Perfiles a mitad del resalto sumergido para Q=3,48 l/seg



A2-46

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Perfiles a mitad del resalto sumergido para $Q=2,78$ l/seg

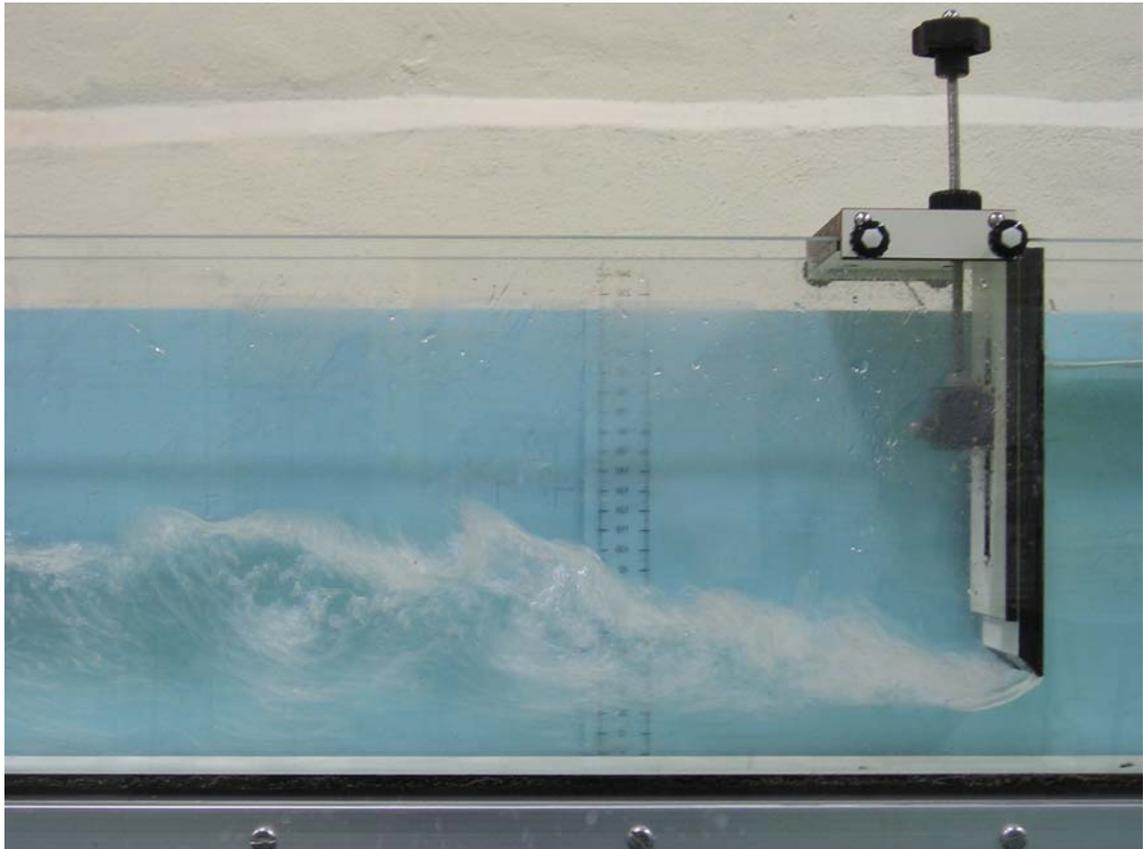


A2-47

ANEJO 3. ANEJO FOTOGRÁFICO.

A continuación, se muestra una sucesión de fotografías, para la comprensión de los tipos de resaltos que han sido analizados, cuya finalidad es resolver las posibles dudas que pudieran existir en la comprensión de las gráficas mostradas en la parte teórica.

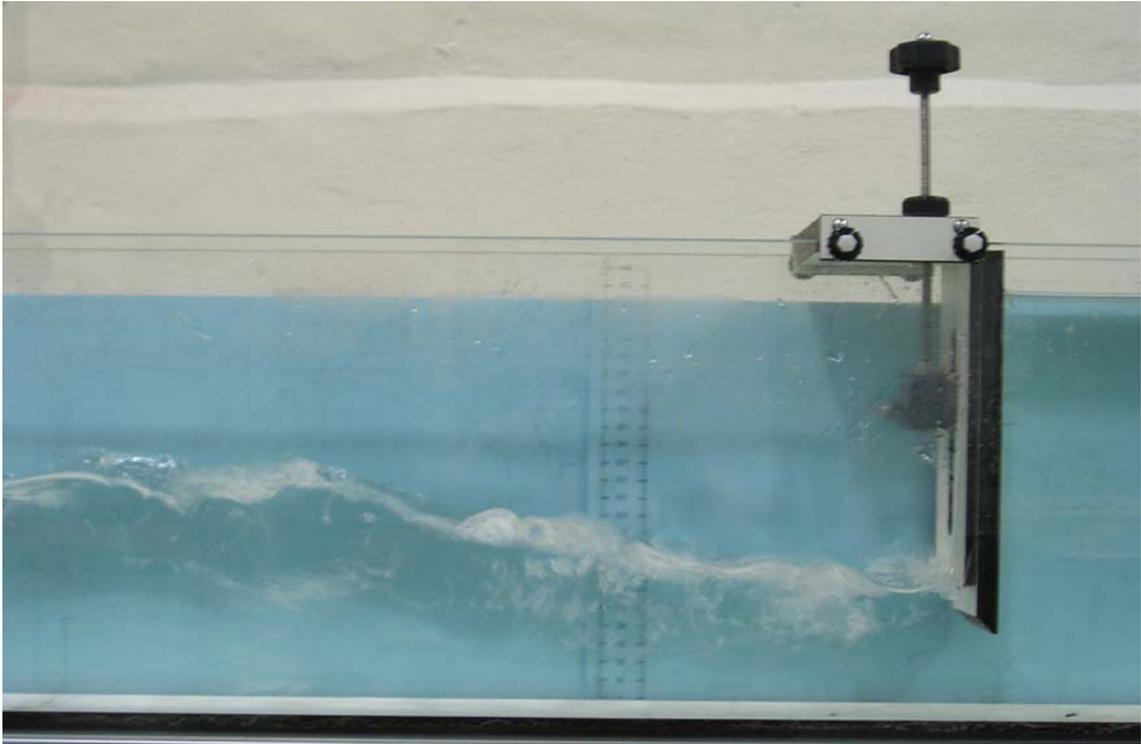
1. Resalto bajo compuerta no rechazado (estable).



En este caso, el momentum aguas abajo de la compuerta es exactamente igual al existente en la sección de calado contraído.

Se observa claramente la fuerte turbulencia que se produce en el resalto y la alta aireación introducida.

2. Resalto sumergido bajo compuerta.



En este resalto, el momentum de aguas debajo de la compuerta es mayor que el existente en el calado contraído, lo que provoca que el resalto se desplace hacia aguas arriba para contrarrestar la diferencia, produciéndose el resalto sumergido.

En el resalto sumergido la aireación disminuye al disminuir las altas velocidades.

3. Resalto no rechazado tras aliviadero.



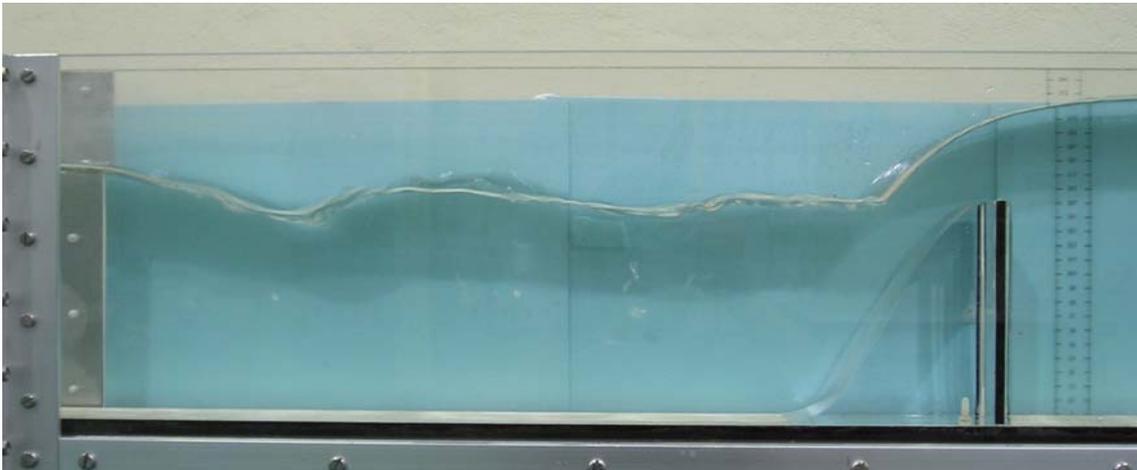
Al igual que en la primera fotografía, se aprecia la alta turbulencia producida y la gran cantidad de burbujas generadas.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

4. Resalto sumergido hasta la mitad del aliviadero.



5. Resalto sumergido hasta la coronación del aliviadero.



En las últimas dos fotografías se observa que conforme aumenta la sumergencia del resalto, disminuye la turbulencia y la aireación, conduciendo a una menor pérdida de energía.

Nota: todas las fotografías han sido realizadas para resaltos con $Q= 12 \text{ m}^3/\text{seg}$. Para el resto de los caudales, los resaltos presentan formas similares.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

APÉNDICE 1. FLUJO GRADUALMENTE VARIADO EN CANAL.

AP1.1 Ecuación dinámica de flujo gradualmente variado.

Se considera el perfil de flujo gradualmente variado en la longitud elemental dx de un canal abierto (figura AP1-1). La altura total de energía por encima del nivel de referencia en la sección 1 aguas arriba es

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{\bar{u}^2}{2g} \tag{AP1-1}$$

donde H es la altura total de energía en metros; z es la distancia vertical del fondo del canal por encima del nivel de referencia en metros; d es la profundidad de la sección de flujo en metros; θ es el ángulo de la pendiente del fondo; α es el coeficiente de energía; y $\bar{u} = Q/A$ es la velocidad media del flujo a través de la sección en metros/seg.

Se supone que θ y α son constantes a través del tramo del canal bajo consideración. Al tomar el fondo del canal como el eje x y al derivar la ecuación (AP1-1) con respecto a la longitud x del perfil de la superficie del agua, que se mide a lo largo del eje x , se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \cos \theta \frac{dd}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \left(\frac{\bar{u}^2}{2g} \right) \tag{AP1-2}$$

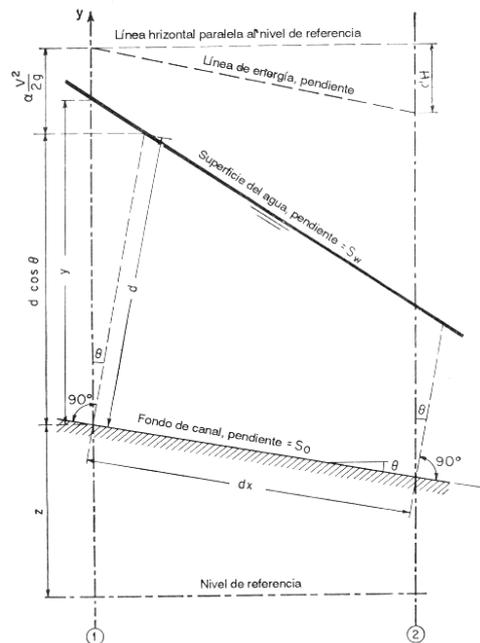


Figura AP1-1. Deducción de la ecuación de flujo gradualmente variado.

La pendiente se define como el seno del ángulo de la pendiente y se supone que es positiva si desciende en la dirección del flujo y negativa si asciende. Por tanto en la figura AP1-1, la pendiente de energía es $S_f = dH/dx$ y la pendiente del fondo del canal es $S_0 = \text{sen } \theta = -dz/dx$. Las pérdidas por fricción dH siempre son una cantidad negativa en la dirección del flujo (a menos que se añada energía exterior al curso del flujo) y que el cambio en la elevación del fondo dz es una cantidad negativa cuando la pendiente desciende.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Al sustituir estas pendientes en la ecuación (AP1-2) y al resolver para dd/dx se tiene

$$\frac{dd}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{\cos \theta + \alpha d(\bar{u}/2g)/dd} \quad (\text{AP1-3})$$

Ésta es la ecuación diferencial general para flujo gradualmente variado, conocida como ecuación dinámica del flujo gradualmente variado, o simplemente como la ecuación de flujo gradualmente variado. Representa la pendiente de la superficie con respecto al fondo del canal. La profundidad d se mide desde el fondo del canal, y el fondo del canal se toma como el eje x . La pendiente de la superficie del agua es igual a la pendiente S_0 del fondo del canal si $dd/dx = 0$, menor que S_0 si dd/dx es positiva, y mayor que S_0 si dd/dx es negativa. En otras palabras, la superficie del agua es paralela al fondo del canal cuando $dd/dx=0$, aumenta cuando dd/dx es positivo y disminuye cuando dd/dx es negativo.

En la ecuación anterior el ángulo θ de la pendiente se ha supuesto constante o independiente de x . De otra manera, debería añadirse un nuevo término, $-d \operatorname{sen} \theta (d\theta/dd)$, donde θ es una función de x , que debe sumarse al denominador. Para θ pequeño, $\cos \theta \approx 1$, $d \approx y$ y $dd/dx \approx dy/dx$. De esta forma la ecuación (AP1-3) se convierte en

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 + \alpha d(\bar{u}^2/2g)/dy} \quad (\text{AP1-4})$$

o bien, con $dA/dx = B \cdot dy/dx$ (figura III-2):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_e}{\cos \theta - \alpha F^2} \quad (\text{AP1-5})$$

donde $F = \frac{\bar{u}}{\sqrt{g \cdot A/B}}$, siendo F el número de froude.

En la mayor parte de los problemas la pendiente del canal es pequeña; por tanto, se utilizará la ecuación (AP1-4) en los análisis siguientes.

El término $\alpha d(\bar{u}^2/2g)/dy$ en la ecuación de flujo variado representa el cambio en la altura de velocidad. Se ha supuesto que el coeficiente α es constante de una sección a la otra en el tramo del canal bajo consideración. De otra manera, el cambio en la altura de velocidad debería expresarse como $d(\alpha \bar{u}^2/2g)/dy$, donde α es función de x . Como $\bar{u} = Q/A$, Q es constante y $dA/dy = T$, el término de altura de velocidad puede desarrollarse de la siguiente manera:

$$\alpha \frac{d}{dy} \left(\frac{\bar{u}^2}{2g} \right) = \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{dA^{-2}}{dy} = -\frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} = -\frac{\alpha Q^2 T}{gA^3} \quad (\text{AP1-6})$$

Como el factor de relación $Z = \sqrt{A^3/T}$, la anterior ecuación puede escribirse como

$$\alpha \frac{d}{dy} \left(\frac{\bar{u}^2}{2g} \right) = -\frac{\alpha Q^2}{gZ^2} \quad (\text{AP1-7})$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Se supone que un flujo crítico con caudal igual a Q ocurre en la sección, es decir

$$Q = Z_c \sqrt{\frac{g}{\alpha}} \quad (\text{AP1-8})$$

donde Z_c es el factor de sección para el cálculo de flujo crítico correspondiente al caudal Q y a la profundidad y_c . El símbolo Z_c utilizado aquí debe distinguirse del Z de la ecuación (AP1-7). El símbolo Z simplemente representa el valor numérico de $\sqrt{A^3/T}$, que se calcula para el caudal Q con una profundidad igual a y y del flujo gradualmente variado. El valor de Z_c es el factor de sección, que se calcula para Q con la profundidad y_c como si el flujo fuera crítico. Al sustituir la ecuación (AP1-8) para Q en la ecuación (AP1-7) y al simplificar,

$$\alpha \frac{d}{dy} \left(\frac{\bar{u}^2}{2g} \right) = - \frac{Z_c^2}{Z^2} \quad (\text{AP1-9})$$

El término S_f de la ecuación (AP1-4) representa la pendiente de energía. De acuerdo con la primera suposición del apartado anterior, esta pendiente de una sección de canal con flujo gradualmente variado es igual a la pendiente de energía del flujo uniforme que tiene la velocidad y el radio hidráulico de la sección. Cuando se utiliza la ecuación de Manning, la pendiente de energía es

$$S_f = \frac{n^2 \bar{u}^2}{\phi^2 R^{4/3}} = \frac{n^2 \bar{u}^2}{2,22 R^{4/3}} \quad (\text{AP1-10})$$

Cuando se utiliza la ecuación de Chézy,

$$S_f = \frac{\bar{u}^2}{C^2 R} \quad (\text{AP1-11})$$

La conductividad del canal se define, a partir de la ecuación de Manning en la cuál el parámetro $AR^{2/3}$ es el factor de sección, como

$$K = \frac{\phi}{n} AR^{2/3} = \frac{Q}{\sqrt{S}} \quad (\text{AP1-12})$$

siendo $\phi=1,00$ si son unidades del SI y $\phi=1,49$ si son unidades inglesas.

En una forma general, expresada en términos de la conductividad K , la pendiente de energía de la ecuación (AP1-12) puede escribirse como

$$S_f = \frac{Q^2}{K^2} \quad (\text{AP1-13})$$

Suponiendo que un flujo uniforme con caudal igual a Q ocurre en la sección. La pendiente de energía será igual a la pendiente del fondo, y la ecuación (AP1-13) puede escribirse como

$$S_o = \frac{Q^2}{K_n^2} \quad (\text{AP1-14})$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

donde K_n es la conductividad para el flujo uniforme con una profundidad y_n . Esta K_n debe distinguirse de K en la ecuación (AP1-13). La notación K representa el valor numérico de la conductividad correspondiente a una profundidad y y del flujo gradualmente variado. El valor K_n es la conductividad calculada para Q correspondiente a la profundidad y_n como si el flujo se considerara uniforme.

Al dividir la ecuación (AP1-13) por la ecuación (AP1-14),

$$\frac{S_f}{S_0} = \frac{K_n^2}{K^2} \quad (\text{AP1-15})$$

Al sustituir las ecuaciones (AP1-9) y (AP1-15) en la ecuación (AP1-4),

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1 - (K_n/K)^2}{1 - (Z_c/Z)^2} \quad (\text{AP1-16})$$

Ésta es otra forma de la ecuación de flujo gradualmente variado.

Existen otras formas muy conocidas de la ecuación de flujo gradualmente variado que pueden ser fácilmente deducidas, como

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1 - (K_n/K)^2}{1 - r(K_n/K)^2} \quad (\text{AP1-17})$$

donde $r = S_0/S_{cn}$, o la relación de la pendiente del canal con respecto a la pendiente crítica en la profundidad normal del caudal Q ,

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1 - (Q/Q_n)^2}{1 - (Q/Q_c)^2} \quad (\text{AP1-18})$$

donde Q es el caudal determinado para el flujo gradualmente variado con la profundidad real y , Q_n es el caudal normal con una profundidad de flujo igual a y , y Q_c es el caudal crítico correspondiente a una profundidad igual a y . Por tanto

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - Q^2/C^2 A^2 R}{1 - \alpha Q^2/gA^2 D} \quad (\text{AP1-19})$$

donde D es la profundidad hidráulica, C es el factor de resistencia de Chézy y el resto de la notación es igual a como se definió anteriormente.

Para aplicar en forma práctica la ecuación básica en la determinación de la superficie libre del agua $y(x)$, en el caso de flujo estacionario gradualmente variado en un canal prismático, se requiere, además, la ecuación (III-2) y las relaciones para la profundidad crítica y_c y la profundidad normal y_n . Por otra parte, si se utiliza la fórmula del caudal de Manning para encontrar y_n , se obtiene para la profundidad crítica y_c :

$$Q = A\bar{u}_c = A\sqrt{gA/B} \quad (\text{AP1-20})$$

y para la profundidad normal y_n

$$Q = A\bar{u}_n = (AR^{2/3})S_0^{1/2}n_s \quad (\text{AP1-21})$$

La ecuación (AP1-5) puede formularse directamente como función de las profundidades de agua y_c e y_n . Para el caso de un canal rectangular ancho ($B \gg y$), si se sustituyen $A = B \cdot y$ y $R \approx y$ en las ecuaciones mencionadas, la igualdad entre las ecuaciones (III-2) y (AP1-21) conduce a:

$$Q = Byn_s y^{2/3} S_e^{1/2} = By_n n_s y_n^{2/3} S_0^{1/2}$$

$$S_e = S_0 (y_n/y)^{10/3}$$

y de la ecuación (AP1-20), si $Q = By\bar{u}$:

$$By\bar{u} = By_c \sqrt{gy_c}$$

$$F^2 = \bar{u}^2 / (gy) = (y_c/y)^3$$

Si se introducen estas expresiones en la ecuación (AP1-5), se obtiene entonces:

1. Cuando se utiliza la ecuación de Manning,

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1 - (y_n/y)^{10/3}}{1 - (y_c/y)^3} \quad (\text{AP1-22})$$

2. Cuando se utiliza la ecuación de Chézy,

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1 - (y_n/y)^3}{1 - (y_c/y)^3} \quad (\text{AP1-23})$$

siempre que se pueda suponer, en forma simplificada, que:

- La pendiente del canal es pequeña, tal que $\cos \theta \approx 1$; y la distribución de velocidades es uniforme; por tanto, $\alpha \approx 1$.

Este resultado puede generalizarse de tal forma que la ecuación diferencial para la ubicación de la superficie libre del agua de un flujo estacionario, gradualmente variado en un canal prismático, considerando las hipótesis anteriores es:

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1 - (y_n/y)^N}{1 - (y_c/y)^M} \quad (\text{AP1-24})$$

donde, para los valores numéricos de los exponentes M y N es válido que:

- M depende de la forma de la sección transversal y .
- N depende de la forma de la sección transversal como de la fórmula utilizada para el caudal.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Estos exponentes se analizarán con más detenimiento en el apartado de cálculo de flujo gradualmente variado.

Si se desean obtener mayores detalles en el cálculo de la superficie libre del agua se debe recurrir a cálculos por computadora existiendo, además del método de las diferencias finitas, el método de la integración directa.

AP1.2 Características de los perfiles de flujo.

La ecuación dinámica de flujo gradualmente variado, desarrollada en el apartado anterior, expresa la pendiente de la superficie longitudinal del flujo respecto al fondo del canal. Por tanto puede utilizarse para describir las características de varios perfiles de flujo o perfiles de la superficie de agua del flujo. Por simplicidad, se considera el canal como prismático y se utiliza la ecuación (AP1-16) para el análisis. Se supone que los valores de K y Z en esta ecuación se incrementan o disminuyen continuamente con la profundidad y . Esto es cierto para todas las secciones de canales abiertos, excepto en los conductos con claves que se cierran gradualmente. En tales conductos, el valor de K , después de alcanzar su valor máximo, disminuye a medida que la profundidad de flujo se aproxima a la parte superior del conducto.

El perfil de flujo representa la curva de la superficie del flujo. Representa una curva de remanso si la profundidad de flujo se incrementa en la dirección del flujo (la curva longitudinal de la superficie del agua represada aguas arriba de una presa o en un río tributario debido a una creciente en la corriente principal. Muchos autores han extendido este significado para incluir todos los tipos de perfiles de flujo), y una curva de caída si la profundidad disminuye con la dirección del flujo. Siguiendo la descripción de la sección anterior, puede verse que el perfil de flujo es una curva de remanso si dy/dx es positiva y una curva de caída si dy/dx es negativa.

Para una curva de remanso, dy/dx es positivo; por tanto, la ecuación (AP1-16) da dos casos posibles:

1. $1-(K_n/K)^2 > 0$ y $1-(Z_c/Z)^2 > 0$
2. $1-(K_n/K)^2 < 0$ y $1-(Z_c/Z)^2 < 0$

Como los valores de K y Z se incrementan o disminuyen continuamente con la profundidad y , el primer caso indica que $y > y_n$ e $y > y_c$. Como $y > y_c$, el flujo debe ser subcrítico. Si $y > y_n > y_c$, el flujo subcrítico debe ocurrir en un canal suave (es decir, un canal con pendiente subcrítica). Por otro lado, si $y > y_c > y_n$, el flujo subcrítico debe ocurrir en un canal empinado (es decir, un canal con pendiente supercrítica). De igual manera el segundo caso indica que $y < y_n$ e $y < y_c$. El flujo correspondiente debe ser supercrítico; y éste ocurre en un canal suave si $y_n > y_c > y$, y en un canal empinado si $y_c > y_n > y$.

Para una curva de caída, dy/dx es negativo y la ecuación (AP1-16) da dos casos posibles:

1. $1-(K_n/K)^2 > 0$ y $1-(Z_c/Z)^2 < 0$
2. $1-(K_n/K)^2 < 0$ y $1-(Z_c/Z)^2 > 0$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

El primer caso indica que $y_c > y > y_n$ y, por tanto, que el flujo es supercrítico en un canal empinado. Del mismo modo, el segundo caso indica que $y_n > y > y_c$, o que el flujo es subcrítico en un canal suave.

Cuando la superficie del agua es paralela al fondo del canal, $dy/dx = 0$, y la ecuación (AP1-16) da $1 - (K_n/K)^2 = 0$, o $y = y_n$, lo que indica un flujo uniforme. El flujo es uniforme crítico si $y = y_n = y_c$, uniforme subcrítico si $y = y_n > y_c$ y uniforme supercrítico si $y_c > y_n = y$.

Para análisis, la pendiente del canal puede clasificarse como pendiente favorable y pendiente no favorable. Una pendiente favorable es una pendiente del canal que cae en la dirección del flujo. Por tanto, una pendiente favorable es siempre positiva y puede llamarse pendiente positiva. Una pendiente favorable o positiva puede ser crítica, suave (subcrítica) o inclinada (supercrítica). Una pendiente no favorable puede ser horizontal o adversa. Una pendiente horizontal es una pendiente cero. Una pendiente adversa es una pendiente negativa que aumenta en la dirección del flujo.

En un canal de pendiente horizontal o $S_0 = 0$, la ecuación (AP1-14) da $K_n = \infty$ o $Y_n = \infty$. Como $K_n \sqrt{S_0} = Q$, la ecuación (AP1-26) para canales horizontales puede escribirse como

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-(Q/K)^2}{1 - (Z_c/Z)^2} \tag{AP1-25}$$

Al considerar $y_n = \infty$, esta ecuación indica dos condiciones posibles:

1. $1 - y_n > y > y_c$
2. $y_n > y_c > y$

El primer caso representa un flujo subcrítico con una curva de caída, debido a que dy/dx se muestra como negativo. El segundo caso representa un flujo supercrítico con una curva de remanso, debido a que dy/dx se muestra como positivo.

En un canal de pendiente adversa o $S_0 < 0$, la ecuación (AP1-14) indica que, para valores negativos de S_0 , K_n debe ser imaginario o K_n^2 debe ser negativo. En consecuencia, la ecuación (AP1-16) da dos casos posibles:

1. Un flujo subcrítico en el cual $y > y_c$
2. Un flujo supercrítico en el cual $y < y_c$

En el primer caso dy/dx es negativo y el perfil de flujo es una curva de caída. En el segundo caso dy/dx es positivo y el perfil de flujo es una curva de remanso. Como K_n es imaginario, el valor de y_n no puede expresarse con facilidad. De hecho, un valor positivo finito de y_n es físicamente imposible debido a que un flujo uniforme no puede ocurrir en un canal adverso. (Algunos autores toman y_n como negativo. Entonces, mediante la ecuación de Chézy, $K = CAR^{1/2}$ y $K^2 = C^2 A^2 R$. En consecuencia, para un valor negativo de K^2 , R y, por tanto, y_n deben ser negativos. En el supuesto del valor de y_n como positivo, el C de Chézy se toma como un valor imaginario con el fin de mantener los valores de A y R invariablemente positivos.)

Los análisis anteriores se resumen en la tabla AP1-1 y en las figuras AP1-2 y AP1-5. Algunos aspectos importantes de los perfiles de flujo teórico son los siguientes:

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Pendiente del canal	Designación de perfil			Relación relativa de y a y_N e y_c	Tipo de curva	Tipo de flujo
	Zona 1	Zona 2	Zona 3			
Suave $0 < S_0 < S_c$		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 $S_0 = S_c > 0$		C1		$y > y_c = y_N$	Remanso	Subcrítico
		C2		$y_c = y = y_N$	Paralela al fondo del canal	Uniforme-crítico
		C3		$y_c = y_N > y$	Remanso	Supercrítico
Fuerte $S_0 > S_c > 0$		S1		$y > y_c > y_N$	Remanso	Subcrítico
		S2		$y_c > y > y_N$	Caída	Supercrítico
		S3		$y_c > y_N > y$	Remanso	Supercrítico
Horizontal $S_0 = 0$		Ninguna				
		H2		$y_N > y > y_c$	Caída	Subcrítico
		H3		$y_N > y_c > y$	Remanso	Supercrítico
Adversa $S_0 < 0$		Ninguna				
		A2		$y_N^* > y > y_c$	Caída	Subcrítico
		A3		$y_N^* > y_c > y$	Remanso	Supercrítico

* y_n en paréntesis se supone como un valor positivo.

Tabla AP1-1. Tipos de perfiles de flujo en canales prismáticos.

A. Discontinuidad en el perfil de flujo. Cuando $y = y_c$, la ecuación (AP1-16) indica que $dy/dx = \infty$, es decir, que el perfil de flujo debe ser vertical al cruzar la línea de profundidad crítica. Si la profundidad de flujo cambia súbitamente de un nivel bajo a un nivel alto al cruzar la línea de profundidad crítica, ocurre un resalto hidráulico que representa una discontinuidad en el perfil de flujo. Si la profundidad cambia de un nivel alto a un nivel bajo, entonces ocurre una caída hidráulica. Se aprecia que en la línea de profundidad crítica o cerca de ella, el perfil de flujo produce una curvatura tan alta que la suposición de flujo paralelo para la definición del flujo gradualmente variado introduce errores grandes. De hecho, el flujo puede volverse tan curvilíneo o rápidamente variado que la teoría y las ecuaciones desarrolladas en la sección anterior se vuelven inaplicables. Por tanto, la ecuación (AP1-16) no debe utilizarse para describir o calcular con exactitud el perfil de flujo cerca de la profundidad crítica.

B. Comportamiento del perfil de flujo en profundidades específicas. Para el análisis siguiente, es importante reconocer el comportamiento teórico del perfil de flujo en algunas profundidades específicas. Cuando $y = \infty$ la ecuación (AP1-16) muestra que $dy/dx = S_0$, es decir, que la superficie de flujo es horizontal. Cuando $y = y_n$, la ecuación (AP1-16) muestra que $dy/dx = 0$, es decir, que la superficie de flujo es paralela al fondo del canal; esto significa flujo uniforme. Cuando $y = y_c$ puede ocurrir un resalto hidráulico o una caída hidráulica en el perfil de flujo. Cuando $y = y_n = y_c$, el flujo es uniforme y crítico.

Puntos de inflexión en el perfil de flujo. Cuando $y = 0$, la ecuación (AP1-16) parece producir una forma indeterminada ∞/∞ para dy/dx . Sin embargo, puede demostrarse que el comportamiento teórico del perfil de flujo en $y = 0$ o cerca de cero depende del tipo de ecuación de flujo uniforme que se utilice para el cálculo. Para un canal rectangular ancho, la ecuación (AP1-22) representa la pendiente del perfil de flujo si se utiliza la ecuación de Manning. Mediante esta ecuación puede demostrarse que dy/dx se vuelve infinito cuando $y = 0$. Esto significa que la curva es vertical en el fondo del canal. A

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

partir de la ecuación de Chézy puede demostrarse que $dy/dx = S_0(y_n/y_c)^3$ para $y = 0$. Esto significa que la curva forma un cierto ángulo con el fondo. En apariencia debe existir un punto de inflexión en el perfil de flujo cuando $y < y_c < y_n$. Investigaciones matemáticas hechas por Gunder y Mouret han revelado que este punto de inflexión se localiza a una profundidad muy cerca del fondo del canal (figura AP1-3) (Se cree que el aspecto de los puntos de inflexión fue analizada por primera vez por Merten). De la misma manera, Mouret encontró que existe otro punto de inflexión en el perfil de flujo cuando $y > y_n > y_c$ (figura AP1-3) (Este punto de inflexión ocurre porque el perfil debe tener una pendiente horizontal al cruzar el perfil transicional y luego debe curvarse hacia adelante tangente al nivel del embalse aguas abajo).

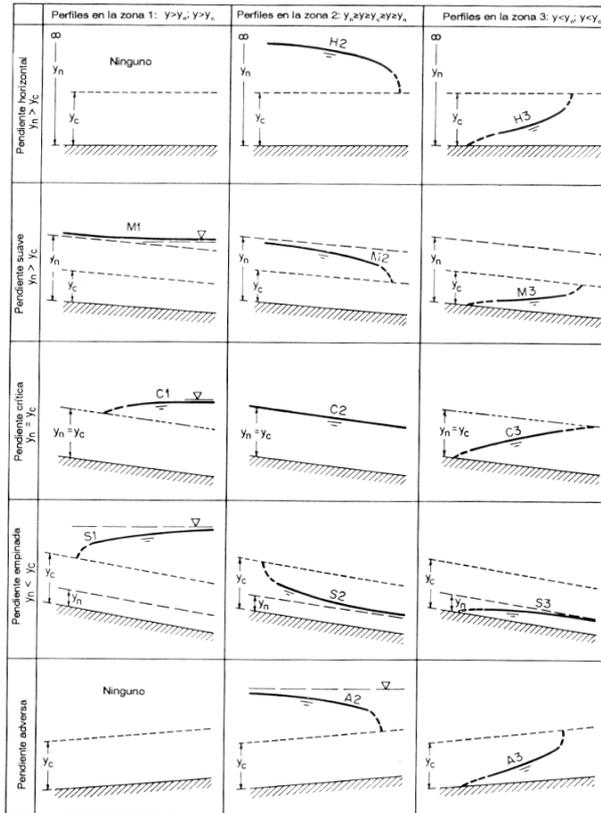


Figura AP1-2. Clasificación de los perfiles de flujo en flujo gradualmente variado.

AP1.3 Clasificación de los perfiles de flujos.

Para examinar los perfiles de flujo gradualmente variado, primero se necesita desarrollar un método sistemático para clasificar los perfiles que pueden presentarse en un canal dado. Debe recordarse que

$$F^2 = \frac{Q^2 T}{g A^3}$$

para un canal de forma arbitraria, la ecuación (AP1-10) puede escribirse como

$$S_f = \frac{n^2 Q^2 P^{4/3}}{\phi^2 A^{10/3}}$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación (AP1-5), para $\cos\theta=1$ y $\alpha=1$, se obtiene

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - (n^2 Q^2 P^{4/3} / \varphi^2 A^{10/3})}{1 - (Q^2 T / g A^3)} \quad (\text{AP1-26})$$

Para un valor dado de Q , F y S_f son funciones del tirante y , y en un canal ancho F y S_f variarán casi en la misma forma que y dado que $P \approx T$ y tanto S_f como F tienen una fuerte dependencia inversa en el área de flujo. Además, al aumentar y , F y S_f decrecerán. Por definición $S_f = S_0$ cuando $y = y_N$; por tanto, debe cumplirse que:

$$S_f \leq S_0 \text{ correspondiente a } y \leq y_N \quad (\text{AP1-27})$$

$$F \leq 1 \text{ correspondiente a } y \leq y_c \quad (\text{AP1-28})$$

Estas desigualdades dividen al canal en tres secciones en la dimensión vertical (Figura AP1-3). Por convención, estas secciones se numeran del 1 al 3 empezando desde arriba. Para un canal con pendiente suave o subcrítica (Figura AP1-3) se consideran los siguientes resultados, donde y es el tirante real del flujo:

1. Zona 1. El espacio por encima de la línea superior:
 $y > y_N > y_c$; $S_0 > S_f$, $F < 1$; por tanto $dy/dx > 0$.
2. Zona 2. El espacio entre las dos líneas:
 $y_N > y > y_c$; $S_0 < S_f$, $F < 1$; por tanto $dy/dx < 0$.
3. Zona 3. El espacio por debajo de la línea inferior:
 $y_N > y_c > y$; $S_0 < S_f$, $F > 1$; por tanto $dy/dx > 0$.

Una vez determinado el signo de dy/dx para cada región, se puede predecir el comportamiento del perfil de la superficie del agua.

Se cree que una descripción y una clasificación completa de los diferentes perfiles de flujo fue dada por primera vez por Boudin.

Por tanto, para un caudal y unas condiciones de canal determinados las líneas de profundidad normal y las líneas de profundidad crítica dividen el espacio de un canal en tres zonas:

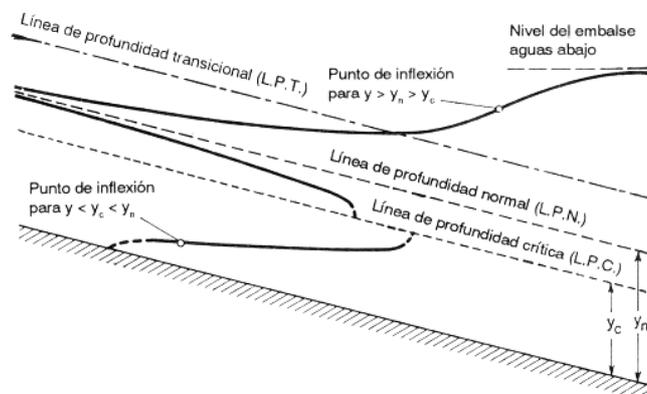


Figura AP1-3. Puntos teóricos de inflexión en perfiles de flujo.

Una de las dos líneas es la línea de flujo crítico (LPC), definida por $y = y_c$; y la otra es la línea de flujo normal (LPN), definida por $y = y_n$.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Si la superficie libre se acerca a una de estas dos líneas, de la siguiente ecuación (obtenida a partir de la ecuación (AP1-5) para $\cos\theta=1$ y $\alpha=1$), se determinan las condiciones de los límites:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_e}{1 - F^2} \quad (\text{AP1-29})$$

donde el número de Froude $F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot A/B}}$

- Zona 1: En este caso, en la frontera de aguas arriba, $y \rightarrow y_N$ y por definición $S_f \rightarrow S_0$ y $F \rightarrow 1$; por tanto, $dy/dx = 0$. En la frontera de aguas abajo, $y \rightarrow \infty$ y, S_f y F se aproximan a cero; por lo que $dy/dx \rightarrow S_0$, $S_e \rightarrow 0$ y $F \rightarrow 0$, y la superficie del agua se aproxima asintóticamente a una línea horizontal.
- Zona 2: En este caso, en la frontera de aguas arriba, $y \rightarrow y_N$ y por definición $S_f \rightarrow S_0$; por lo que $dy/dx \rightarrow 0$. En la frontera de aguas abajo, $y \rightarrow y_c$, $F \rightarrow 1$ y $dy/dx \rightarrow \infty$. La condición de frontera de aguas abajo no puede realmente cumplirse dado que la superficie del agua no puede formar un ángulo recto con el fondo del canal.
- Zona 3: En la frontera de aguas arriba, $y \rightarrow 0$ y, S_f y F tienden a infinito, dando como resultado que dy/dx tienda a un límite positivo finito. Este resultado es de interés limitado debido a que un tirante de cero no se puede presentar. En la frontera de aguas abajo, $y \rightarrow y_c$, la derivada dy/dx es positiva, y el tirante aumenta hasta que se llega al tirante conjugado y se forma el salto hidráulico.

Con el valor extremo $y \rightarrow \infty$ se introduce la condición para la superficie libre del agua en el caso de profundidades muy grandes; se observa que la superficie libre del agua es horizontal (la pendiente de la superficie libre dy/dx se mide con referencia al eje de las x, que a su vez tiene una pendiente decreciente S_0 , figura III-2). Por el contrario, para $y \rightarrow y_c$, la superficie libre tiende a una tangente en ángulo recto con el fondo del canal. Esto es debido a la hipótesis de una distribución hidrostática de presiones, que no es admisible en esta zona; el flujo con $y \rightarrow y_c$, cerca del borde de un escalón, corresponde a la categoría del flujo repentinamente variado.

Para la representación de los tipos de perfiles de flujo en las tres zonas delimitadas por las líneas del flujo crítico (LPC) y de flujo normal (LPN), se requiere el signo de la pendiente de la superficie libre del agua dy/dx . Refiriéndose siempre al fondo del canal, ésto significa que se tendrá un perfil creciente para $dy/dx > 0$ y un nivel de superficie libre decreciente para $dy/dx < 0$.

$$\begin{aligned} y > y_c & \text{ (Por encima de LPC), } F < 1 \\ y < y_c & \text{ (Por debajo de LPC), } F > 1 \\ y > y_c & \text{ (Por encima de LPN), } S_e < S_0 \\ y < y_c & \text{ (Por debajo de LPN), } S_e > S_0 \end{aligned} \quad (\text{AP1-30})$$

Si se aplican estos criterios, junto con los de las condiciones de los límites de las zonas, a canales con pendientes diferentes, se obtienen los tipos de perfiles de la superficie libre de agua que se muestran en la figura AP1-4a hasta d (las figuras presentan una fuerte distorsión; la escala longitudinal \gg que la vertical).

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

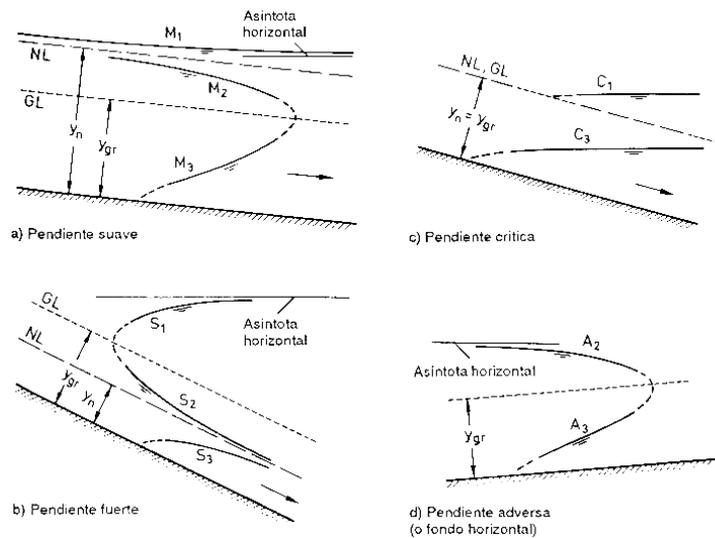


Figura AP1-4. Tipos de perfiles de la superficie libre del agua para flujo estacionario gradualmente variado en un canal prismático.

Atendiendo a estas zonas, los perfiles de flujo pueden clasificarse en trece tipos diferentes de acuerdo con la naturaleza de la pendiente del canal y la zona en la cual se encuentra la superficie del flujo. Estos tipos se designan como H2, H3; M1, M2, M3; C1, C2, C3; S1, S2, S3; y A2, A3; donde la letra describe la pendiente: H para horizontal, M para suave (subcrítica) ('mild' en inglés), C para crítica, S para empinada (supercrítica) ('steep' en inglés) y A para pendiente adversa, y el número representa el número de la zona. De los trece perfiles de flujo, doce son para flujo gradualmente variado, y uno, C2, es para flujo uniforme. A menudo ocurre un perfil de flujo continuo sólo en una zona. Las características generales de los perfiles se dan en la tabla AP1-1, y sus formas aparecen en las figuras AP1-2 y AP1-5. Como los perfiles cerca de la profundidad crítica y del fondo del canal no pueden definirse con exactitud mediante la teoría de flujo gradualmente variado, éstos se muestran con líneas punteadas. Varios de los perfiles de flujo se analizan a continuación:

A. Perfiles tipo M. $S_0 < S_c$ e $y_n > y_c$.

El perfil M1 representa la curva de remanso más conocida; es el más importante de todos los perfiles de flujo desde un punto de vista práctico. Este perfil ocurre cuando el extremo de aguas abajo de un canal suave largo se sumerge en un embalse hasta una profundidad mayor que la profundidad normal de flujo en el canal. Este perfil de flujo se ubica en la zona 1. El extremo de aguas arriba de la curva es tangente a la línea de profundidad normal, debido a que $dy/dx = 0$ cuando $y = y_n$; y en el extremo de aguas abajo es tangente a la superficie horizontal del embalse, debido a que $dy/dx = S_0$ cuando $y = \infty$. Ejemplos comunes del perfil M1 son el perfil por detrás de una presa en un río natural (figura AP1-5a) y el perfil en un canal que une dos embalses (figura AP1-5b).

Un perfil M2 ocurre cuando el fondo del canal en el extremo de aguas abajo se sumerge en un embalse con una profundidad menor que la normal. El extremo de aguas arriba del perfil de flujo es tangente a la línea de profundidad normal, debido a que $dy/dx = 0$ cuando $y = y_n$. Si la cantidad de sumergencia en el extremo de aguas abajo es menor que la profundidad crítica, el perfil terminará abruptamente, con su extremo tangente a una línea vertical en una profundidad igual a la profundidad crítica, debido a que $dy/dx = 0$ cuando $y = y_n$. Esto implica la formación de una caída hidráulica. Si la profundidad de

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

sumergencia en el extremo de aguas abajo es mayor que la profundidad crítica, entonces se formará tanto perfil como agua haya por encima de la superficie del embalse. Ejemplos son el perfil en el lado de aguas arriba de un ensanchamiento abrupto en la sección transversal de un canal (figura AP1-5c) y el perfil en un canal que llega a un embalse, donde el nivel de la piscina se muestra tanto encima como debajo de la línea de profundidad crítica (figura AP1-5d).

En teoría el perfil M3 empieza desde el fondo del canal aguas arriba, con un ángulo de pendiente vertical o con un ángulo agudo, dependiendo del tipo de ecuación de flujo uniforme que se utilice, y termina con un resalto hidráulico en el extremo de aguas abajo. Por lo general este tipo de perfil ocurre cuando un flujo supercrítico entra en un canal suave. El inicio del perfil, a pesar de que no puede definirse con precisión mediante la teoría, depende de la velocidad inicial del agua entrante. A mayor velocidad, más distante aguas abajo empezará el perfil. El extremo teórico de aguas arriba del perfil intersectará el fondo del canal. En este extremo $y = 0$. Por tanto, la velocidad se volvería infinita. Por consiguiente, el extremo teórico de aguas arriba de un perfil M3 no puede existir físicamente. Ejemplos de perfil M3 son el perfil de una corriente por debajo de una compuerta deslizante (figura AP1-5e) y el perfil después de un cambio en la pendiente del fondo de empinada a más suave (figura AP1-5j).

B. Perfiles tipo S. $S_0 > S_c$ e $y_n < y_c$.

El perfil S1 empieza con un resalto en el extremo de aguas arriba y se vuelve tangente a la horizontal en el extremo de aguas abajo. Ejemplos son los perfiles de flujo por detrás de una presa en un canal empinado (figura AP1-5g) y en un canal empinado llegando al embalse con una alta elevación (figura AP1-5h).

El perfil S2 es una curva de rápida. A menudo es muy corto y semeja una transición entre una caída hidráulica y un flujo uniforme, debido a que empieza aguas arriba con una pendiente vertical en la profundidad crítica y es tangente a la línea de profundidad normal en el extremo de aguas abajo. Ejemplos son los perfiles formados en el lado aguas abajo de un ensanchamiento de sección de canal (figura AP1-5i) y en el lado empinado de un canal que cambia su pendiente de empinada a más empinada (figura AP1-5j).

El perfil S3 es también del tipo transicional, conformado entre un flujo supercrítico entrante y la línea de profundidad normal a la cual el perfil es tangente. Ejemplos son el perfil en el lado de pendiente empinada en un canal que cambia pendiente de empinada a menos empinada (figura AP1-5k) y debajo de una compuerta con una profundidad de flujo entrante menor que la profundidad normal en un canal de pendiente suave (figura AP1-5l).

C. Perfiles tipo C. $S_0 = S_c$ e $y_n = y_c$.

Estos perfiles representan las condiciones de transición entre los perfiles M y S. Suponiendo un canal rectangular ancho, la ecuación (AP1-22) muestra que los perfiles C1 y C3 son curvos y que el perfil C1 es asintótico a una línea horizontal (figuras AP1-5m y AP1-5n). El perfil C1 se trata de un perfil que conecta a un canal de pendiente crítica con un canal de pendiente suave. El perfil C3 puede conectar un flujo supercrítico con un almacenamiento en una pendiente crítica. Con la ecuación de Chézy, la ecuación (AP1-23) muestra que los dos perfiles son líneas horizontales. El perfil C2 representa el caso de flujo uniforme crítico.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

El análisis de los perfiles de flujo para pendiente crítica es más complicado, ya que para este caso, en la ecuación (AP1-29) se obtiene la expresión indeterminada $dy/dx = 0/0$ para $y \rightarrow y_n$ con $y_c = y_n$. En este caso, como ayuda se puede emplear la ecuación diferencial en la forma de la ecuación (AP1-24). Dado que los perfiles C1 y C3 se presentan con poca frecuencia en la práctica, no es necesario extenderse en su derivación. Basta con conocer estos perfiles para el caso de exponentes iguales en la ecuación (AP1-24), condición que se cumple aproximadamente en el caso de un canal rectangular ancho, como muestra la ecuación (AP1-22). En este caso, es decir para $M = N$, y a partir de la ecuación (AP1-24), con $y_c = y_n$ se obtiene el resultado $dy/dx = S_0$; con lo que todas las curvas C serían rectas horizontales.

Las relaciones de caudal cerca de la línea de flujo crítico, $y \rightarrow y_c$, al igual que en los casos de pendientes suaves y fuertes, corresponden al flujo gradualmente variado y no pueden, por tanto, ser evaluadas con la metodología del flujo gradualmente variado. En cualquiera de los dos casos con la pendiente crítica y cerca de la línea de flujo crítico, se presenta un cambio de régimen (desde flujo supercrítico hasta el caso extremo de flujo subcrítico, al final del perfil C3; o bien, desde el caso extremo de flujo supercrítico hasta el flujo subcrítico al comienzo del perfil C1). El punto de quiebre en la transición de los perfiles C1 y C3 al flujo normal, puede interpretarse como un caso límite de un salto hidráulico con una altura de salto $\Delta y \rightarrow 0$. En realidad, en aquellas secciones se originan ondas permanentes al igual que un flujo normal que fluye con fuertes ondulaciones de la superficie libre cuando la profundidad y_n es igual o algo mayor que y_c .

D. Perfiles de tipo H. $S_0 = 0$ e $y_n = \infty$.

Éstos son los casos limitantes de perfiles M cuando el fondo del canal se vuelve horizontal. Los perfiles H2 y H3 corresponden a los perfiles M2 y M3, pero un perfil H1 no puede establecerse en realidad, debido a que y_n es infinito. El perfil de la curva de abatimiento H2 puede encontrarse aguas arriba de una caída libre, mientras que el perfil H3 puede conectar un flujo supercrítico bajo una compuerta con un nivel en vaso. Ejemplos de los perfiles H se muestran en las figuras AP1-5o y AP1-5p.

E. Perfiles tipo A. $S_0 < 0$.

El perfil A1 es imposible debido a que el valor de y_n no es real. Los perfiles A2 y A3 son similares a los perfiles H2 y H3, respectivamente. En general los perfiles tipo A rara vez ocurren. Ejemplos se muestran en las figuras AP1-5q y AP1-5r.

F. Perfiles en conductos con claves que se cierran gradualmente.

Para cualquier conducto con una clave que se cierra gradualmente, el caudal normal se incrementará a medida que la profundidad del flujo se incrementa. Primero se incrementará hasta el valor de caudal de flujo lleno Q_0 a una profundidad y_0' menor que la profundidad de flujo lleno y_0 . De allí en adelante el caudal alcanzará un valor máximo $Q_{máx}$ a una profundidad y_n^* . Incrementos adicionales en la profundidad de flujo eventualmente decrecerán el caudal hasta el caudal de tubo lleno en el momento en que la superficie de flujo toque el techo del conducto. La figura AP1-6a muestra la variación del caudal normal en un conducto de este tipo. En el caso particular de un conducto circular, las profundidades son $y_0' = 0,82y_0$ e $y_n^* = 0,938y_0$, donde y_0 es el diámetro del conducto. Dentro de la región de $y = y_0'$ e $y = y_0$, existen dos posibles profundidades normales para un caudal determinado, es decir, la profundidad normal baja y_n y la profundidad normal alta o conjugada y_n' .

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Siguiendo el principio anterior, puede demostrarse que existen cuatro tipos de perfiles de flujo para una pendiente determinada. Las figuras AP1-6b, AP1-6c, y AP1-6d muestran estos perfiles para pendientes suaves y empinadas. Las posiciones de las profundidades y_n e y_n' se suponen constantes en estas figuras. Se aprecia que la profundidad crítica en la figura AP1-6d es mayor que las profundidades normales y_n' e y_n , pero su profundidad normal baja correspondiente es menor que y_n' e y_n . En consecuencia, la pendiente crítica correspondiente debería ser menor que la pendiente normal y se considera que la pendiente del canal es suave.

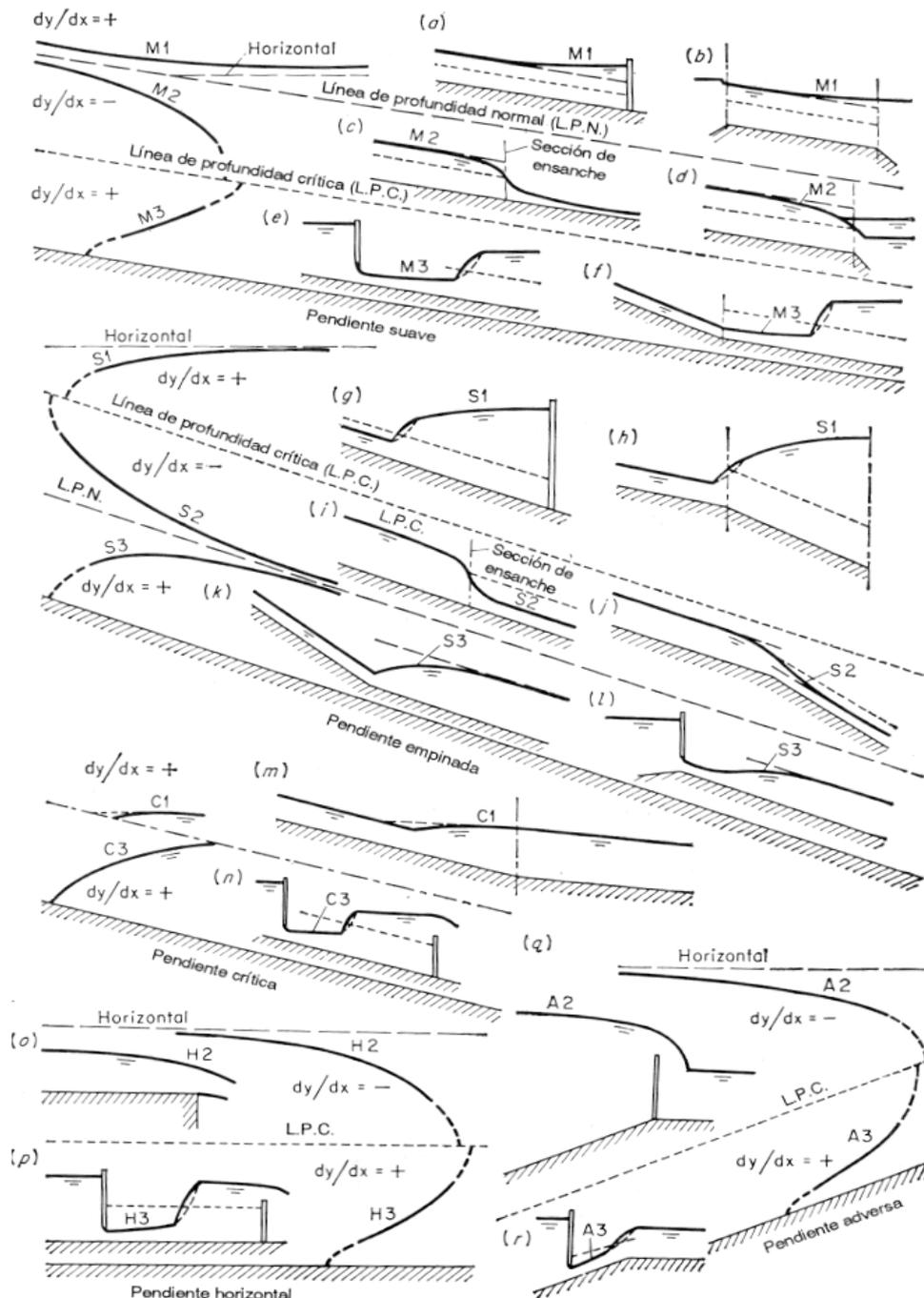


Figura AP1-5. Ejemplos de perfil de flujo.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

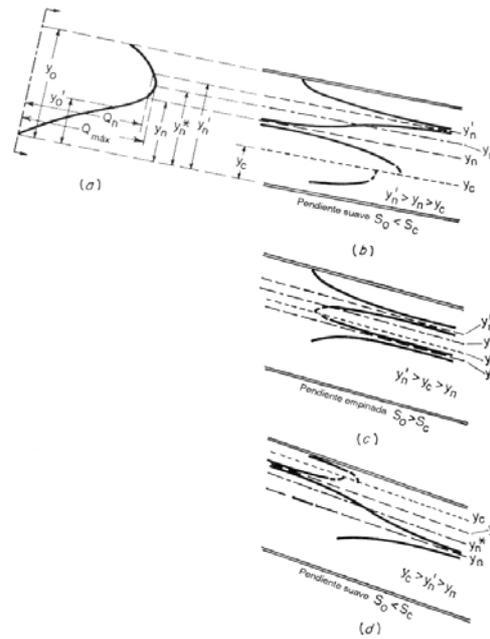


Figura AP1-6. Perfiles de flujo en un conducto cerrado.

En la tipificación de las pendientes, figura AP1-4, se debe poner atención a que esta clasificación no se refiere al valor absoluto de S_0 , sino que las pendientes se definen con la combinación de los términos de las ecuaciones (AP1-20) y (AP1-21). En otras palabras, una misma pendiente del fondo S_0 puede ser, en algunas circunstancias, una pendiente moderada y, luego, transformarse, por ejemplo, debido a un cambio de rugosidad, en una pendiente fuerte o viceversa.

En resumen, se pueden apuntar los siguientes principios respecto a los perfiles de flujo gradualmente variado:

1. El signo de dy/dx puede determinarse a partir de las ecuaciones (AP1-26) a (AP1-28).
2. Cuando el perfil de la superficie del agua se acerca al tirante normal, lo hace en forma asintótica.
3. Cuando el perfil de la superficie del agua se acerca al tirante crítico, lo atraviesa en un ángulo grande pero finito.
4. Si el flujo es subcrítico aguas arriba pero atraviesa el tirante crítico, entonces el rasgo que produce el tirante crítico determina y ubica todo el perfil de la superficie del agua. Si el flujo aguas arriba es supercrítico, como en el caso de un perfil M3, entonces el control no puede estar aguas abajo.
5. Todos los perfiles de flujo gradualmente variado ejemplifican el principio de que los flujos subcríticos están controlados desde aguas abajo y los, supercríticos desde aguas arriba. Los perfiles de flujo gradualmente variados no existirían si no hubiese controles de aguas arriba y abajo.
6. En canales con pendientes horizontales y adversas, la terminología tirante normal no tiene ningún significado dado que el tirante normal es negativo o imaginario. De todas maneras, en estos casos, el numerador de la ecuación (AP1-26) es negativo por lo que se puede deducir la forma del perfil.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

AP1.4 Análisis previo al cálculo de la superficie libre del agua.

El análisis del perfil de flujo es un procedimiento utilizado para predecir su forma. Esto permite al ingeniero conocer de antemano los posibles perfiles de flujo que pueden ocurrir en un esquema de canal determinado. Este procedimiento constituye una parte muy significativa en todos los problemas de diseño de canales para flujo gradualmente variado.

A. Canal prismática con pendiente constante. Los ejemplos mostrados en la figura AP1-5 deben ser útiles para determinar el tipo de perfil de flujo en un problema determinado.

B. Canal prismático con un cambio en la pendiente. Este canal es equivalente a un par de canales prismáticos conectados con la misma sección transversal pero con diferentes pendientes. En la figura AP1-7 se muestran veinte perfiles de flujo común en un canal prismático largo con un quiebre en la pendiente. Estos perfiles son explicativos por sí mismos. Sin embargo, deben mencionarse algunos aspectos especiales:

1. El perfil en la profundidad crítica o cerca de ella no puede predecirse con precisión mediante la teoría de flujo gradualmente variado, debido a que por lo general el flujo es rápidamente variado.

2. En teoría, al pasar la línea crítica, el perfil de flujo debería tener una pendiente vertical. Como el flujo a menudo es rápidamente variado cuando pasa la línea crítica, la pendiente real del perfil no puede predecirse con precisión. Por esta razón, la profundidad crítica no puede ocurrir exactamente encima del quiebre en el fondo del canal y puede ser diferente de la profundidad mostrada en la figura.

3. En algunos casos (figuras AP1-7g y AP1-7l), el resalto hidráulico puede ocurrir en el canal de aguas arriba o en el canal de aguas abajo, dependiendo de la relación entre ambas pendientes de fondo (también depende de la rugosidad relativa y de la forma de los dos canales que se conectan. En este análisis se supone que estos valores son constantes). En el caso g, por ejemplo, el resalto ocurrirá en el canal de aguas abajo si la profundidad normal en este canal es comparativamente pequeña. Por el contrario, si disminuye la pendiente del canal de aguas abajo (o aumenta la rugosidad), el salto hidráulico se desplaza hacia aguas arriba conforme aumentan los valores de y_n , pudiendo ubicarse finalmente, en el canal de aguas arriba. El emplazamiento exacto del salto hidráulico depende, entre otros factores, de las profundidades conjugadas.

La ubicación del salto hidráulico, para un caso como el de la figura AP1-7k, puede determinarse a partir del punto de corte entre el perfil de la superficie libre del agua (en la figura, de la curva S1) y la recta paralela al fondo del canal, que corresponde a la ubicación de la profundidad conjugada de y_n . Para el caso en que no se produzca flujo normal aguas arriba del salto hidráulico, como por ejemplo, en las figuras AP1-9a y AP1-9b, se debe calcular y dibujar la profundidad conjugada correspondiente a cada profundidad del perfil de la superficie libre del agua que se presente aguas arriba (la curva M3 en el caso a, y la curva S2 en el caso b).

4. Si el canal de aguas arriba tiene una pendiente adversa (figuras AP1-7q a AP1-7t), el caudal es fijado no por las condiciones del canal aguas arriba sino por la elevación del nivel del embalse aguas arriba, el cual es la asíntota horizontal del perfil A2. El procedimiento de análisis es suponer un caudal y determinar qué caso de q a t describe mejor el perfil. Entonces, calcular el perfil de flujo en la dirección aguas arriba y determinar el nivel del embalse. Si el nivel calculado no concuerda con el nivel

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

determinado para el embalse, entonces se repite el cálculo con otro caudal supuesto hasta que el nivel calculado concuerde con el nivel determinado.

5. Perfiles comunes (figura AP1-7) se ilustran para canales largos en los cuales puede establecerse un flujo uniforme distante hacia aguas arriba y aguas abajo.

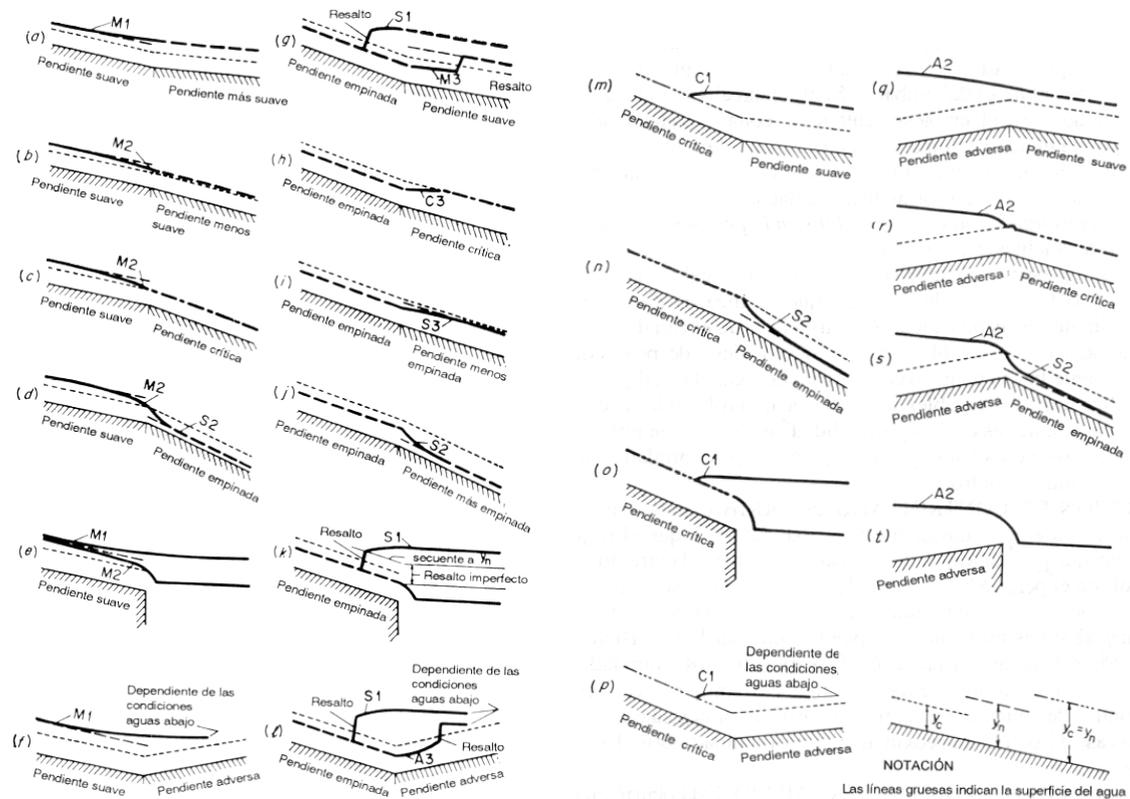


Figura AP1-7. Perfiles de flujo gradualmente variado en un canal prismático largo con un quiebre en la pendiente de fondo.

C. Canal prismático con varios cambios en la pendiente. Para tales canales el procedimiento de análisis general es el siguiente:

1. Se grafica el perfil del canal con una escala vertical exagerada.
2. Se divide al canal en tramos con características de flujo constantes o aproximadamente constantes (S_0 , n_s , forma de la sección transversal, ancho de la misma, etc.).
3. Para cada tramo del canal se determinan y se dibujan las líneas de flujo crítico y normal, mostradas mediante líneas punteadas a lo largo de todo el canal. Para esto se deben determinar las profundidades de agua y_c e y_n para un caudal dado Q , con ayuda de las ecuaciones (AP1-20) y (AP1-21). Si en lugar de Q , se conoce otra magnitud, como sería la altura de energía específica H_0 a la entrada del canal, en el problema de la descarga desde un embalse, entonces la resolución de este paso es posible únicamente en forma iterativa.
4. Se señalan la zonas de flujo con probables características de flujo repentinamente variado y las posibles secciones de control de flujo (cualquier sección en la cual la profundidad de flujo es conocida o puede ser controlada en un nivel requerido) (AK en la figura AP1-9). A estas zonas pertenecen las secciones transversales en las que se modifican S_0 , n_s , la

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

forma o el ancho de la sección transversal, o aquellas donde el caudal está controlado o perturbado mediante estructuras de control o de transición o, también, otras estructuras incorporadas al flujo. En ellas el flujo debe pasar a través de una profundidad de control que puede ser la profundidad crítica, la profundidad normal o cualquier otra profundidad conocida.

5. Empezando con la profundidad de control en cada sección de control se traza en cada tramo un perfil continuo. La posición del perfil en cada tramo puede localizarse correctamente con respecto a las líneas de profundidad normal y de profundidad crítica. Para ésto, los perfiles comunes descritos antes deberían ser útiles.
6. Cuando el flujo es supercrítico en la parte de aguas arriba de un tramo pero subcrítico en la parte de aguas abajo, el perfil de flujo tiene que pasar por la profundidad crítica en algún lugar dentro del tramo. Al cruzar la línea de profundidad crítica por lo general se crea un resalto hidráulico al subir el agua desde una profundidad baja hasta su profundidad secuente.

D. Canales no prismáticos y canales con flujo especialmente variado. En canales no prismáticos y canales con flujo especialmente variado, el análisis de flujo se vuelve complicado por el hecho de que la sección de control puede ocurrir en cualquier sección de canal y su posición no puede determinarse con facilidad. Se consideran tres pendientes de canal diferentes para tres tipos de flujo:

1. Flujo continuo en un canal prismático (figura AP1-8a).
2. Flujo especialmente variado con caudal que aumenta en un canal prismático (figura AP1-8b).
3. Flujo continuo en un canal no prismático con una pendiente constante pero con sección transversal variable (figura AP1-8b).

Todos los canales tienen una caída libre.

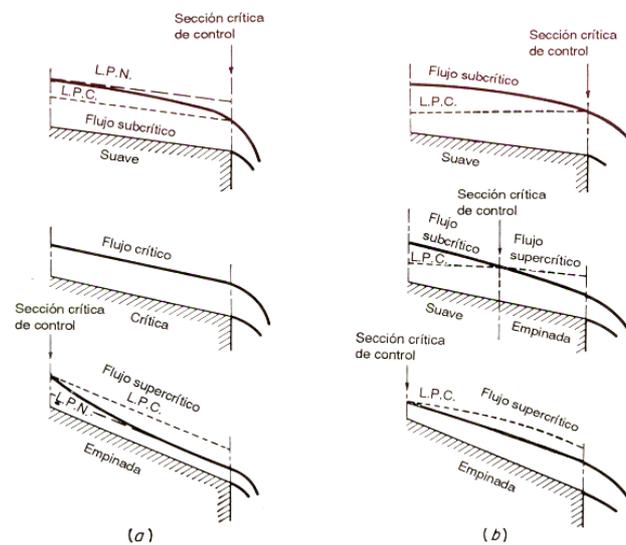


Figura AP1-8. Localización de la sección crítica de control. (a) Flujo en un canal prismático, (b) flujo en un canal no prismático o flujo espacialmente variado.

El primer tipo de flujo, cambia de subcrítico a supercrítico a medida que la pendiente del canal varía de suave a empinada. Por tanto, la sección crítica de control debe transferirse del extremo de aguas abajo al extremo de aguas arriba. Se aprecia que la transferencia de la sección crítica de control ocurre casi instantáneamente. En el instante de la transición (en este momento la profundidad normal coincide con la profundidad

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

crítica, convirtiéndose en una profundidad transicional), el flujo crítico ocurre a través de toda la longitud del canal (esquema intermedio de la figura AP1-8a), y cualquier sección en el tramo es una sección crítica.

En el segundo y en el tercer tipo de flujo la transición de estado de flujo ocurre gradualmente de sección a sección, a medida que la sección crítica de control se mueve hacia aguas arriba. En cualquier momento durante la transición (esquema intermedio de la figura AP1-8b), el flujo hacia aguas abajo de la sección de control es supercrítico, y el flujo hacia aguas arriba es subcrítico.

Dentro de las formas de control de flujo se pueden distinguir tres:

- a) Estructuras de control. La profundidad de agua para un caudal dado Q (o viceversa), puede ser "controlada", es decir, puede ser determinada en forma precisa mediante la construcción de una compuerta, de un vertedor, de un umbral de fondo o de una contracción debido a un canal Venturi o a una pila.
- b) Sección de control aguas abajo. Las características del flujo para condiciones subcríticas están controladas fundamentalmente desde aguas abajo, sin importar que se trate de un canal con pendiente moderada (perfiles M1, M2) o de un canal con pendiente fuerte (perfil S1) ya que se alcanzan estas condiciones de flujo en el extremo de aguas abajo de cualquier tramo empinado largo, debido a que el flujo se aproximará a la profundidad normal en el extremo de aguas abajo. La condición de control puede presentarse como un nivel dado de la superficie libre del agua a la salida del canal o en forma de una caída libre en el extremo inferior de un canal de pendiente moderada, donde se establece la profundidad crítica sobre el escalón, según el principio del mínimo esfuerzo (en realidad la profundidad crítica calculada se encuentra algo antes del borde).
- c) Sección de control aguas arriba. Ocurre en cualquier tramo empinado en el extremo de aguas arriba, debido a que el flujo en un canal empinado tiene que pasar a través de la sección crítica en el extremo de aguas arriba y luego seguir en el perfil S2 o en el S3. Por tanto, la profundidad crítica es la profundidad de control. Básicamente, el flujo supercrítico es controlado desde aguas arriba, sin que importe que se trate de un perfil M3, o de un perfil S2 o S3. Como un perfil M3 se puede producir únicamente por medio de una estructura de control, como sería una compuerta, puede originarse, por ejemplo, en el caso de un canal con pendiente fuerte que se inicia en un embalse. En esta sección de control también se establece la profundidad crítica por el principio del mínimo esfuerzo. Si la superficie del agua del lado aguas abajo es muy alta, ésta puede aumentar la superficie de flujo en la sección de control aguas arriba. Cuando varios tramos empinados ocurren en sucesión, la sección de control se localiza en el extremo de aguas arriba del tramo inicial. El control de aguas arriba también ocurre en tramos suaves y largos, debido a que las curvas M1 o M2 se aproximan a la profundidad normal en el extremo de aguas arriba.

En la figura AP1-9 se presentan ejemplos con varias secciones de control de flujo. En especial, son instructivos los ejemplos de las figuras AP1-9a y AP1-9b, según Henderson (1966). Cada uno de ellos tiene dos posibles secciones de control: compuerta y escalón (caída libre) con pendiente suave, en el caso a; compuerta y sección de ingreso con pendiente fuerte, en el caso b. Para las condiciones presentadas en la figura,

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

respecto a la apertura de la compuerta y a la longitud de los canales, se produce control en las secciones dibujadas. No obstante, se entiende, que en el caso AP1-9a, por ejemplo, una apertura de la compuerta puede conducir finalmente a un salto hidráulico sumergido y un cierre mayor de la misma (para un canal de aguas abajo no muy largo) conducirá a un desplazamiento hacia aguas abajo del salto hidráulico, hasta que, al final, el flujo hasta el borde del escalón resultará supercrítico. En este último caso, el escalón no representa ya una sección de control del flujo; la corriente sería controlada por la compuerta, inclusive, hasta esa sección (control en la caída libre, en las figuras AP1-9a y AP1-9c, significa que $y = y_c$ en la orilla del escalón). Sin embargo, debido a la curvatura de las líneas de corriente en la zona del flujo repentinamente variado la profundidad crítica y_c se produce, en realidad, a una cierta distancia hacia aguas arriba del escalón. Para el cálculo de la curva M1, se puede suponer, que y_c se presenta en el borde del escalón sin que esto afecte el grado de precisión del cálculo.

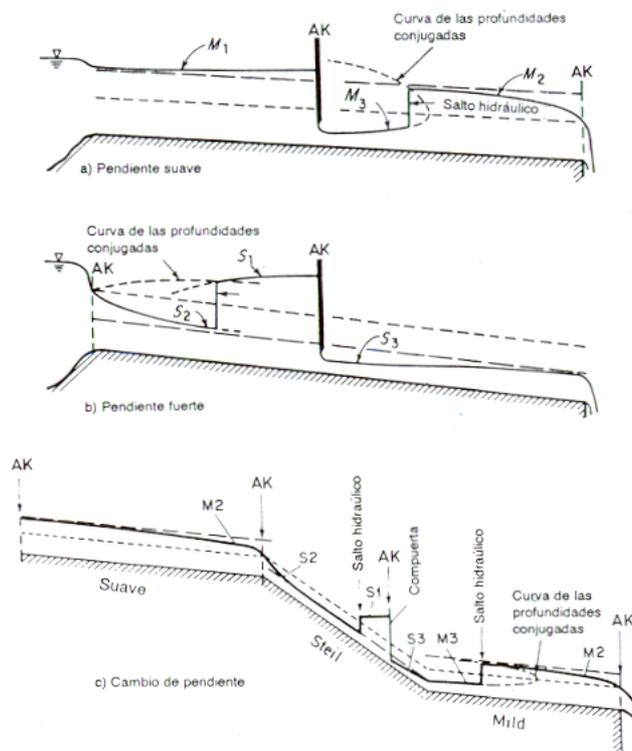


Figura AP1-9. Ejemplos de perfiles de superficie libre del agua con varias secciones de control, según Henderson.

APÉNDICE 2. INFORMACIÓN ADICIONAL SOBRE RESALTOS.

AP2.1 Saltos Hidráulicos en Canales con Pendiente

Los saltos hidráulicos pueden ocurrir en canales con una pendiente en la que las fuerzas gravitacionales actuantes sobre el flujo deben considerarse. Aunque la ecuación (IV-6) es teóricamente aplicable a tales problemas, en la práctica el número de soluciones disponibles es limitado. Las principales dificultades para obtener una solución útil para este problema son:

- 1) El término $W \sin \theta$ se suele cuantificar de una manera deficiente porque la longitud y la forma del salto no están bien definidos.
- 2) El peso específico del fluido en el volumen de control puede cambiar mucho, como consecuencia de la entrada de aire.
- 3) Los términos de presión pueden cuantificarse adecuadamente.

Según Rajaratnam (1967), los más antiguos experimentos que Bidone realizó para el salto hidráulico, se llevaron a cabo en lo que ahora se denomina un canal con pendiente. Bazin en 1865 y Bcebe y Riegel en 1917 también se ocuparon de este problema. En 1934, Yarnell inició un amplio estudio del salto hidráulico en canales con pendiente, que no pudo terminar porque falleció en 1937. Kindsvater (1944), fue el primer investigador que desarrolló una solución racional del problema, utilizando los datos no publicados de Yarnell; Bradley y Peterka (1957a) y Argyropoulos (1962) también han realizado vastos estudios.

En el análisis de las ecuaciones y de las relaciones para los saltos hidráulicos en canales con pendiente, es conveniente considerar varios casos (Figura AP2-1). Se puede notar que, para efectos del análisis que sigue *el final del salto está por definición al final de la superficie de la onda*. Esta definición difiere de la utilizada anteriormente. Así, en lo que concierne a los casos definidos en la figura AP2-1, sea y_1 el calado en el extremo del canal, L_r la longitud del salto medido horizontalmente, y_1 el calado supercrítico del flujo sobre la pendiente, que se asume sea constante, y_2 el tirante conjugado subcrítico correspondiente a y_1 , e y_2^* el tirante subcrítico dado por la ecuación (IV-17) (ver Fig. AP2-2). Si el salto se inicia en el fin de la sección de pendiente, entonces $y_2^* = y_1$ ocurriendo un salto tipo A, el cual está gobernado por la ecuación (IV-17). Si el final del salto coincide con la intersección de la pendiente y el lecho horizontal, ocurrirá un salto tipo C. Si y_1 es menor que el tirante requerido para un salto de tipo C pero mayor que y_2^* la base del salto estará sobre la pendiente y el final sobre el fondo horizontal. Esta situación se denomina salto de tipo B. Si y_1 es mayor que el requerido para un salto tipo C, entonces ocurrirá un salto tipo D completamente sobre la sección de la pendiente. El salto tipo E ocurre sobre el fondo en pendiente que aún se mantiene, y el salto F (que es de una clase poco frecuente) ocurre únicamente en cuencos que se encuentran, a menudo, abajo de estructuras. De los seis tipos de saltos definidos en la figura AP2-1, los tipos de la A a la D son los más comunes.

Para el salto tipo C, Kindsvater (1944) desarrolló la siguiente ecuación para el calado conjugado:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2 \cos \theta} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2 \left(\frac{\cos^3 \theta}{1 - 2N \tan \theta} \right)} - 1 \right] \quad (\text{AP2-1})$$

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

donde N es factor empírico relacionado con la longitud del salto y θ es el ángulo de la pendiente longitudinal del canal. Si se definen los siguientes parámetros

$$\Gamma_1^2 = \frac{\cos^3 \theta}{1 - 2N \tan \theta} \tag{AP2-2}$$

y

$$G_1^2 = \Gamma_1^2 F_1^2 \tag{AP2-3}$$

La ecuación (AP2-1) puede expresarse como

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8G_1^2} - 1 \right) \tag{AP2-4}$$

donde $y_1' = y_1 / \cos \theta$. Bradley y Peterka (1957a) y Peterka (1963) dedujeron que N es, fundamentalmente, una función de θ , además, Rajaratnam (1967) estableció la siguiente interrelación

$$\Gamma_1 = 10^{0.027\theta} \tag{AP2-5}$$

donde θ está en grados. En adición al salto tipo C, Bradley y Peterka (1957a) y Peterka (1963) también encontraron que las ecuaciones (AP2-3) a la (AP2-5) pueden aplicarse al salto tipo D.

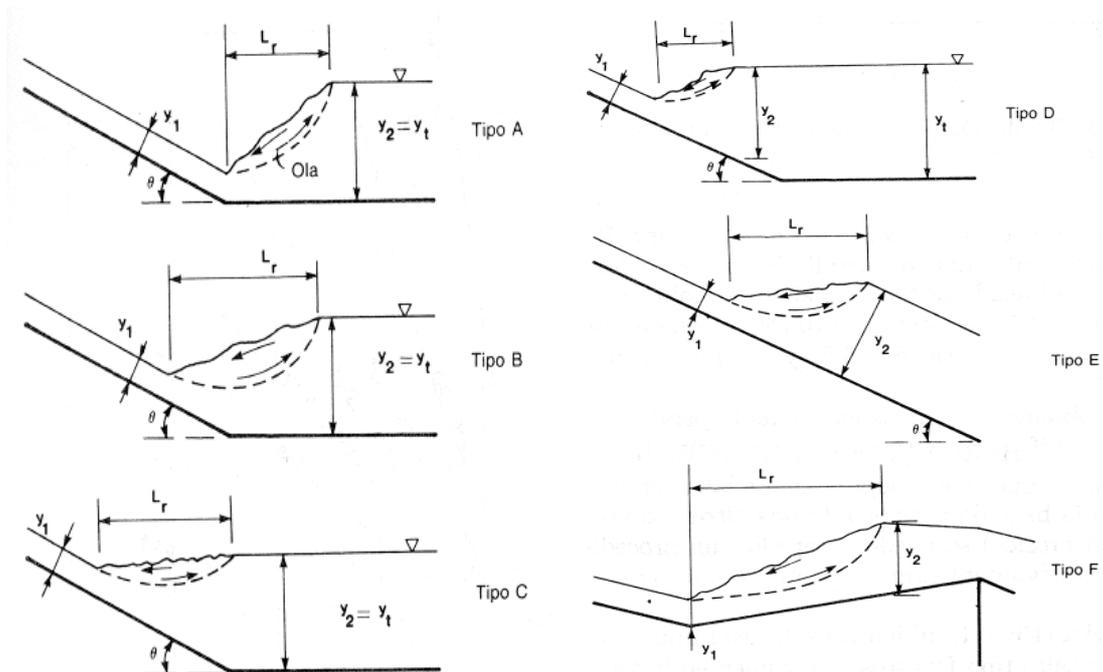


Figura AP2-1. Definición de tipos de saltos hidráulicos que ocurren en canales inclinados.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

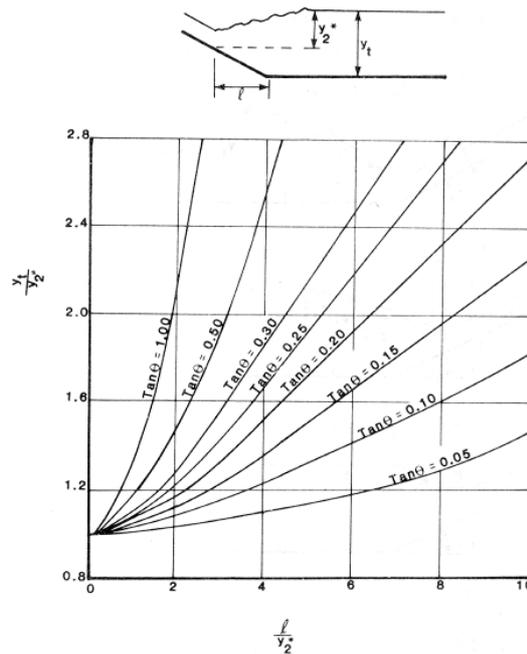


Figura AP2-2. Solución para saltos tipo B (Peterka, 1963, y Rajaratnam, 1967).

Aunque no se ha establecido una solución analítica para el salto tipo B, Bradley y Peterka (1957a) y Peterka (1963) han desarrollado una solución gráfica para este tipo de salto, que está basada en experimentos de laboratorio. Estos datos se resumen en la figura AP2-2. En ésta, los datos originales se han complementado con dos curvas adicionales: $\tan\theta = 0.50$ y 1.0 . (Rajaratnam, 1967).

El paso inicial en la solución de problemas de resaltos en canales con pendiente, es clasificar el salto en función de la pendiente, el calado inicial del flujo supercrítico, y la condición del canal. Si se supone que el calado del flujo supercrítico es constante sobre el fondo de la pendiente (suposición que se asemeja mucho a las condiciones que existen al pie de presas o diques altos y aguas abajo de esclusas que actúan bajo una gran presión) se puede desarrollar un procedimiento de clasificación de saltos, relativamente simple, como se muestra en la figura AP2-3.

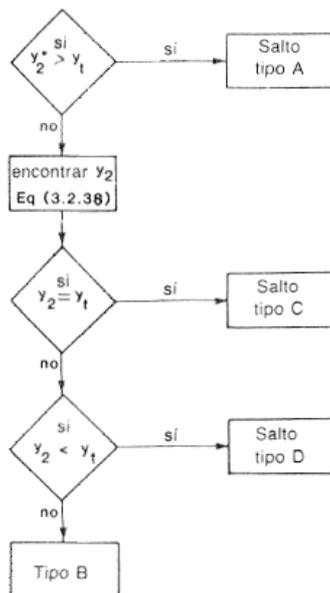


Figura AP2-3. Determinación del tipo de salto hidráulico en canales inclinados

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Bradley y Peterka (1957a) y Peterka (1963) también presentaron una serie de resultados acerca de la longitud del salto tipo D; éstos se resumen en la figura AP2-4. Esta gráfica puede también utilizarse para estimar las longitudes de los saltos tipo B y C.

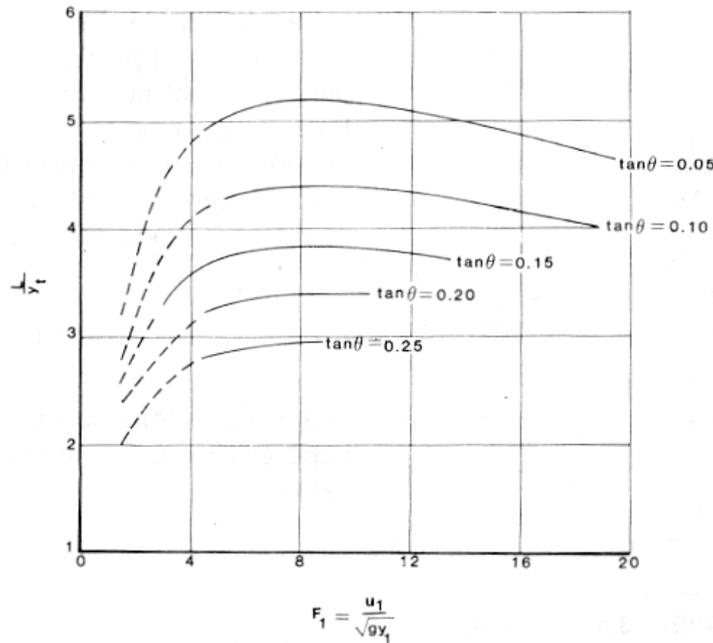


Figura AP2-4. Longitud del salto hidráulico en canales inclinados para tipos de salto B, C, y D. (Peterka, 1963).

La pérdida de energía para el salto tipo A puede estimarse a partir de las ecuaciones derivadas para un canal horizontal (ecuación IV-35 para canal de sección rectangular). Para saltos tipo C y D se puede derivar una expresión analítica. En la figura AP2-1, si el nivel del fondo al término del salto se toma como el plano de referencia, entonces la energía aguas arriba es

$$E_1 = L_r \tan \theta + \frac{y_1}{\cos \theta} + \frac{u_1^2}{2g} \tag{AP2-6}$$

donde L_r es la longitud del salto y u_1 es la velocidad media supercrítica aguas arriba. La energía al final del salto es

$$E_2 = y_2 + \frac{u_2^2}{2g} \tag{AP2-7}$$

Donde u_2 es la velocidad subcrítica en la sección aguas abajo. Entonces la pérdida de energía relativa esta dada por

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{[1 - (y_2/y_1)] + F_1^2/2 \{1 - [1/(y_2/y_1)]^2\} + (L_r y_1 / y_1 y_1) \tan \theta}{1 + (F_1^2/2) + (L_r y_1 / y_1 y_1) \tan \theta} \tag{AP2-8}$$

donde se supone que $y_1 \approx y_1/\cos \theta$. En general, la ecuación (AP2-8) no podrá utilizarse en situaciones donde F_1 es menor que 4, ya que en esos valores la información acerca de la relación L_r/y_2 es escasa; además, en esos valores $\Delta E/E_1$ es sensible a esta relación.

El cálculo de la pérdida de energía para el salto tipo B es mucho más complejo.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Estos cálculos indican que las pérdidas de energía en este salto son cuantiosas por tanto, estos resultados deberán utilizarse con precaución cuando estén sujetos a una serie de suposiciones.

El análisis del salto designado como de tipo E (Figura AP2-1) comienza con la ecuación (IV-6). Para un canal rectangular, se supone que (primero) $P_f = 0$, (segundo) $\beta_1 = \beta_2 = 1$, (tercero) $\Sigma f'_f = 0$, y (cuarto) el peso del agua entre las secciones 1 y 2 está dado por

$$W = \frac{A_1 + A_2}{2} \frac{L_r}{\cos \theta} \gamma k'$$

donde el valor de $L_r/\cos \theta$ puede aproximarse por

$$\frac{L_r}{\cos \theta} = L' = X(y_2 - y_1) \tag{AP2-9}$$

en la cual X es un factor de pendiente y k' un factor de corrección que resulta de la suposición de que el perfil del salto es lineal. La ecuación (IV-6) se puede entonces resolver para encontrar

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8M^2} - 1) \tag{AP2-10}$$

donde

$$M = \frac{F_1}{\sqrt{1 - [k' L' \operatorname{sen} \theta / (y_2 - y_1)]}}$$

Kennison (1944), Chow (1959) y Argyropoulos (1962) han obtenido, de manera independiente, la ecuación (AP2-10). Sin embargo, para simplificar el valor de k' puede suponerse que ésta es unitario; la variación de M con respecto a X no puede ser ignorada, excepto para pequeños valores de θ (Rajaratnam, 1967). Kennison (1944) sugirió que X puede tomar un valor de 3. Argyropoulos (1962) y Chow (1959) notaron que X era una función de F_1 , pero ninguno de estos investigadores sugiere un valor apropiado.

Como se ha dicho anteriormente, el salto tipo F es muy raro, además, hay pocos datos disponibles para este tipo de salto. Rajaratnam (1967) notó que, en la práctica, es casi imposible que se presente este salto completamente sobre la pendiente adversa. Si este tipo de salto se emplea en un diseño, sus características podrán determinarse a partir de los modelos de ensayo.

AP2.2 Localización del resalto.

El resalto hidráulico ocurre en un flujo supercrítico cuando su profundidad cambia abruptamente a su profundidad secuente. En teoría, el resalto ocurrirá en un canal horizontal rectangular si las profundidades inicial y secuente y el número de Froude de aproximación satisfacen la ecuación (IV-17). Esta condición teórica por lo general se utiliza para localizar la posición de un resalto. Para un cálculo más exacto de la posición

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

del resalto, sin embargo, debe considerarse la longitud del mismo. A continuación se ilustrará la localización de un resalto hidráulico en tres casos comunes (figura AP2-5):

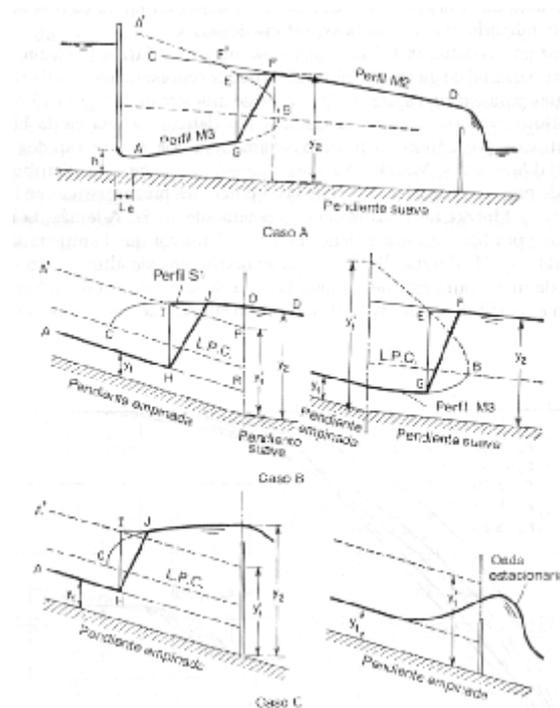


Figura AP2-5. Localización de un resalto hidráulico.

El caso A muestra el resalto por debajo de una compuerta deslizante en un canal de pendiente suave. Los perfiles AB y CD pueden identificarse con facilidad como del tipo M3 y M2, respectivamente. La curva A'B' es una gráfica de la profundidad secante con respecto a AB. Mediante la posición de F', puede estimarse la longitud del resalto. Mediante prueba y error puede encontrarse una intersección horizontal entre las curvas AB y CD igual a la longitud del resalto. Por ejemplo, la distancia horizontal EF es igual a dicha longitud, correspondiente a la profundidad y_2 en F. Es claro que el resalto se formará entre G y F, debido a que la profundidad en F es secante a la profundidad en G y a que la distancia EF mide la longitud del resalto. Nótese que si la longitud del resalto no se hubiera considerado en el análisis, se consideraría que el resalto se forma en el punto F' aguas arriba, dando como resultado un error representado por F'F. En el caso A, puede verse que al incrementar la profundidad del agua hacia aguas abajo o al subir la curva CD, el resalto puede moverse hacia aguas arriba. La profundidad de aguas abajo puede subirse hasta una altura para la cual el resalto eventualmente se ahogue al frente de la compuerta deslizante. Al bajar la profundidad de aguas abajo o al disminuir CD el resalto se moverá hacia aguas abajo.

El análisis anterior se aplica también a la localización de un resalto formado a la salida de un vertedero de cresta delgada o de uno de rebose.

Cuando existe un resalto hidráulico por debajo de una compuerta deslizante, el flujo que sale de la compuerta formará un chorro que posee una vena contracta. La distancia L_e desde la vena contracta hasta la apertura de la compuerta deslizante a menudo es corta. Con respecto a esta distancia, existe una regla general adoptada, la cual establece que la vena contracta se localiza aproximadamente a una distancia h desde la apertura de la compuerta deslizante (esta regla la utilizó por primera vez Agroskin. Se basa en la

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

suposición de que el flujo en una compuerta deslizante corresponde a la mitad de flujo de un orificio circular, y que la vena contracta en el flujo desde un orificio circular se localiza aproximadamente a una distancia igual a la mitad del diámetro del orificio medida desde el orificio. Esta regla la originó Weisbach).

El caso B muestra el resalto en un canal que tiene un quiebre en su pendiente de fondo que cambia de fuerte a suave. Por simplicidad, se supone que el flujo es uniforme a lo largo del canal con excepción del tramo entre el resalto y el quiebre. El resalto puede ocurrir en el canal empinado o en el suave, según si la profundidad aguas abajo y_2 es menor o mayor que la profundidad y_1' seciente a la profundidad de aguas arriba y_1 . Si la profundidad y_2 es mayor que y_1' , el resalto ocurrirá en la región empinada. Luego la superficie curva OC es del tipo S1. La línea A'P indica la profundidad seciente a la línea AR. Ahora, se determina una intersección horizontal IJ entre A'P y CO, el cual es igual a la longitud del resalto. Es claro que un resalto HJ empezará en la sección que contiene a I. Si la profundidad y_2 se reduce aproximadamente a un valor algo menor que y_1' , el resalto empezará a moverse dentro del canal suave. En este caso el resalto se localiza como se describió en el caso A.

El caso C muestra el resalto por detrás de una barrera de rebose. En teoría, se formará un resalto si la profundidad en la barrera es mayor que la profundidad seciente y_1' correspondiente a la profundidad supercrítica de aproximación y_1 . La localización del resalto es igual a la del caso B si éste ocurre en la región empinada. Al aumentar la altura de la barrera el resalto se moverá hacia aguas arriba. Al disminuirla se moverá hacia aguas abajo. Cuando la profundidad de la barrera es menor que la seciente y_1' , la barrera será sobrepasada por una onda estacionaria en la forma de un ascenso superficial ondular solitario, a la que no seguirán ondulaciones adicionales.

AP2.3 El resalto como disipador de energía.

Desde un punto de vista práctico, el resalto hidráulico es un medio útil para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico. Su mérito está en prevenir la posible erosión aguas abajo de aliviaderos, rápidas y compuertas deslizantes, debido a que reduce rápidamente la velocidad del flujo sobre un piso protegido hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo.

El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación o cuenco de aquietamiento, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación. En la práctica, el cuenco disipador rara vez se diseña para confinar toda la longitud de un resalto hidráulico libre sobre la zona revestida, debido a que sería muy costoso. En consecuencia, a menudo se instalan accesorios para controlar el resalto dentro del cuenco. El principal propósito de este control es acortar el rango dentro del cual el resalto ocurrirá y por consiguiente reducir el tamaño y el costo del cuenco disipador. El control tiene ventajas adicionales, debido a que mejora la función de disipación del cuenco, estabiliza la acción del resalto y, en algunos casos, incrementa el factor de seguridad. En el diseño de un cuenco disipador con un resalto hidráulico como mecanismo disipador de energía, deben considerarse los siguientes aspectos prácticos (Por simplicidad, la longitud del resalto no se considerará en el estudio):

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

A. Posición del resalto. Existen tres modelos alternativos (figura AP2-6) que permiten que un resalto se forme aguas abajo de una fuente (tal fuente puede ser un vertedero de rebose, una rápida o una compuerta deslizante):

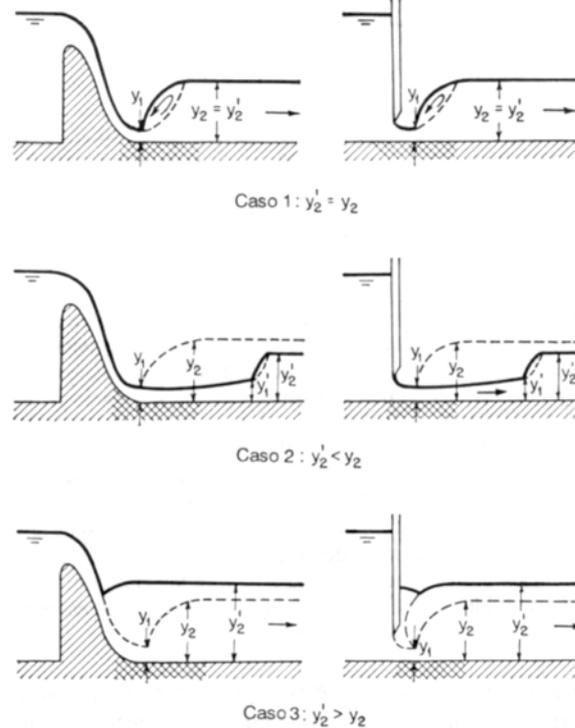


Figura AP2-6. Efecto de la profundidad de salida en la formación de un resalto hidráulico aguas abajo de un vertedero o por debajo de una compuerta deslizante.

El caso 1 representa el modelo para el cual la profundidad de aguas abajo y_2' es igual a la profundidad y_2 secante a y_1 . En este caso los valores de F_1 , y_1 e y_2' ($=y_2$) satisfarán la ecuación (IV-17) y el resalto ocurrirá sobre un piso sólido inmediatamente adelante de la profundidad y_1 . Para propósitos de protección contra la socavación, éste es un caso ideal. Una objeción importante a este modelo, sin embargo, es que una pequeña diferencia entre los valores reales y supuestos de los coeficientes hidráulicos relevantes puede causar que el resalto se mueva hacia aguas abajo desde su posición estimada. En consecuencia, siempre es necesario algún dispositivo para controlar su posición.

El caso 2 representa el patrón para el cual la profundidad de salida y_2' es menor que y_2 . Esto significa que la profundidad de salida del caso 1 se reduce. Como resultado, el resalto se desplazará hacia aguas abajo hasta un punto donde se satisfaga nuevamente la ecuación (IV-17). En lo posible, este caso debe evitarse en el diseño, debido a que el resalto rechazado fuera de la zona resistente a la socavación ocurrirá en un lecho de cantos rodados sueltos o, peor aun, en un canal completamente desprotegido, dando como resultado una erosión severa. La solución para el diseño es utilizar cierto control en el fondo del canal, el cual incrementará la profundidad de agua a la salida y asegurará un resalto dentro de la zona protegida.

El caso 3 representa un modelo en el cual la profundidad de salida y_2' es mayor que y_2 . Esto significa que la profundidad de salida con respecto al caso 1 se incrementa. Como resultado, el resalto se verá forzado hacia aguas arriba, y finalmente puede ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Éste tal vez es el caso más seguro para el diseño, debido a que la posición del resalto sumergido puede fijarse con rapidez.

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

Desafortunadamente el diseño no es eficiente, debido a que se disipará muy poca energía.

- B. Condiciones a la salida. En la descripción anterior se supone que la profundidad de salida tiene una cierta posición fija, para la cual su profundidad y_2' es igual a la profundidad seciente y_2 o diferente de ella. Sin embargo, en la mayor parte de los problemas prácticos, la profundidad de agua a la salida fluctúa, debido a cambios en el caudal de flujo en el canal. En tales casos, a menudo se dispone de una curva de calibración de la profundidad de salida que muestra la relación entre el nivel de salida y_2' y el caudal Q . De la misma manera, puede construirse una curva de calibración del resalto para mostrar la relación entre la profundidad seciente y_2 y el caudal Q . Debido a la diferencia en la posición relativa de las dos curvas de calibración, Leliavsky sugirió que el diseño puede considerarse según cinco diferentes clases de condiciones (mostradas respectivamente por los cinco casos de la figura AP2-7).

La clase 1 representa una condición ideal para la cual las dos curvas de calibración siempre coinciden. Esto significa que existe el caso 1 de la figura AP2-6 y que siempre se formará un resalto en el lugar deseado sobre una zona protegida para todos los caudales. Condiciones de esta clase rara vez se encuentran en la naturaleza.

La clase 2 representa las condiciones para las cuales la curva de calibración del resalto siempre se encuentra en un nivel mayor que la curva de calibración de profundidad de salida. Esto significa que siempre existe caso 2 en la figura AP2-6 (es decir, la profundidad de salida es menor que la seciente) y que el resalto se formará en un lugar alejado hacia aguas abajo. Un método efectivo para asegurar que el resalto ocurra en la zona protegida es utilizar bloques para crear un cuenco disipador.

La clase 3 representa las condiciones para las cuales la curva de calibración del resalto se encuentra siempre a un nivel menor que la de calibración de profundidad de salida. Esto significa que siempre ocurre el caso 3 de la figura AP2-6 (es decir la profundidad de salida es mayor que la seciente) y que el resalto se moverá hacia aguas arriba y tal vez se ahogará en la fuente. En consecuencia, se disipará muy poca energía. Un método efectivo para asegurar un resalto es construir una zona de aproximación por encima del nivel del lecho del canal. La pendiente de la aproximación puede ser tal que las condiciones apropiadas para un resalto se desarrollen allí para todos los caudales. Otro método es proveer una caída en el fondo del canal para bajar la profundidad de salida.

La clase 4 representa las condiciones para las cuales la curva de calibración del resalto se encuentra a un nivel mayor que la de calibración de profundidad de salida para caudales bajos pero a un nivel menor para caudales altos. Un método efectivo para asegurar un resalto es proveer un cuenco disipador para formarlo a bajos caudales y combinar el cuenco con una aproximación inclinada para desarrollarlo a satisfacción para todos los caudales.

La clase 5 representa las condiciones para las cuales la curva de calibración del resalto se encuentra a un nivel más bajo que la de calibración de profundidad de salida para caudales bajos pero a un nivel más alto para caudales altos. Un método efectivo para asegurar el resalto es incrementar la profundidad de aguas abajo lo suficientemente

mediante la construcción de una piscina de quietamiento formándolo así para caudales altos.

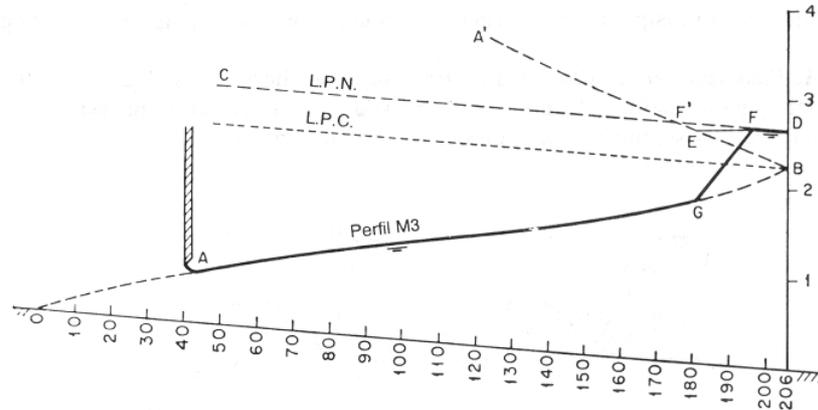


Figura AP2-7. Clasificación de las condiciones de profundidad de salida para el diseño de obras de protección contra la socavación.

C. Tipos de resalto. Al considerar los diferentes tipos de resalto hidráulico descritos anteriormente (recogidos en la figura IV-7), el *U. S. Bureau of Reclamation* da las siguientes recomendaciones prácticas:

1. Todos los tipos de resalto se encuentran en el diseño de cuencos disipadores.
2. El resalto débil no requiere bloques o consideraciones especiales. Lo único que se necesita es dar la longitud apropiada al cuenco, la cual es relativamente corta. Esta puede determinarse mediante la figura IV-15.
3. El resalto oscilante, encontrado a menudo en el diseño de estructuras de canales, presas de derivación y obras de descarga es difícil de manejar. En lo posible, deben evitarse los resaltos con número de Froude dentro del rango 2.5 a 4.5. En muchos casos no puede evitarse el uso de este resalto pero, en otros casos, alterando las dimensiones puede llevarse al rango deseable. Los bloques deflectores o accesorios tienen muy poco valor. Las ondas son la principal fuente de dificultad; por consiguiente pueden utilizarse supresores de onda diseñados para manejarlas.
4. No se encuentra una dificultad particular para el resalto estacionario. Arreglos de deflectores y de bloques, son muy útiles como medios para acortar la longitud del cuenco disipador.
5. A medida que el número de Froude aumenta, el resalto se vuelve más sensible a la profundidad de salida. Para números de Froude hasta valores de 8, se recomienda una profundidad de salida mayor que la seciente para asegurar que el resalto permanecerá en la zona protegida.
6. Cuando el número de Froude es mayor que 10, un cuenco disipador de resalto puede no ser lo más económico. En este caso, la diferencia entre las profundidades inicial y seciente es alta y, por lo general, se requiere un cuenco muy profundo con muros de retención muy altos. El costo del cuenco disipador no compensa los resultados obtenidos. Un disipador del tipo trampolín de lanzamiento dará resultados similares a menor costo. (Se trata de una cubeta que apunta hacia arriba colocada en la pata de un vertedero para deflectar el flujo hacia arriba de la profundidad de salida. Si la profundidad de salida es lo suficientemente alta para sumergir la cubeta, se formará un remolino aguas abajo de la cubeta, el cual tenderá a mover materiales del lecho hacia la presa,

Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos

previniendo de esta manera socavación seria en su pata. Por otra parte, si la profundidad de salida es baja, el flujo se lanzará hacia arriba y hacia fuera de tal forma que golpeará un canal de roca sólida, si existe, a una distancia segura aguas abajo de la presa).

BIBLIOGRAFÍA:

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

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.

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

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

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

RANGA RAJU, K.G. (1988). “Flow Through Open Channels”. Ed. Tata McGraw-Hill.

RICHARD H. FRENCH (1988). “Hidráulica de canales abiertos”. Ed. McGraw Hill.

SONTEK (2001). “ADVField. Technical Documentation”.

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

WILLI H. HAGER (1992). “Energy dissipators and hydraulic jump”. Water Science and Technology Library. Ed. Kluwer academic publishers.

Información disponible en la red:

TONITO WAHL (2001). “Manual de WinADV”.
www.usbr.gov/wrrl/twahl/winadv.

SONTEK (2001). “Manuales de ADVField”.
<http://www.sontek.com>.