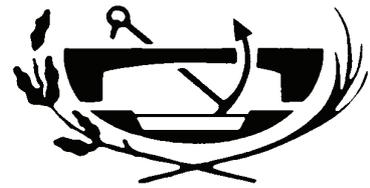




**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE CARTAGENA**

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE
INGENIERÍA TÉCNICA CIVIL**



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

Proyecto Fin de Carrera

**CARACTERIZACIÓN DE RESALTOS HIDRÁULICOS
LIBRES A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDADES
INSTANTÁNEAS CON EQUIPO DOPPLER.
FLUJO AGUAS ABAJO DE UN ALIVIADERO.**

SEBASTIÁN GARCÍA RIVAS

Dirigido por:

D. LUIS G. CASTILLO ELSITDIÉ

Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P.

Cartagena, junio de 2008

A mis padres, hermanos y a mi familia por su continuo apoyo.

A mi novia por estos tres años inolvidables.

A mis amigos para los cuales no he tenido el tiempo suficiente.

A Juan por ser un excelente compañero de trabajo.

Por último a Dr. Luis G. Castillo por su paciencia, disponibilidad y su labor educativa.

INTRODUCCIÓN	3
1. OBJETIVOS	7
2. RESUMEN	8
3. TRABAJO EXPERIMENTAL Y FILTRADO DE DATOS.	28
3.1. Trabajo de laboratorio.	28
3.2 Filtrado de datos.	34
4. LIMITACIONES DEL EQUIPO	40
4.1. Sonda.	40
4.2. Canal.	40
5. BASES TEÓRICAS.	41
5.1. Estructura de control. Aliviadero WES	41
5.2. Flujo sobre el vertedero.....	42
5.3. Resalto hidráulico.	43
5.4. Tipos de resaltos hidráulicos.....	44
6. ANÁLISIS TEÓRICO EXPERIMENTAL	47
6.1. Introducción.....	47
6.2. Consideraciones de los efectos de escala.	47
6.3. Flujo desarrollado y no desarrollado. Capa Límite.	49
6.4. Relación entre calados inicial y final.	51
6.5. Características de la longitud del resalto.	57
6.6. Caída máxima de velocidad	61
6.7. Perfiles superficiales.	63
6.8. Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos.....	64
6.8.1. Efectos de escala.....	79
6.9. Longitud del resalto hidráulico	85
6.10. Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos	87
7. CONCLUSIONES	95
ANEXO I. PERFILES DE VELOCIDAD PARA CADA RESALTO ANALIZADO	97
ANEXO II. RESULTADOS DEL FILTRADO A PARTIR DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO	107
ANEXO III. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESALTOS HIDRÁULICOS	125
BIBLIOGRAFÍA	135

INTRODUCCIÓN

A. Definición del trabajo

En este proyecto fin de carrera se realiza el estudio del comportamiento del flujo en un canal rectangular en el que se han formado diferentes resaltos hidráulicos aguas abajo de un aliviadero. Este fenómeno hidráulico se desarrolla en flujo permanente rápidamente variado; así el flujo no cambia con respecto al tiempo, pero espacialmente el cambio se produce de forma abrupta en distancias relativamente cortas.

B. Descripción del canal de laboratorio y de los elementos para la adquisición de datos con ADV

El trabajo experimental desarrollado en este proyecto fin de carrera consistió en la medida de velocidades instantáneas mediante un equipo Doppler en distintos tipos de resaltos producidos en un canal de laboratorio; así como la medida de otros parámetros característicos de los resaltos, como la longitud de resalto y las profundidades inicial y final utilizando un limnómetro. Posteriormente se comparan los resultados experimentales con trabajos ya afianzados. A continuación se muestra una descripción del canal y de los elementos para la adquisición de datos con ADV.

▪ Descripción de los elementos del canal

La fotografía 1 muestra los principales elementos que componen el canal sobre el que realizamos el estudio:

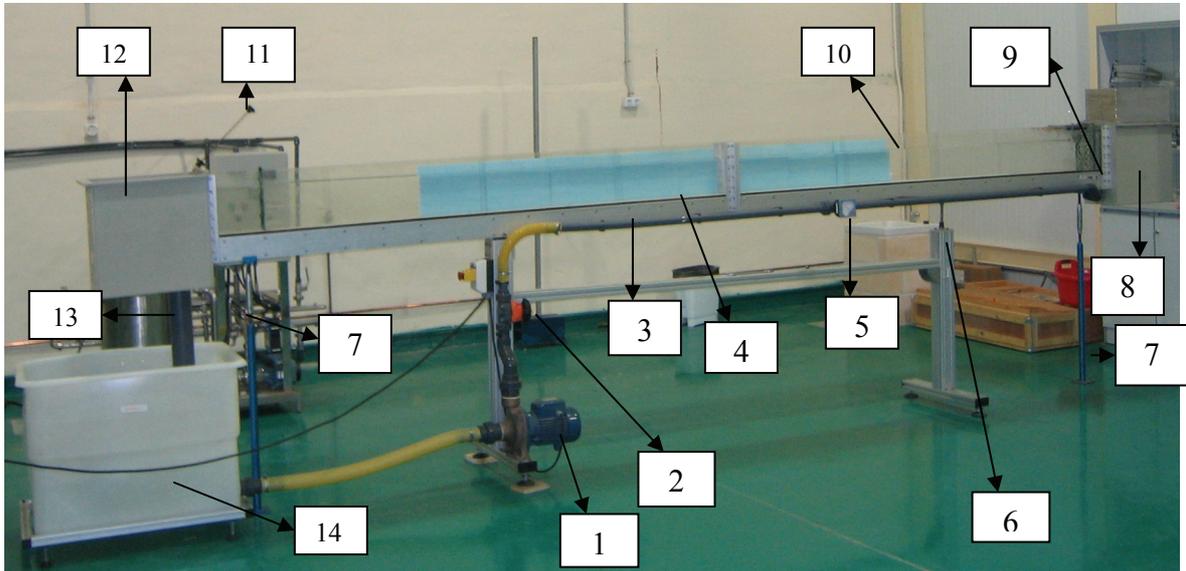


Figura 1. Elementos del canal de laboratorio (Márquez, 2006)

De manera que:

1. Bomba de alimentación
2. Válvula de membrana reguladora del caudal
3. Tubería de impulsión
4. Solera del canal
5. Caudalímetro
6. Soporte con regulación de altura
7. Soportes niveladores de la pendiente del canal
8. Depósito tranquilizador suplementado
9. Tranquilizadores de flujo
10. Sección del canal de 81 x 250 x 5000 mm de longitud
11. Regulador del calado del agua en el canal
12. Depósito regulador del calado del agua
13. Tubería de retorno
14. Depósito de almacenamiento

▪ Descripción de los elementos para la adquisición de datos con ADV

Las figuras 2.a y 2.b muestran los distintos elementos necesarios para realizar mediciones de velocidad con ADV:

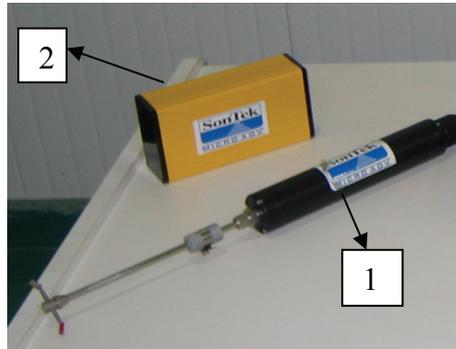


Figura 2.a. Sonda ADV y receptor (Márquez, 2006)

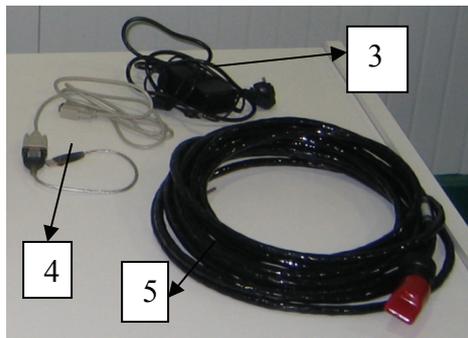


Figura 2.b. Cable de comunicaciones (Márquez, 2006)

Son los siguientes:

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

La figura 3 muestra los principales elementos de la sonda:

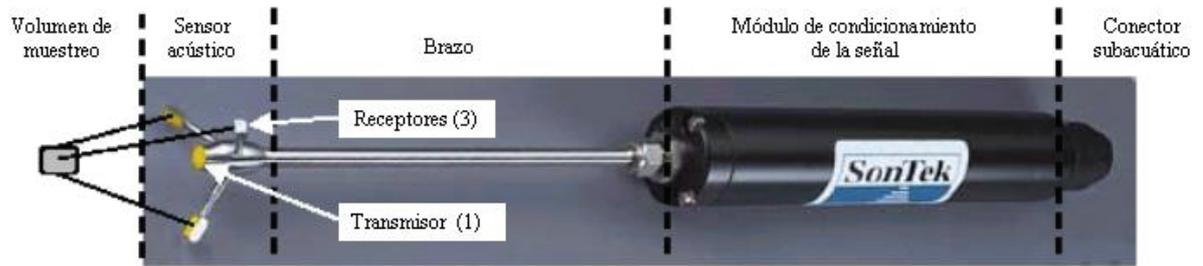


Figura 3. Elementos principales de la sonda (Márquez, 2006)

1. OBJETIVOS.

Los principales objetivos de este proyecto fin de carrera son:

-Un primer objetivo es el aprendizaje y correcto uso de una de las nuevas técnicas e instrumentación asociada para la medición de las velocidades instantáneas en un flujo en lámina libre.

-Un segundo objetivo es la adquisición de datos por medio del equipo Doppler, y la comprobación y contrastación teórico-experimental de las distribuciones de velocidad; así como un filtrado numérico de los datos.

-Un tercer objetivo es la ampliación de medidas existentes y un estudio paramétrico de la distribución de velocidades instantáneas y medias, y la disipación de energía, en función del número de Froude, en distintas posiciones del resalto hidráulico libre aguas abajo de un aliviadero.

2. RESUMEN

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

-Una parte experimental y de tratamiento de datos para el estudio paramétrico de los resaltos hidráulicos.

-Una parte de análisis donde se exponen las formulaciones de los temas que trata el proyecto fin de carrera y donde se contrastan los datos obtenidos con trabajos experimentales ya afianzados.

En este proyecto se han realizado medidas de flujo en lámina libre, principalmente de velocidades instantáneas dentro del seno de algunos resaltos hidráulicos libres aguas abajo de un aliviadero. A continuación se hace una comparación y contrastación de los resultados obtenidos en la práctica con trabajos experimentales ya afianzados. Una vez hecho el análisis crítico, se proponen nuevas leyes y se extraen las conclusiones más importantes.

Los puntos principales que se han tratado en la realización de este proyecto son los siguientes:

▪ **Configuración de la sonda**

Para el correcto funcionamiento de la sonda es necesario introducir unos parámetros de entrada. Los más importantes son el rango de velocidad, cuyo valor establecido es de ± 100 cm/seg, y la frecuencia de muestreo que fue de 5 Hz. Otro parámetro fundamental es la salinidad, cuyo valor estimado fue de 2 ppt.

▪ **Rango de caudales de trabajo**

Se realizó un aforo volumétrico para determinar el caudal real que circula por el canal para cada caudal indicado en el caudalímetro del propio canal. Los caudales de trabajo son:

Q caudalímetro	Q Real
m³/h	m³/h
4	5,36
5	6,42
6	7,47
8	9,57
10	11,68
12,25	14,04

- **Estructura de control.**

Para este trabajo se han estudiado resaltos hidráulicos al pie y desplazados aguas abajo de un aliviadero como el de la figura siguiente.



Figura 2.1. Estructura de control

▪ **Tipos de resaltos estudiados**

Para cada caudal se han obtenido tres tipos de resaltos distintos, los cuales se han ido desplazando aguas abajo de la estructura de control. Son los siguientes:

- (a) Un resalto hidráulico libre estabilizado al pie de la aliviadero (R.L.A 0)

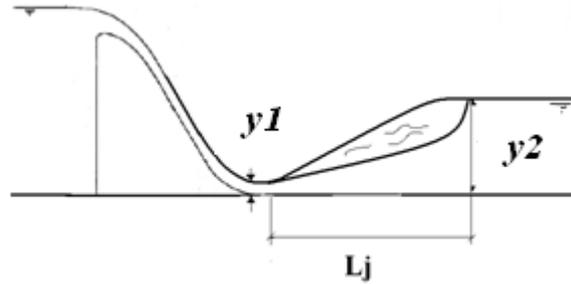


Figura 2.2. Resalto estabilizado al pie del aliviadero.

- (b) Un resalto hidráulico libre estabilizado a catorce centímetros del aliviadero (R.L.A 14).

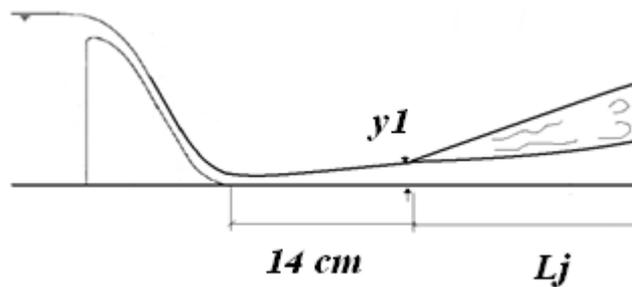


Figura 2.3. Resalto estabilizado a 14 cm

- (c) Por ultimo un resalto estabilizado a 28 cm (R.L.A 28).

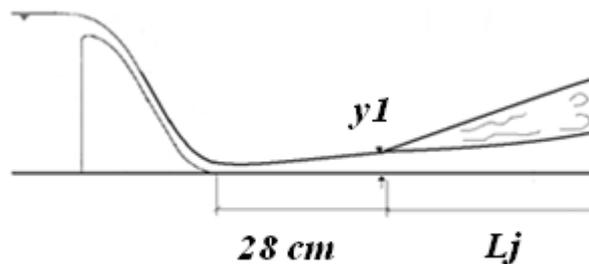


Figura 2.4. Resalto estabilizado a 28 cm

- **Criterio establecido para obtener la longitud de resalto**

Es importante aclarar que la longitud de resalto para el caso de los resaltos libres fue establecida como la distancia entre el inicio (tomando como éste la última sección en flujo supercrítico) y un punto aguas abajo entre el punto donde no cambia la pendiente y otro donde se pierden todas las burbujas. Entre estos dos últimos puntos fijamos la longitud de resalto como la sección donde mayor cantidad de burbujas se pierden.

- **Secciones estudiadas para cada resalto**

La mayoría de las secciones estudiadas se localizan dentro de la longitud de resalto considerada. Las cinco secciones analizadas son las siguientes:

- (a) Sección 1; localizada a $1/4L_j$ (un cuarto de la longitud de resalto considerada).
- (b) Sección 2; localizada a $1/2L_j$.
- (c) Sección 3; localizada a $3/4L_j$.

(d) Sección 4; localizada a una distancia igual a la longitud del resalto.

(e) Sección 5; localizada a una distancia intermedia entre el final de la longitud de resalto estimada y la mitad del canal (punto hasta el cual el canal es completamente horizontal).

▪ **Filtrado de datos.**

Debido que la interposición de las burbujas en el camino de las ondas sónicas emitidas por el equipo ADV dan lugar a mediciones erróneas con valor en el extremo negativo, es necesario un previo filtrado de los datos para su análisis.

Para desechar estas mediciones erróneas se ha procedido a un filtrado de las series de datos en el que se descartan las mediciones en los percentiles 5% y 95% (Castillo, 2008). Para ello el filtro establece una amplitud centrada en la media igual a dos veces la diferencia entre el valor máximo de la serie y la media.

Diferencia entre el valor máximo de la serie y la media: $A1 = X_{max} - X_{med}$

Amplitud de la serie: $A = X_{max} - X_{min}$

Valor máximo después del primer filtrado: $X_{max,c} = X_{max} - (A * 0.05)$

Valor mínimo después del primer filtrado $X_{min,c} = X_{min} + (A * 0,05)$

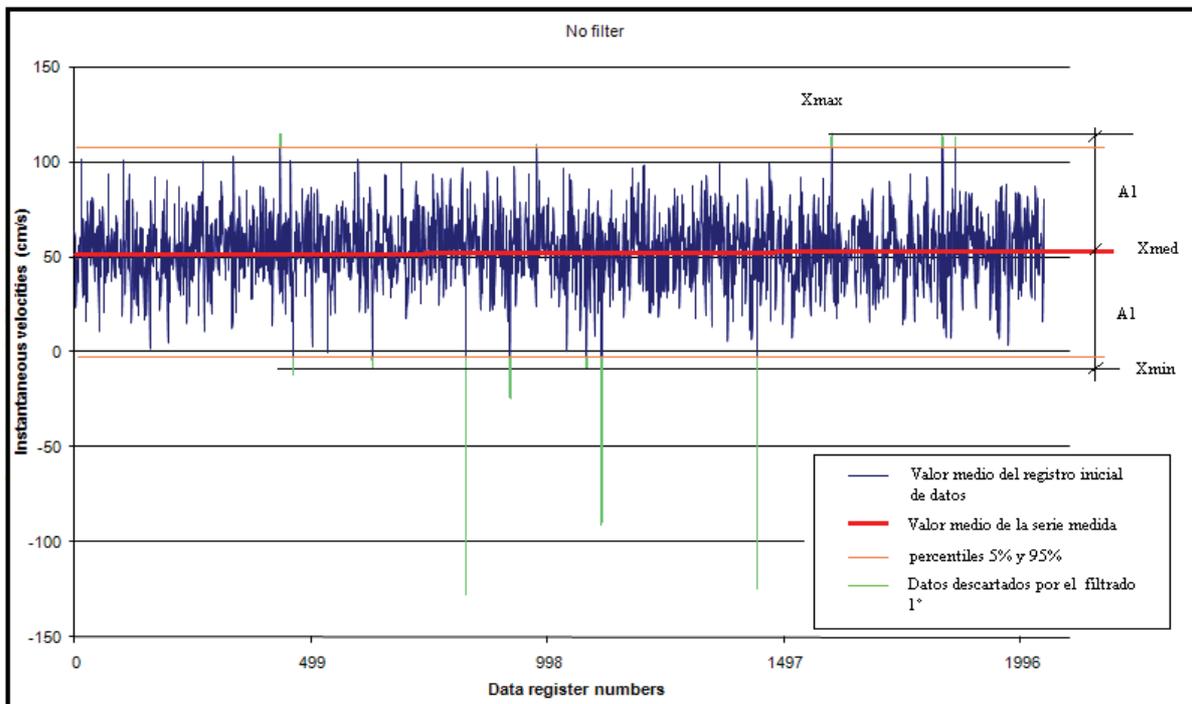


Figura 2.5. Esquema de funcionamiento del filtro

			1° Filtrado		2° Filtrado		3° Filtrado		4° Filtrado
N° de muestra	ux	Límite superior	Límite inferior						
1	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38
2	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62
2022	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35
2023	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00
2024	67,43	67,43	79,84	79,84	83,95	83,95	87,09	87,09	89,96
Xmedia=	111,75		112,23		112,40		112,58		112,77
Xmax=	147,21		143,66		140,52		137,71		
A1=	35,46		31,43		28,12		25,13		
Xmin=	76,29		80,81		84,28		87,25		
A=	70,92		62,86		56,24		50,26		
A*0,05=	3,55		3,14		2,81		2,51		
Xmax c=	143,66		140,52		137,71		135,20		
Xmin c=	79,84		83,95		87,09		89,96		

Figura 2.6. Modelos de tratamiento de datos.

- **Efectos de escala.**

Los efectos de escala son un fenómeno que se manifiesta por la presencia de una adicional pérdida de energía, para similares condiciones de flujo. Esta se debe al pequeño ancho del canal del laboratorio, en el cual las fuerzas viscosas son todavía importantes.

Chanson (2005) muestra en su trabajo “Air bubble entrainment in hydraulic jumps. Similitude and scale effects”, la presencia de efectos de escala al realizar experiencias

en semejantes condiciones de flujo en dos canales de anchos 0.50 m y 0.25 m, cuando el parámetro de Reynolds $[Re = \frac{Rh \cdot V_1}{\mu}]$ se encuentra por debajo de 21000.

Detectada la presencia de efectos de escala se procede a una clasificación de los rangos de datos bajo estos efectos. Para ello se utilizó el criterio de Chanson aunque para nuestras mediciones se encuentra una mejor concordancia con Reynolds iguales 18000.

En la figura 2.7 se muestran las mediciones clasificadas en función del número de Reynolds mayor igual a 18000. Estos ensayos están exentos de efectos de escala, en tanto que, los ensayos con $Re \leq 18000$, incluyen dichos efectos de escala.

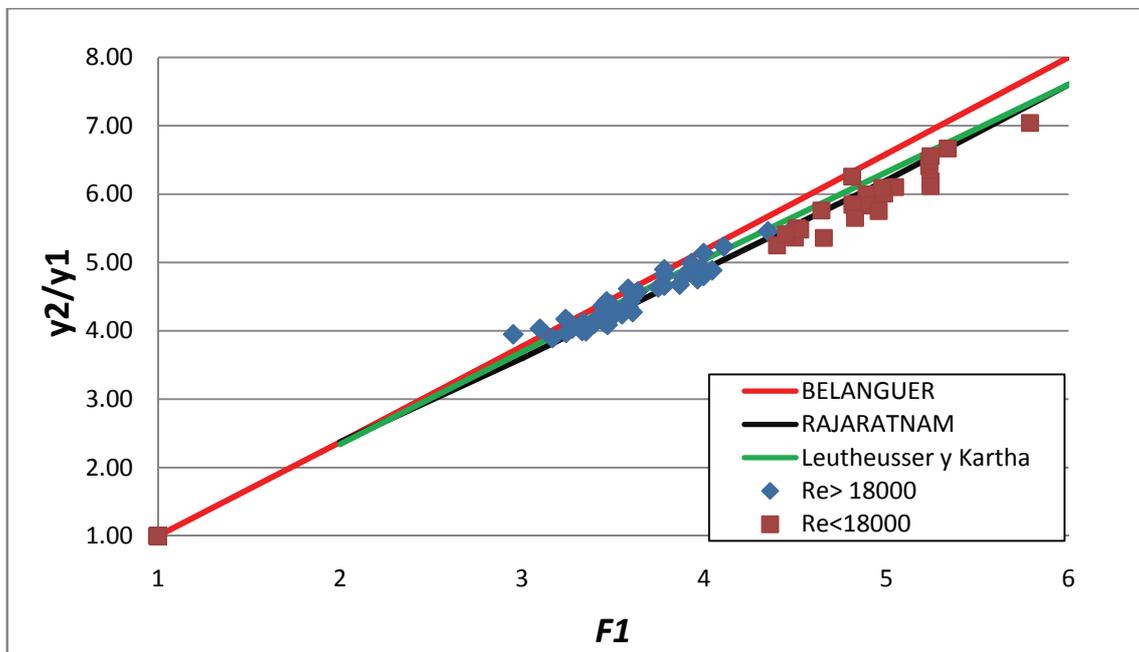


Figura 2.7. Relación de calados conjugados en función de F_1 , clasificados con $Re \geq 1800$.

A continuación se presenta un resumen de las propiedades fundamentales de los resaltos libres analizadas en este estudio, comprobándose y proponiéndose nuevas formulaciones para ambos casos.

▪ **Características de la longitud del resalto**

En la figura 2.8 se muestran nuestros resultados experimentales en los resaltos libres establecidos. Para contrastar estos resultados con otros ya afianzados se han incluido los resultados experimentales obtenidos por Ohtsu et al. (1990), representando las cantidades L_{rj}/y_2 , L_j/y_2 , L_t/y_2 medidas en función de F_1 para un Caso “a” (referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo potencial) y un Caso “b” (referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo totalmente desarrollado). También se ha incluido la ley teórica según el Bureau of Reclamation para resaltos libres.

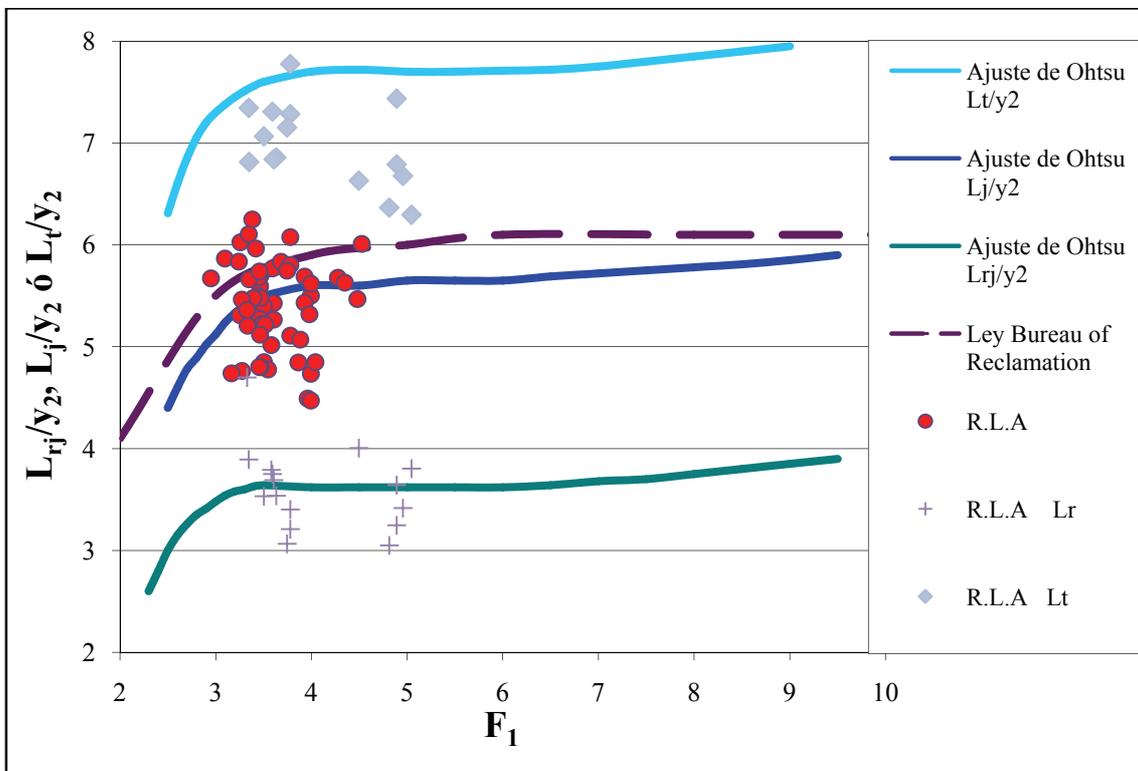


Figura 2.8. Características de la longitud de resalto.

Se puede observar que las longitudes de resalto medido en nuestro laboratorio se encuentran en el ámbito de las leyes propuestas por Ohtsu et al. (1990). Esto está totalmente de acuerdo con el criterio establecido para medir nuestra longitud de resalto hidráulico que se encuentra entre la longitud de rulo del resalto L_{rj} y la longitud del resalto L_j , definida por otros autores.

En la figura 2.9 se presenta la relación $L_j / y_1 = f(F_1)$ junto con la ecuación propuesta por Silvester (1964):

$$L_j / y_1 = 9,75(F_1 - 1)^{1,01}$$

La curva de ajuste par datos experimentales de Márquez, 2006:

$$L_{jc} / y_1 = 9,8(F_1 - 1)^{0,80}$$

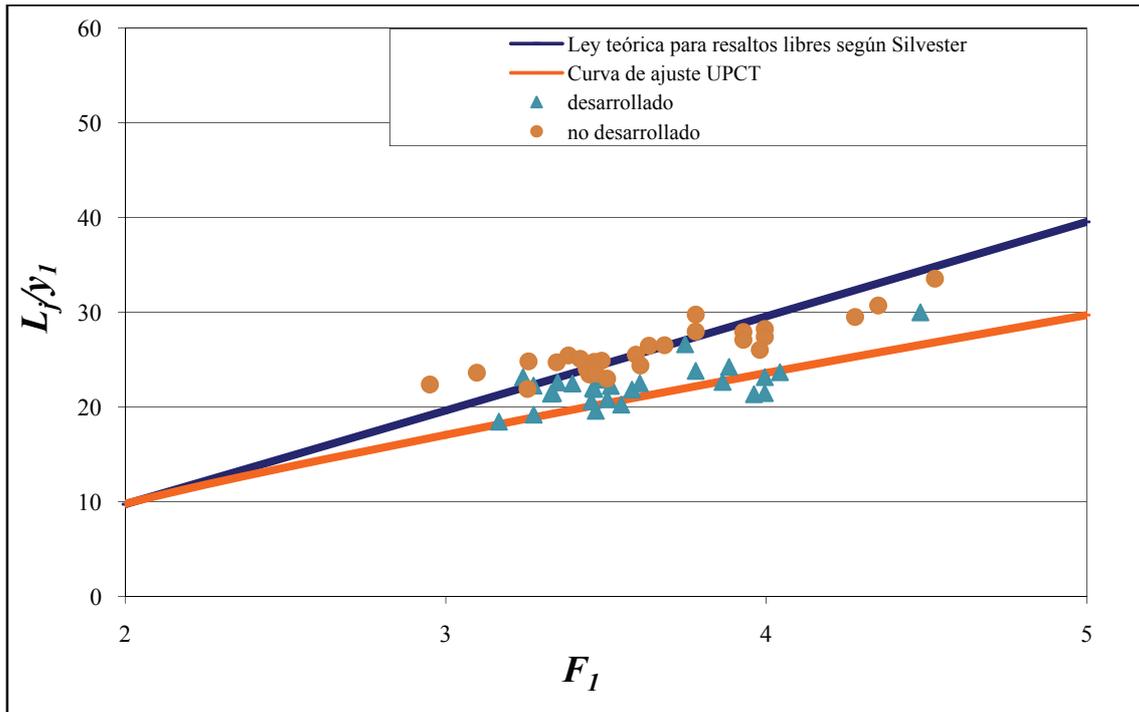


Figura 2.9. Características de la longitud del resalto hidráulico.

Como se puede apreciar nuestros datos experimentales para flujo no desarrollado son más tendentes a la propuesta de Silvester, (1964); sin embargo, nuestros datos con flujo totalmente desarrollado tienden a Márquez (2006). Esto puede deberse a que sus mediciones tienen todavía importantes efectos de escala.

- **Relación entre calados inicial y final.**

A continuación se representa en la figura 2.10 la ecuación de los calados conjugados de Bélanger:

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

También se ha representado la ley teórica propuesta por Rajaratnam (1965), que demostró con diversos experimentos, que el valor experimental de y_2/y_1 para un F_1 dado eran algo más pequeños que el valor de y_2/y_1 establecido por la ecuación de Bélanger. Rajaratnam explica que se debe a los efectos de la tensión de corte del fondo integrada S_f . Por tanto, la ecuación que propuso fue la siguiente:

$$(y_2 / y_1)^3 - [2F_1^2 + 1 - S_f](y_2 / y_1) + 2F_1^2 = 0$$

Además se incluye la ley experimental de Leutheusser y Kartha (1972).

Como se puede apreciar en las figuras 2.10 y 2.11, los resultados para flujo parcialmente desarrollado tienen una tendencia más próxima a la ecuación de Bélanger, debido a una menor pérdida de energía. Por el contrario, para flujo desarrollado parece que se ratifica la ley teórico-experimental de Rajaratnam.

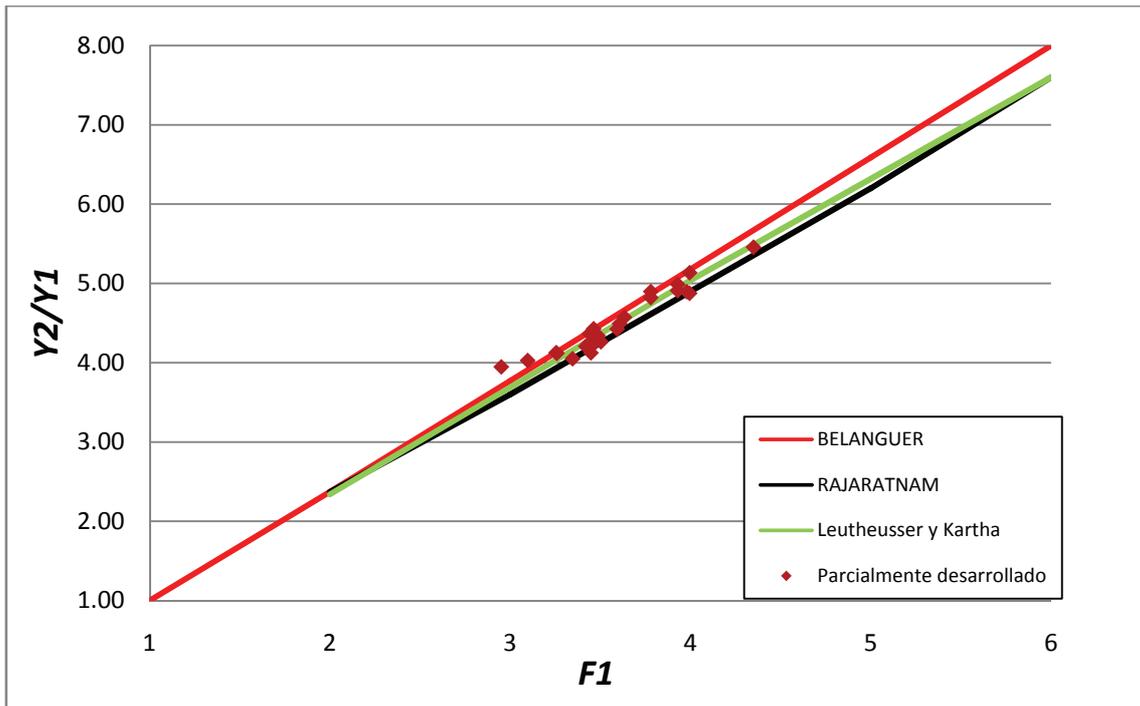


Figura 2.10. Relación de calados para flujo parcialmente desarrollado.

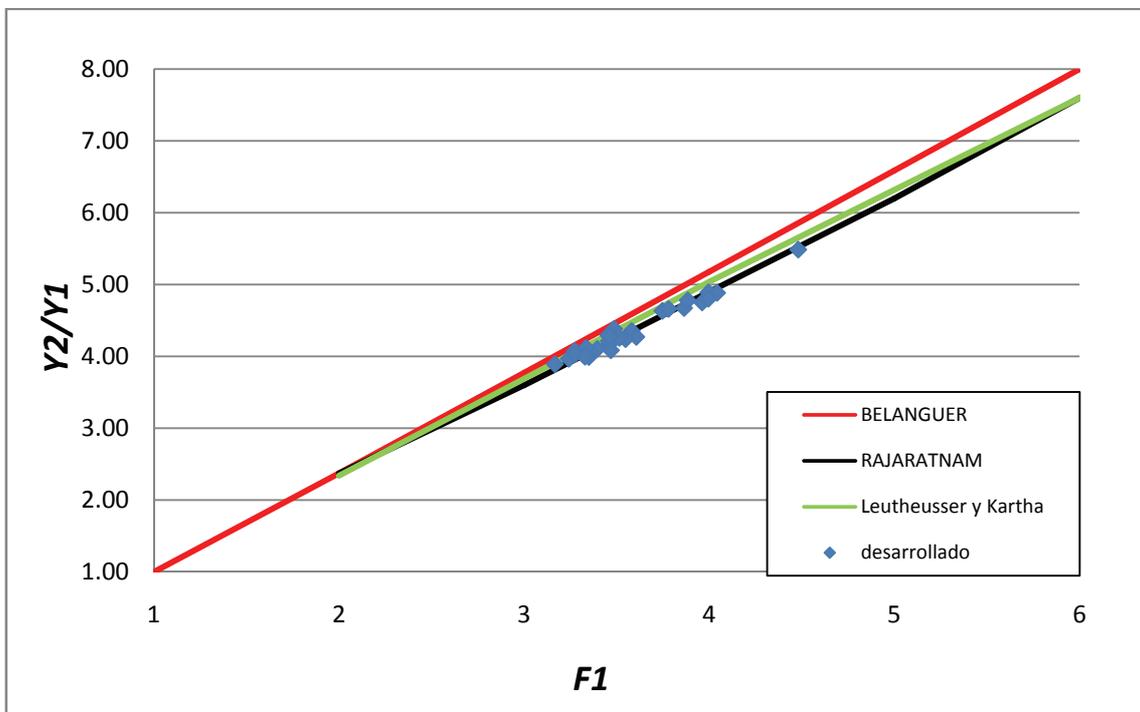


Figura 2.11. Relación de calados para flujo totalmente desarrollado.

- **Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos**

La pérdida de energía H_L entre el inicio y el final del resalto libre puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$H_L = H_1 - H_2 = (v_1^2 / 2g + y_1) - (v_2^2 / 2g + y_2)$$

Utilizando la ecuación anterior junto con la ecuación de continuidad, la pérdida de energía relativa puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{H_L}{H_1} = \frac{2(1 - \frac{y_2}{y_1}) + (1 - \frac{1}{(y_2/y_1)^2})F_1^2}{2 + F_1^2}$$

La relación $H_L / H_1 = f(F_1)$ se muestra en la figura 2.12:

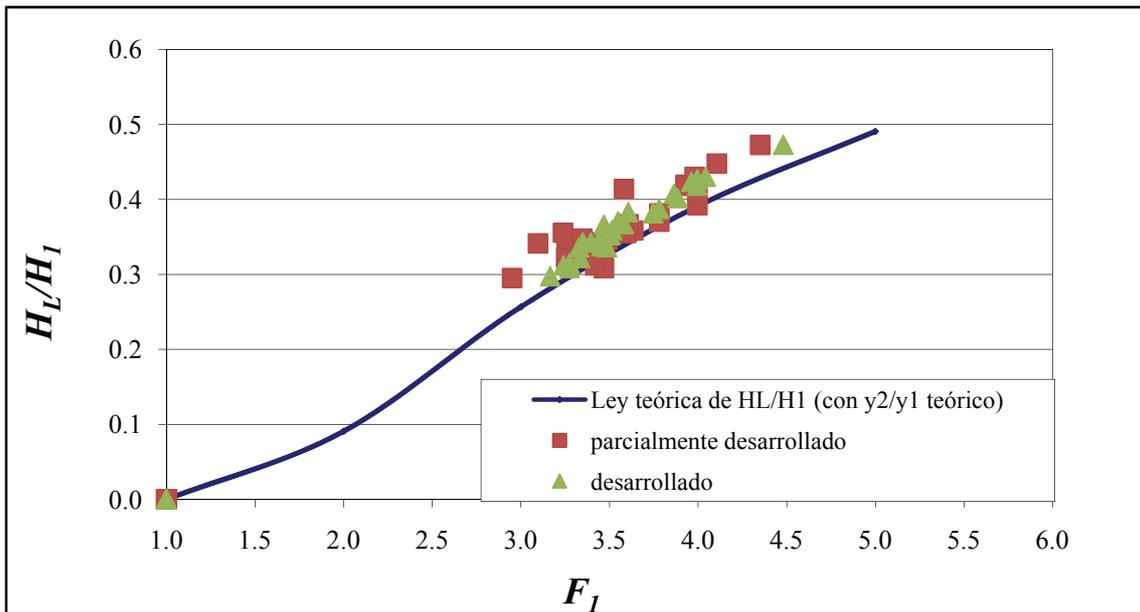


Figura 2.12. Pérdida de energía relativa en resaltos libres.

Analizando la representación de la pérdida de energía, se observa que los valores experimentales son superiores al ajuste teórico.

También se ha evaluado la disipación de energía en resaltos libres, utilizando valores de velocidad media, con la siguiente expresión clásica:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)}$$

Las siguientes expresiones se utilizaron para calcular la disipación de energía:

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right) \times 100$$

para el caso de los resaltos libres, donde : $H_1 = (v_1^2 / 2g + y_1)$ y $H_2 = (v_2^2 / 2g + y_2)$

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 2.12 y 2.13:

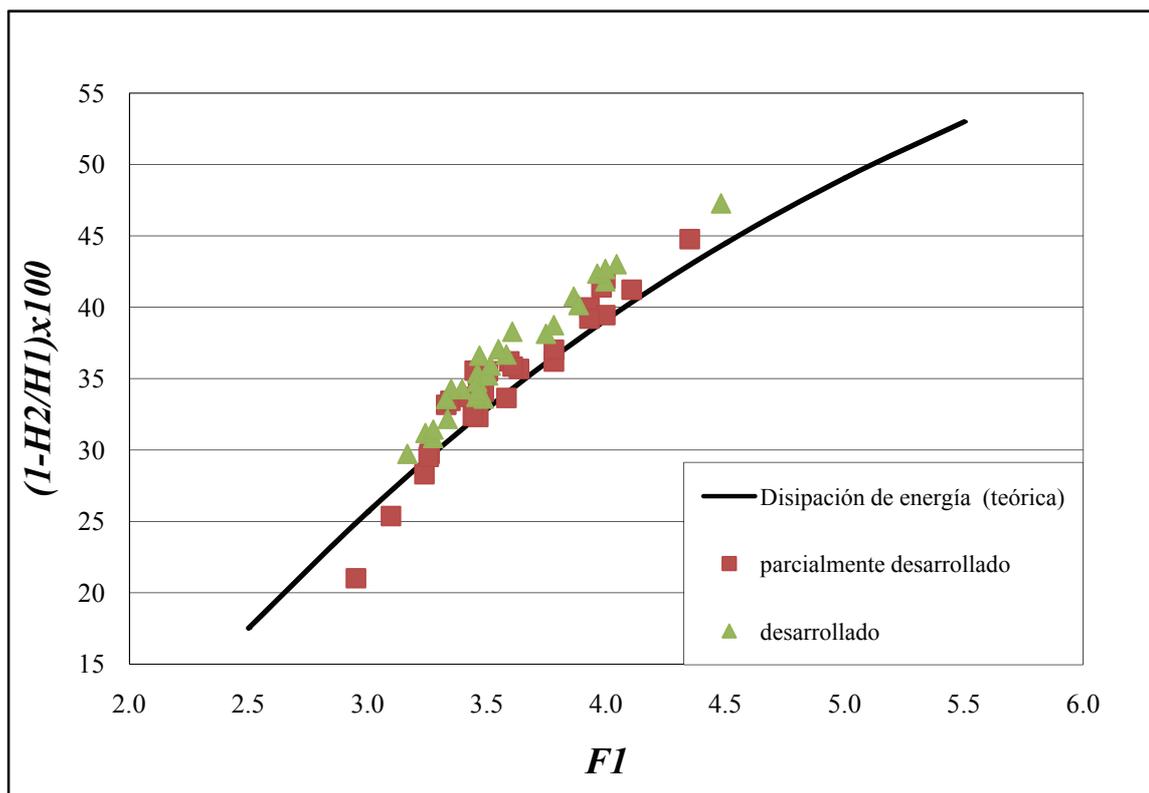


Figura 2.13. disipación de energía en resaltos libres.

Como se puede apreciar en la figura 2.13, tanto para flujo parcialmente desarrollado como para totalmente desarrollado, las pérdidas son superiores a la curva teórica, aunque en el caso de flujo totalmente desarrollado, difieren aun más.

En relación con los desplazamientos, obtenemos mayores pérdidas cuanto mayor es la distancia a la que se estabiliza el resalto aguas abajo del aliviadero. Para esto hemos realizado la diferencia entre la disipación de energía en cada desplazamiento con la disipación al pie del aliviadero.

Además la disipación se produce a medida que aumenta el número de Froude (ver figura 2.14).

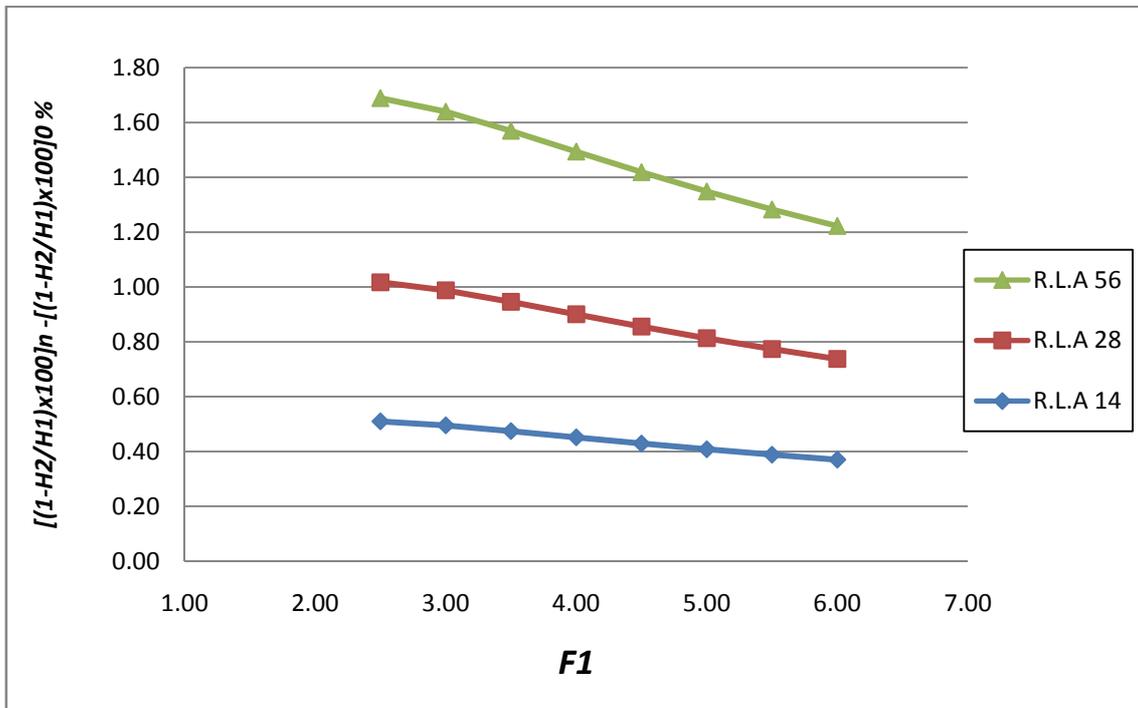


Figura 2.14. Disipación de energía frente a Froude.

En la figura 2.15 se analiza la disipación de energía en función de desplazamiento del resalto, agrupando los datos medidos en función del número de Froude. Se observa que la disipación de energía es inversamente proporcional al número de Froude.

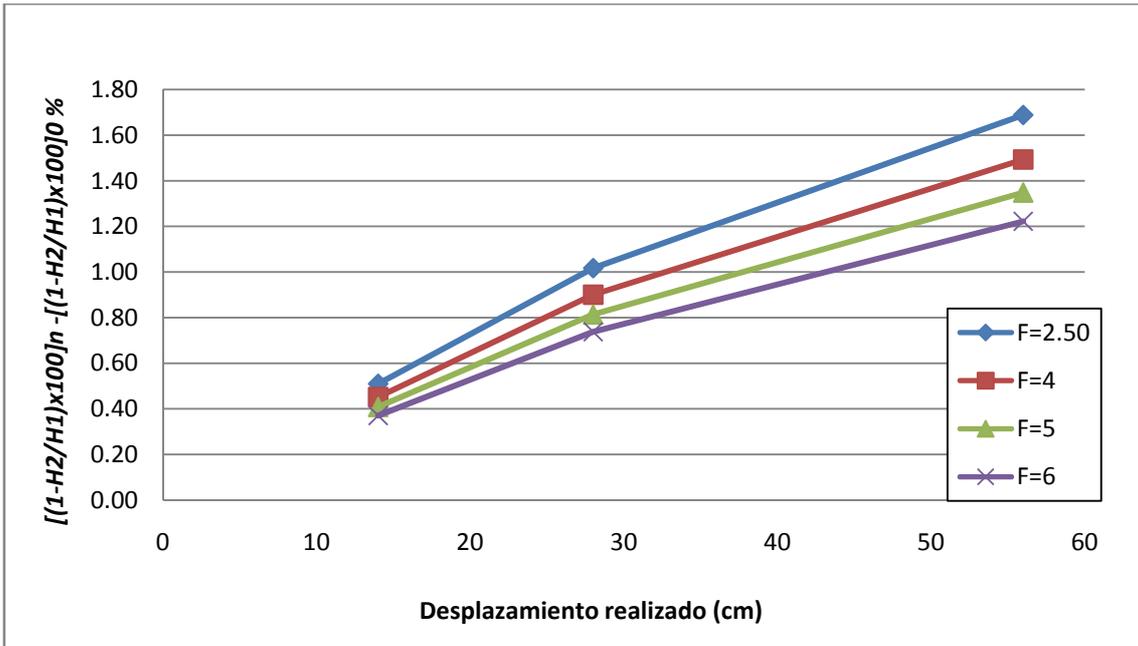


Figura 2.15. Disipación de energía según desplazamiento del resalto.

Referente a las pérdidas de energía debido a los fenómenos de escala, cabe destacar que tienen una influencia de aumento de pérdida de energía del orden del 2,3% de las pérdidas totales. Estas pérdidas tienen una mayor influencia en el flujo parcialmente desarrollado que en el totalmente desarrollado. Obsérvese que la influencia de las pérdidas de energía son mayores para número de Froude más bajos.

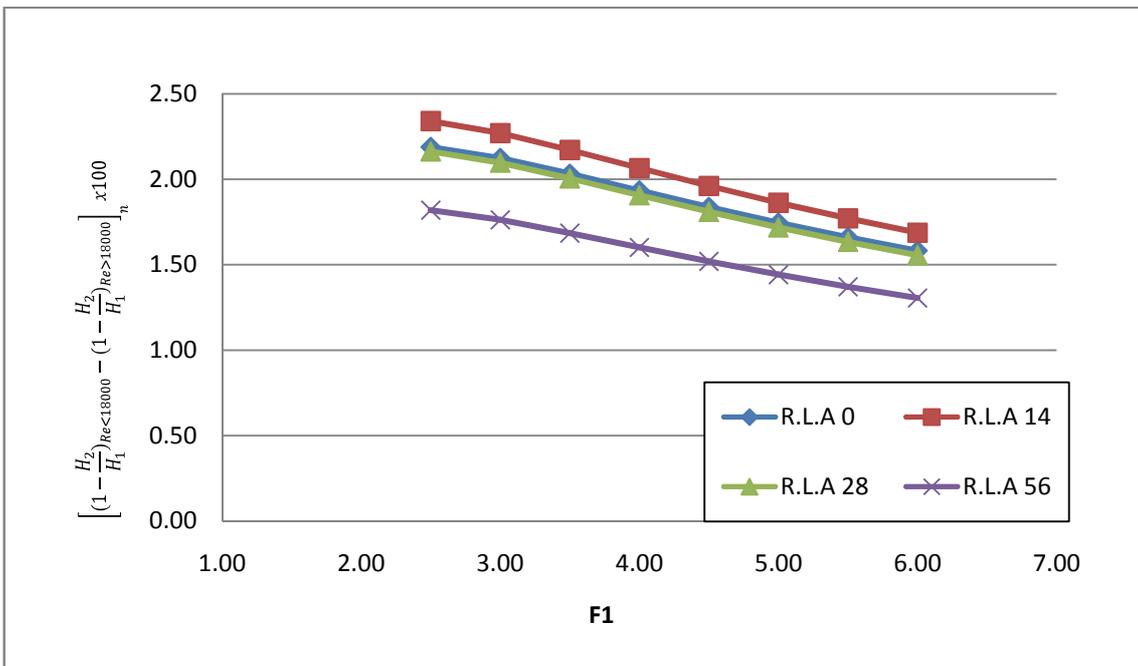


Figura 2.16. Influencia en las pérdidas por los fenómenos de escala.

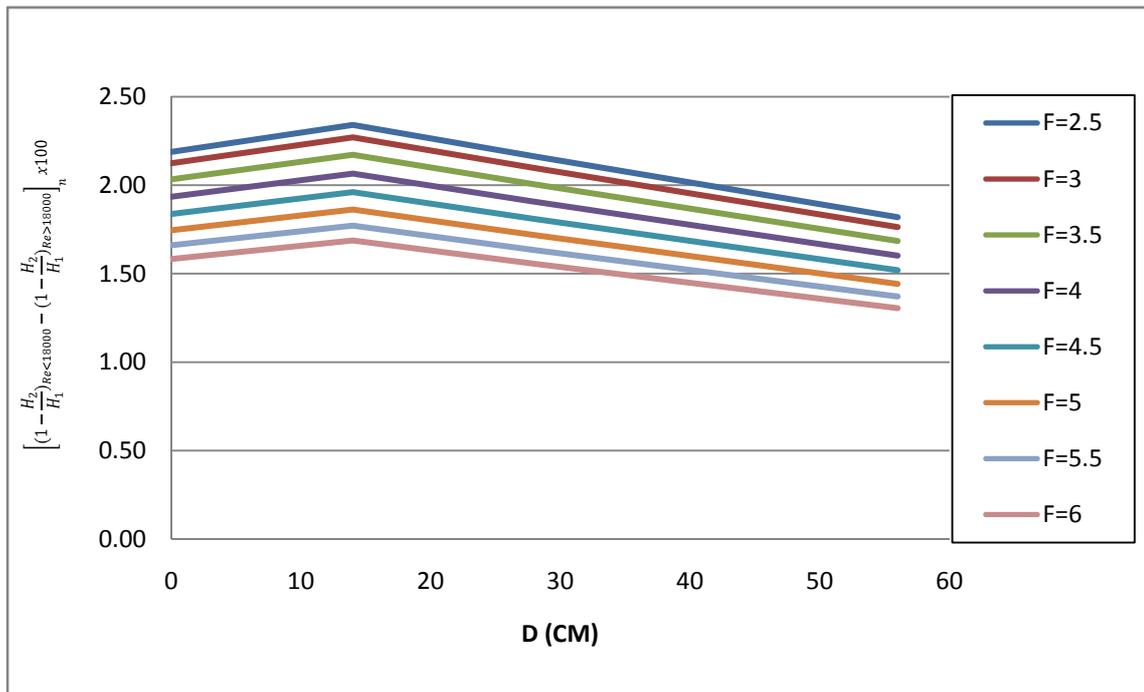


Figura 2.17. Influencia en las pérdidas por los fenómenos de escala.

Si observamos la figura 2.17, podemos concluir que los efectos de escala no afectan por igual a todos los resaltos según su desplazamiento, sino que tienen una mayor incidencia en resaltos con flujo parcialmente desarrollado, especialmente, en los resaltos estabilizados a 14 cm.

▪ **Longitud del resalto hidráulico**

En la figura 2.18 se representan nuestros resultados experimentales junto con las siguientes ecuaciones obtenidas por Ohtsu et al. (1990):

$$\log_{10} \frac{L_{rj}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,40; \text{ para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5)$$

$$\log_{10} \frac{L_j}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,58; \text{ para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \text{ y } (0,14 \leq H_L/H_1 \leq 0,71)$$

$$\log_{10} \frac{L_t}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,72; \text{ para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5)$$

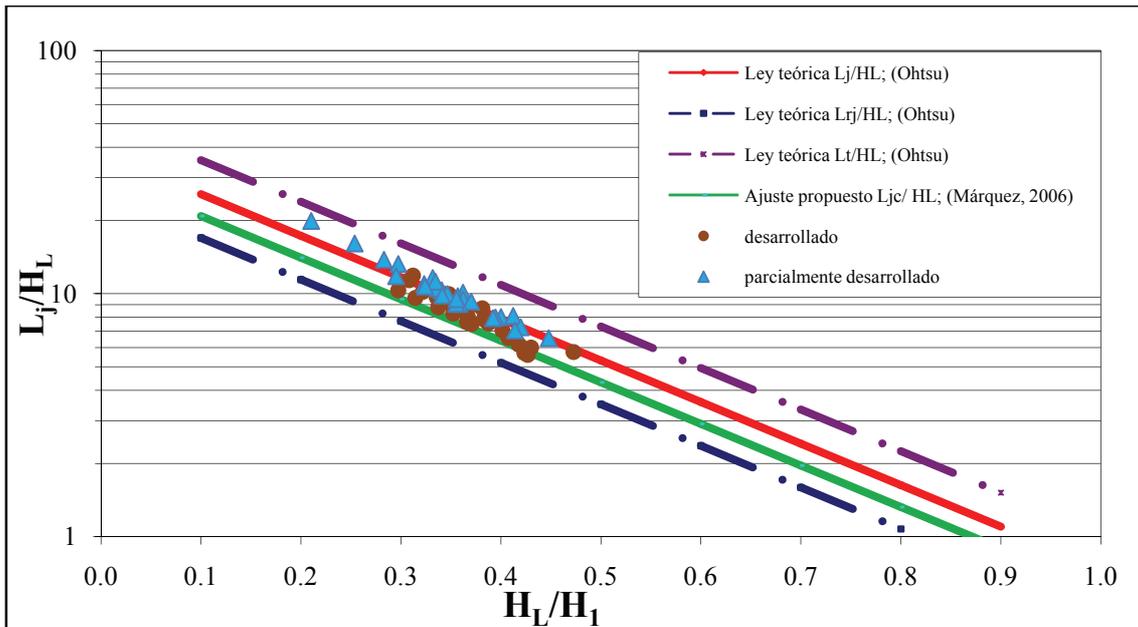


Fig.2.18. Relación entre L_j/H_L y H_L/H_1 .

Podemos observar que los resultados para flujo parcialmente desarrollado concuerdan muy bien con la ley de Ohtsu. Para flujo desarrollado muestran una tendencia entre el ajuste de Márquez (2006) y la de Ohtsu.

- **Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos**

Examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, se encuentra una distribución semejante de velocidades independiente de F_1 y x , dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$:

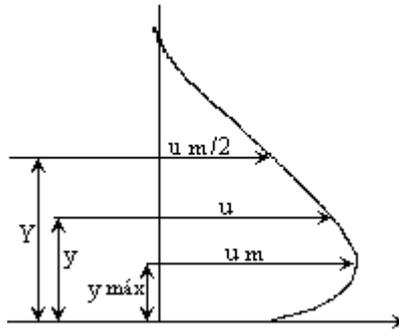


Figura 2. 19. Definición esquemática de Y y $y_{m\acute{a}x}$. (Márquez, 2006)

Esta distribución de velocidad se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left(\frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{1,177}{1-k} \left(\frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1,5$$

donde $k = y_{m\acute{a}x} / Y$

A continuación se representan en la figura 2.20 las leyes teóricas obtenidas experimentalmente por Ohtsu et al. (1990) para el Caso “a” (flujo potencial) y, para el Caso “b” (flujo desarrollado). En la misma figura se representan también nuestros resultados experimentales en las condiciones de flujo.

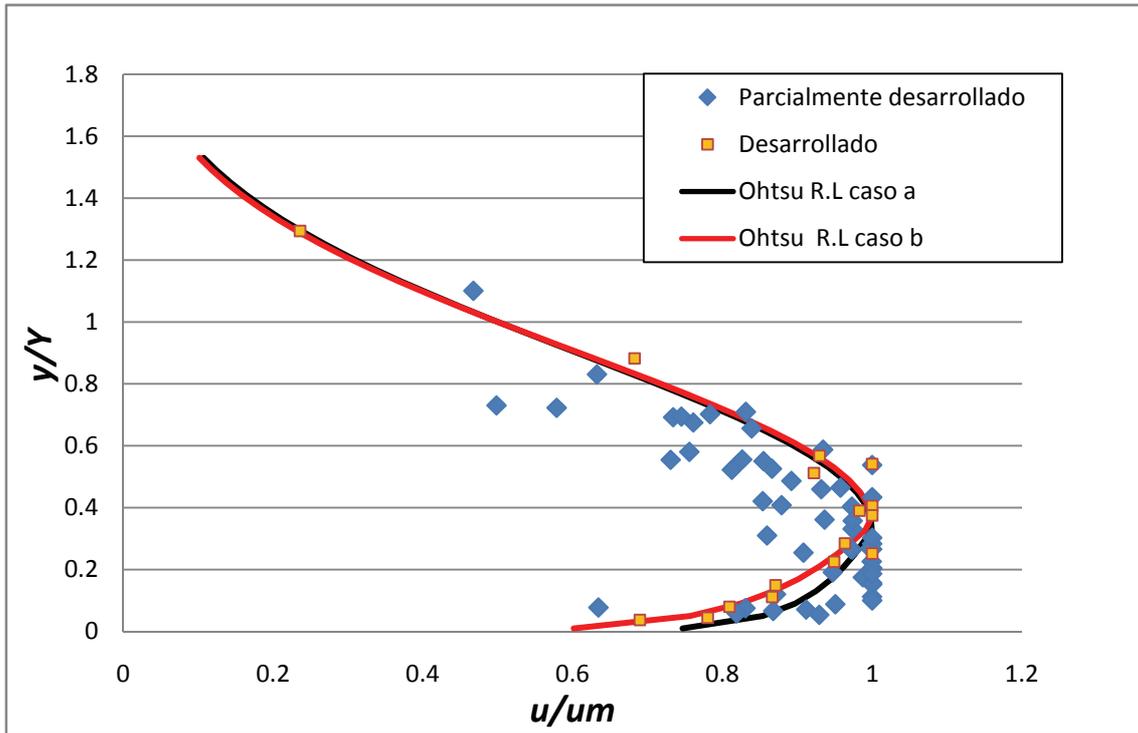


Figura 2.20. Distribución de velocidades.

Para flujo desarrollado se obtiene un buen ajuste a la ley de Ohtsu para su caso “b”, sin embargo, para flujo no desarrollado existe una cierta dispersión en la parte alta de la curva y, sin embargo, la parte baja se muestra más concordante.

Cuadro resumen del trabajo de laboratorio

Desplazamiento (cm)	Q_{real} (m³/h)	y_1 (cm)	y_2 (cm)	F_1	R_e	L_j (cm)	Nº de muestreos de velocidad
0	3,75 - 14,04	0,84 - 2,84	5,60 - 11,28	2,95 - 5,34	10503 - 28731	30 - 70,5	104
14	3,75 - 14,04	0,85 - 2,79	5,26 - 11,57	3,26 - 5,24	10546 - 28944	26,5 - 69	101
28	3,75 - 14,04	0,85 - 2,85	5,20 - 11,50	3,24 - 5,24	10611 - 29030	21,5 - 66	88
56	3,75 - 14,04	0,92 - 2,80	4,93 - 11,50	3,17 - 4,83	10418 - 29160	20 - 60	0

3. TRABAJO EXPERIMENTAL Y FILTRADO DE DATOS

3.1. Trabajo de laboratorio

Descripción de los componentes del canal

El canal utilizado para este proyecto consta de dos soportes los cuales permiten la nivelación del canal, un depósito de almacenamiento de agua, una bomba centrífuga, una compuerta aguas abajo y unos tranquilizadores de flujo.

Soportes del canal: aparte de la función estructural del canal permite la nivelación del mismo. El canal presenta un defecto de forma en su parte final que se presenta de forma arqueada, lo cual no afecta a la zona de trabajo apreciable en el parte izquierda de la fotografía. En trabajos anteriores se incluyeron dos soportes adicionales para corregir este problema (véase Figura 3.1).



Figura 3.1. Canal de laboratorio (Márquez, 2006).

Deposito de almacenamiento: contiene el agua que recircula por el canal.

Bomba de agua: permite recircular el agua a distintos caudales gracias a una válvula de control.

Compuerta: permite controlar el caudal de aguas abajo, con lo que podemos obtener resaltos a distintos desplazamientos.

Tranquilizadores de flujo: evitan la excesiva oscilación de las ondas a lo largo del canal y que estas oscilaciones influyan en la aspiración de la bomba produciendo resaltos oscilantes.

Aliviadero: el azud utilizado en este trabajo presenta un aliviadero con perfil tipo WES tallado en metacrilato. Su altura es de 14,8 cm desde la base. La situación del aliviadero es de 73 cm aguas abajo de la salida del depósito tranquilizador del principio del canal.



Figura 3.2. Aliviadero utilizado como estructura de control.

Aforo inicial

Antes de iniciar la toma de datos se procedió a realizar un aforo volumétrico para comprobar la bondad del caudalímetro instalado en el canal. De este aforo se observó una desviación sistemática en los caudales. Se propuso una curva de transformación de los caudales indicados en el caudalímetro, con estas medidas.

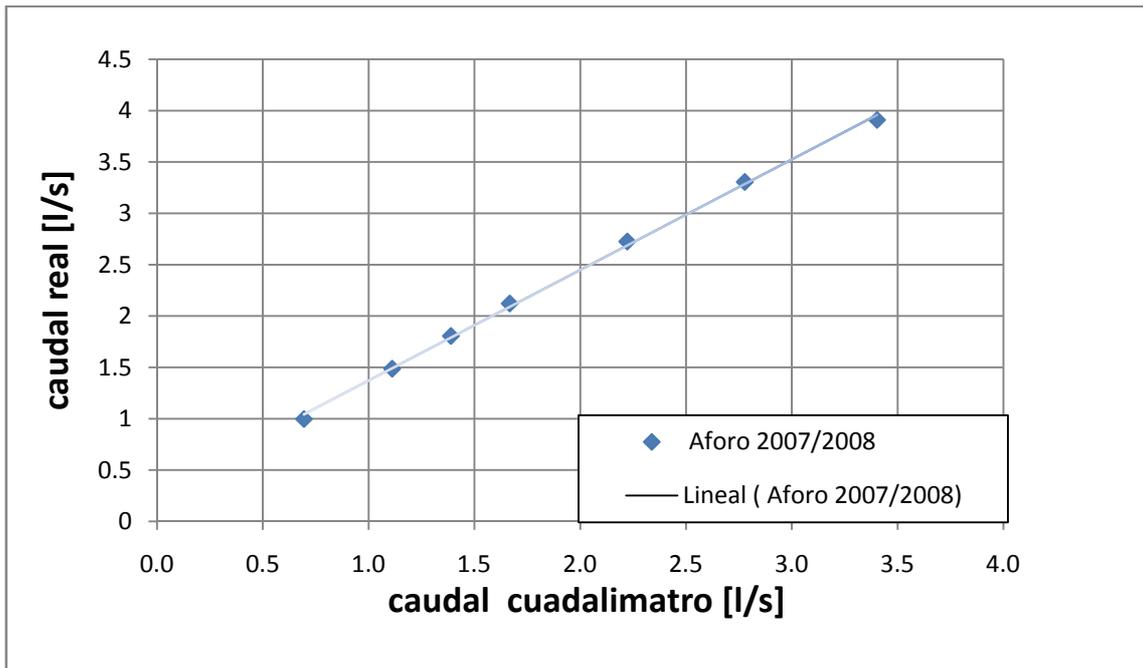


Figura 3.3. Corrección de caudales.

Q caudalímetro	Q Real
m ³ /h	m ³ /h
4	5,36
5	6,42
6	7,47
8	9,57
10	11,68
12,25	14,04

Tabla 3.1. Caudales de trabajo.

Configuración de la sonda

La caracterización de los gradientes de velocidad en los distintos perfiles de los resaltos hidráulicos se empleó un equipo acústico Doppler de la casa SonTek/YSI (ADV) con medición de velocidad del flujo en 3D.

Este equipo ha sido utilizado de forma similar a trabajos anteriores (Márquez, 2006).

Frecuencia de muestreo: la toma de velocidades se realiza con una frecuencia de 5 Hz de esta manera se obtienen valores de velocidades más homogéneos.

Condiciones del agua: para una mayor exactitud de las mediciones el agua ha de estar a una temperatura del orden de 20° C y una salinidad de 2ppt. Además se añade un aditivo suministrado junto con la sonda por el proveedor para garantizar la suspensión de partículas que se detecten al paso por el volumen de control de medida.

Rango de velocidad: este parámetro influye en la calidad de los resultados, siendo necesario escoger el menor rango posible. El valor de este parámetro está fijado en ± 100 cm/seg.



Figura 3.4. Sonda.

Equipo informático

Para la campaña de muestreo se utilizó un portátil acer aspire 1644 (figura 3.5) un conector USB-Serie con su correspondiente software y el equipo Doppler (figura 3.6).



Figura 3.5. Ordenador portátil.



Figura 3.6. Sonda y receptor ADV

Campaña de muestreo

Los parámetros obtenidos en el laboratorio son aquellos que definen un resalto hidráulico.

H : carga aguas arriba del azud

L_j : longitud del resalto hidráulico.

y_1 : calado contraído en flujo supercrítico.

y_2 : calado conjugado en la sección final del resalto hidráulico.

Para la medida de estos parámetros se utilizó un limnómetro diseñado por el fabricante para este canal. Se realizaron dos campañas de muestro geométrico (H , L_j , y_1 , y_2) con la finalidad de obtener una nube de puntos más completa.

Se fijaron para cada uno de los caudales de trabajo tres resaltos hidráulicos en función del desplazamiento, un resalto al pie del azud (R.L.A 0: **R**esalto **L**ibre con **A**liviadero y desplazamiento **0** cm) otro a 14 cm (R.L.A 14) y otro a 28 cm del pie (R.L.A 28).



Figura 3.7. Resalto formado al pie del aliviadero.



Figura 3.8. Resalto desplazado.

En cada uno de los resaltos se distinguieron cinco secciones en las cuales se llevaron a cabo las mediciones con el equipo Doppler a distintas profundidades, para establecer el gradiente de velocidad en esa sección.

Sección 1. Se localiza a un cuarto de la longitud del resalto hidráulico ($L_j/4$)

Sección 2. Localizada a $L_j/2$.

Sección 3. Localizada a $3L_j/4$.

Sección 4. Localizada a L_j .

Sección 5. Localizada a una distancia intermedia entre el final del resalto y el punto medio del canal.

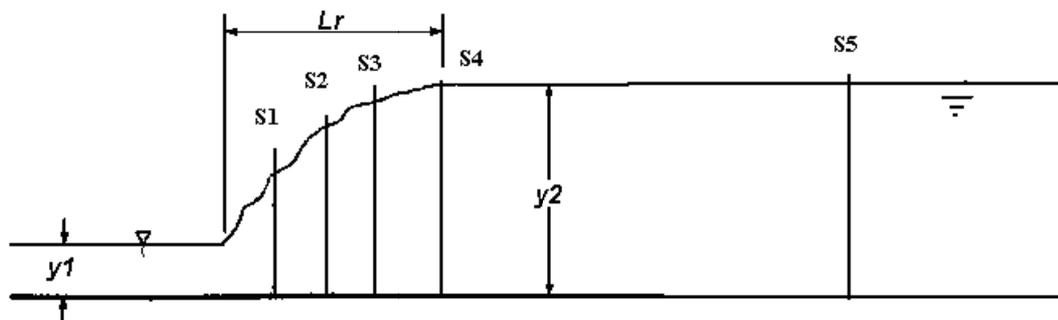


Figura 3.9. Distribución de las secciones en el resalto.

En una última comprobación y corrección de algunos datos erróneos, se realizó una campaña limnimétrica en la cual se añadieron otros caudales intermedios adicionales y un desplazamiento adicional a 56 cm del pie del aliviadero.

3.2. Filtrado de datos

El sistema de adquisición de medidas del equipo ADV requiere plena sumergencia, debido a que el agua es el elemento transmisor de la onda de sonido. El problema reside en la aireación de los resaltos ya que la interposición de las burbujas en el camino de las ondas sónicas emitidas por el equipo, éste lo interpreta como una medición negativa en el extremo del rango de velocidades ± 100 cm/s, elegido en la configuración de la sonda para este estudio.

Para desechar estas mediciones erróneas se ha procedido a un filtrado de las series de datos en el que se descartan las mediciones en los percentiles 5 y 95% (Castillo, 2008).

Para el filtrado fue necesario exportar las series de 2048 datos a una plantilla de Excel preparada al efecto, en la que se disponían 4 filtrados consecutivos. Para cada serie y en función del grado de perturbación se escogía el número de filtrados necesarios sin excederse para no perturbar los resultados finales.

Las mediciones erróneas por aireación se presentan en el extremo negativo, en cambio las mediciones en el rango positivo por encima de la media permanecen inalteradas por este fenómeno. El filtro aprovecha este hecho para desechar los puntos erróneos por aireación.

Para poder eliminar los percentiles 5% y 95% de los datos reales excluyendo los erróneos, es necesario obtener una amplitud del rango de datos. Esta amplitud no puede ser la amplitud real tomada desde el valor mínimo real al valor máximo real, debido a que el valor mínimo es un valor erróneo, para ello se obtiene una amplitud a partir del rango superior a partir de la media del muestreo. A continuación se detalla el proceso de filtrado.

El proceso de filtrado de datos consta de cinco fases distinguidas.

1° Se extrae la media de los 2048 valores de velocidad denominada X_{media} para cada uno de los puntos medidos.

2° Se extrae el valor máximo de la serie original denominado X_{max} y seguido otro valor $A1$ el cual se define como la diferencia entre el valor máximo y la media.

$$A1 = X_{max} - X_{min}$$

3° De igual manera se obtiene el valor mínimo obtenido de la diferencia entre $A1$ y la media de manera que $X_{min} = X_{media} - A1$. Seguidamente se obtiene la amplitud total designada como A .

$$A = X_{max} - X_{min}$$

4° A continuación se obtienen el valor de corte del percentil 95% $X_{max,c}$ el cual se obtiene reduciendo el valor X_{max} original por el 5% del valor de la amplitud.

$$X_{max,c} = X_{max} - (A * 0.05)$$

5° el valor de corte mínimo $X_{min,c}$ se consigue mayorando el valor mínimo de la serie original el 5% del valor de la amplitud A . De esta manera conseguimos que el filtro no elimine un percentil superior al percentil 5 y 95 % del registro.

$$X_{min,c} = X_{min} + (A * 0.05)$$

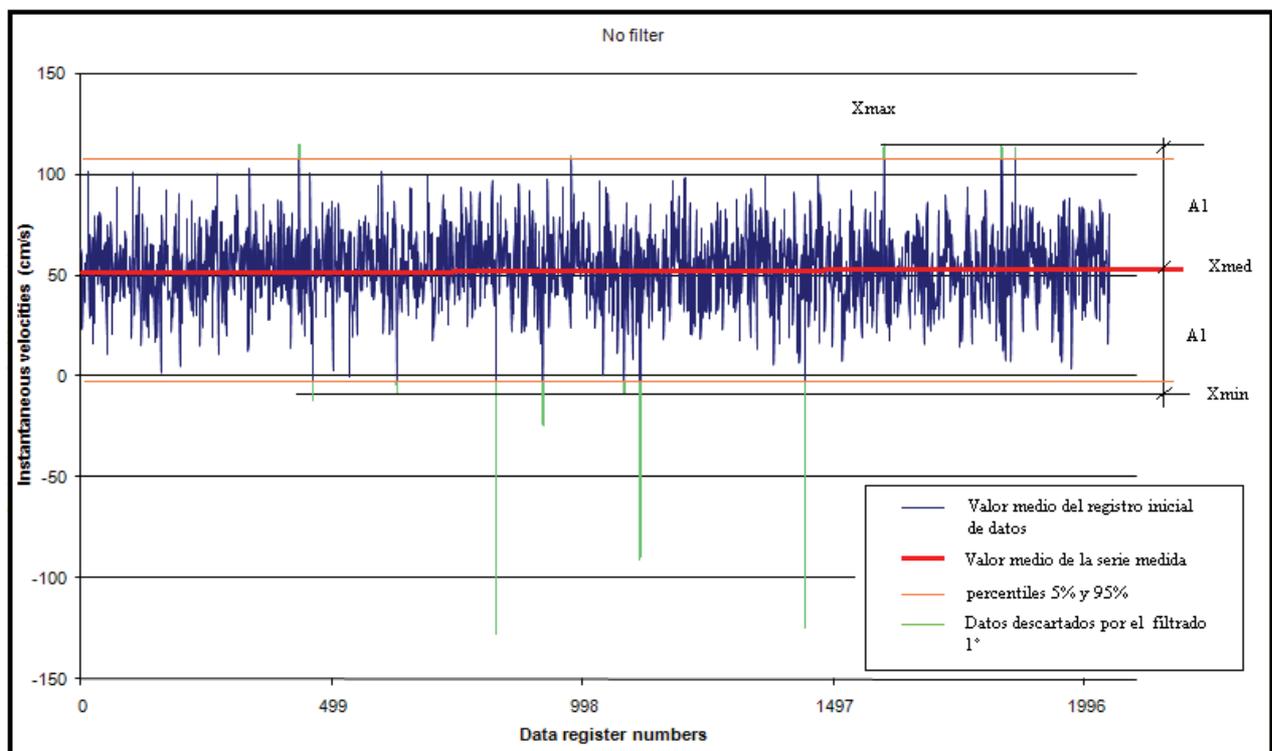


Figura 3.10. Esquema de funcionamiento del filtro.

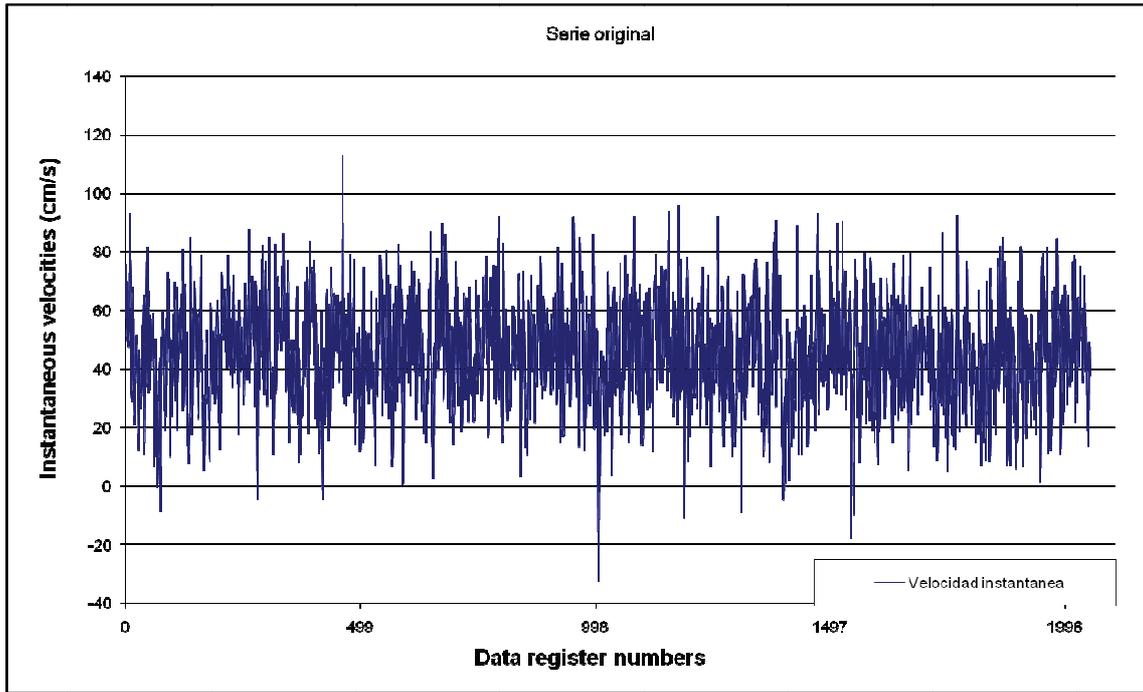


Figura 3.11. Serie original.

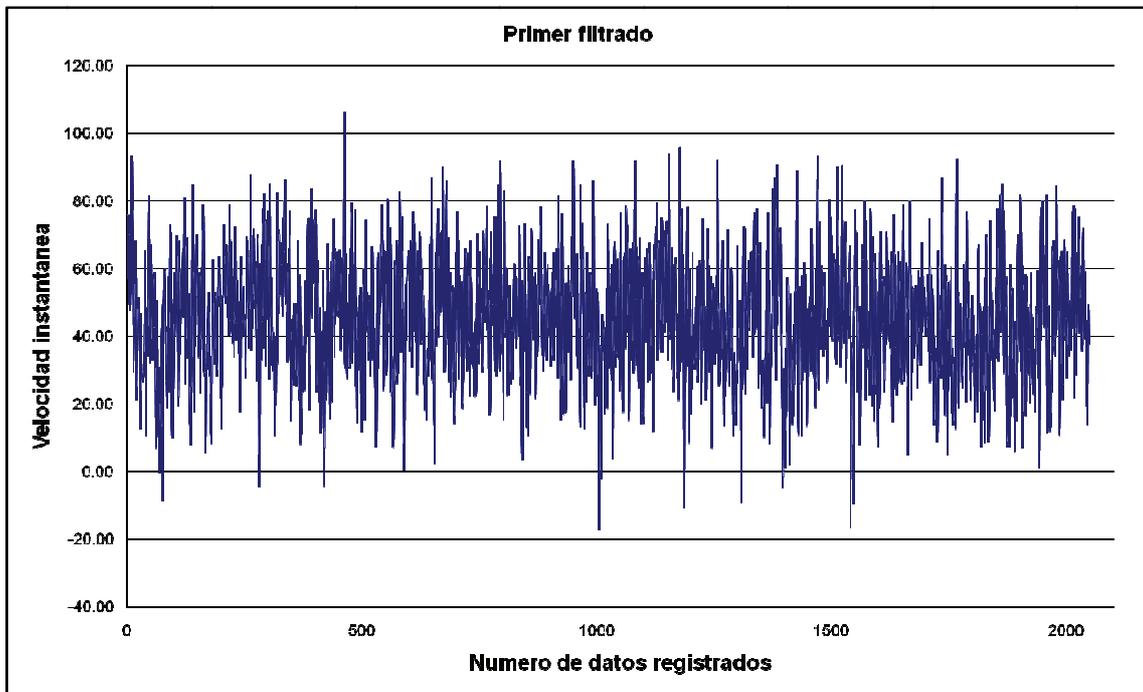


Figura 3.12. Resultado tras el primer filtrado.

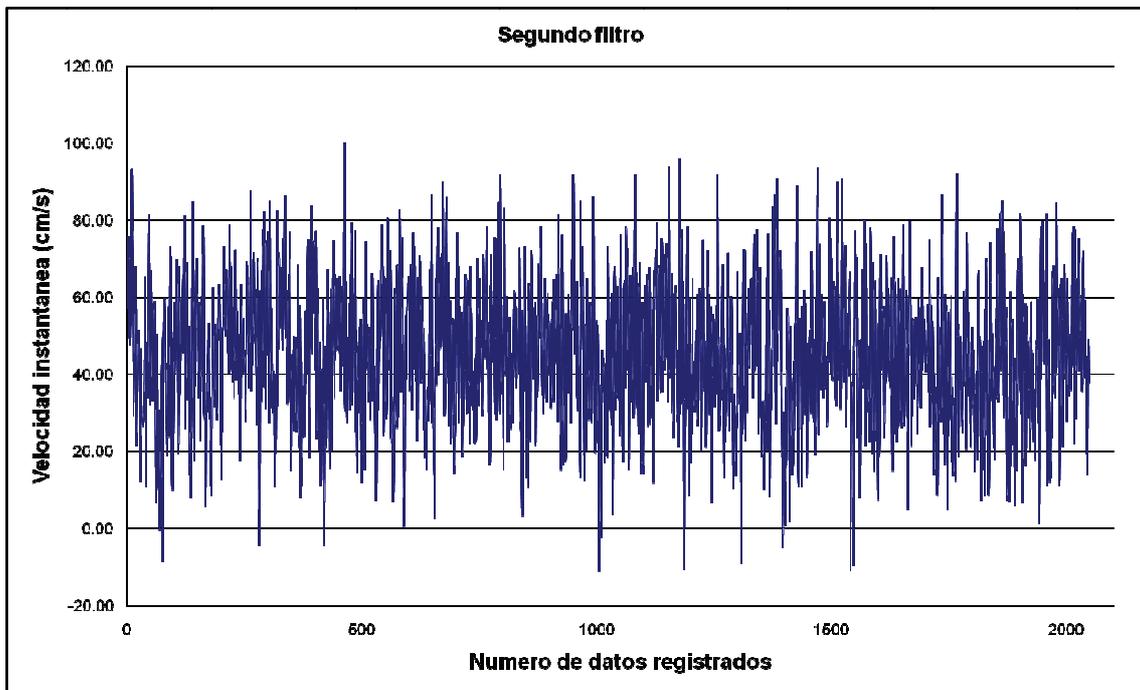


Figura 3.13. Resultado tras el segundo filtrado.

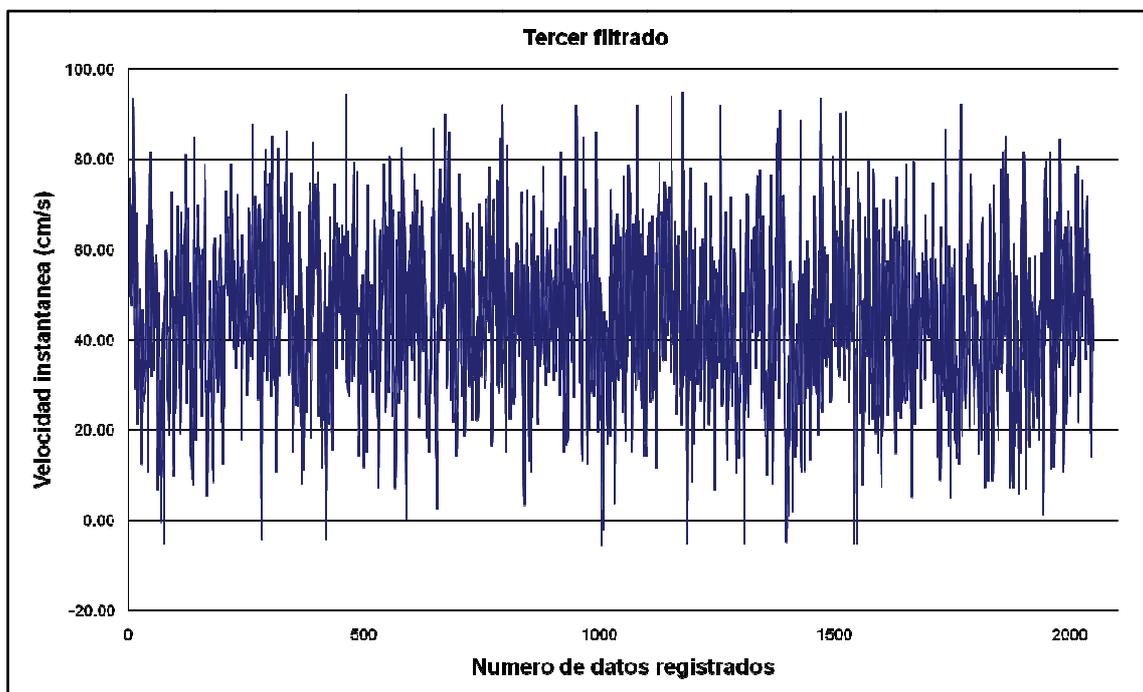


Figura 3.14. Resultado tras el tercer filtrado.

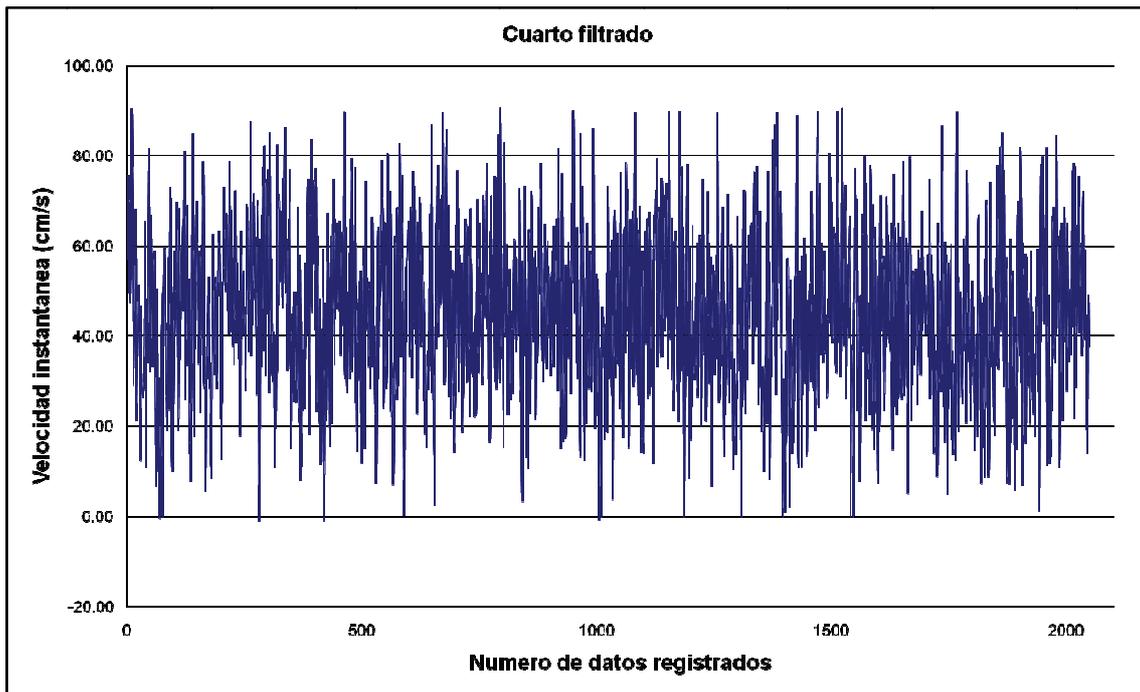


Figura 3.15. Resultado tras el cuarto filtrado.

			1° Filtrado		2° Filtrado		3° Filtrado		4° Filtrado
N° de muestra	u_x	Límite superior	Límite inferior						
1	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38	108,38
2	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24	119,24
3	120,43	120,43	120,43	120,43	120,43	120,43	120,43	120,43	120,43
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2021	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62	117,62
2022	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35	124,35
2023	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00
2024	67,43	67,43	79,84	79,84	83,95	83,95	87,09	87,09	89,96
Xmedia=	111,75		112,23		112,40		112,58		112,77
Xmax=	147,21		143,66		140,52		137,71		
A1=	35,46		31,43		28,12		25,13		
Xmin=	76,29		80,81		84,28		87,25		
A=	70,92		62,86		56,24		50,26		
A*0,05=	3,55		3,14		2,81		2,51		
Xmax c=	143,66		140,52		137,71		135,20		
Xmin c=	79,84		83,95		87,09		89,96		

Figura 3.16. Modelo de tratamiento de datos (Márquez, 2006)

4. LIMITACIONES DEL EQUIPO

4.1. Sonda

La principal limitación de la sonda radica en las propiedades geométricas del sistema de adquisición de datos el cual exige un calado superior a 5 cm. Esto se debe a que el equipo Doppler necesita un rebote de la onda sobre el fondo del canal y de regreso ser captada por la sonda, a una distancia mínima, de 5 cm en el caso de la sonda MicroADV de 16 Mhz.

Esta circunstancia no permite la medición de caudales bajos y calados inferiores a 5 cm.

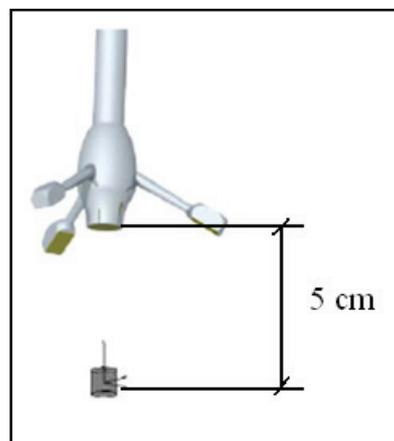


Figura 4.1. Umbral de medición del equipo ADV

4.2. Canal

Subsanados en trabajos anteriores todos los defectos de forma e influencia en el flujo, como las perturbaciones al inicio y fin del canal para las que se necesitan los tranquilizadores, la restricción impuesta por canal es la imposibilidad de alcanzar un mayor rango de Froude que en este trabajo se sitúa entre $3.15 < F_1 < 5.6$.

Otro importante factor limitante del canal se debe a los efectos de escala, los cuales proporcionan una adicional pérdida de energía. Otros autores como Chanson (2005), encuentran que los efectos de escala persisten hasta números de Reynolds de 21000.

5. BASES TEÓRICAS

5.1. Estructura de control. Aliviadero WES

La forma de la cresta del vertedero pretende simular la forma geométrica de la napa inferior de un vertedero de pared delgada, y ajustar la presión de la napa sobre el aliviadero a la presión atmosférica con el caudal de cálculo y evitar problemas de cavitación.

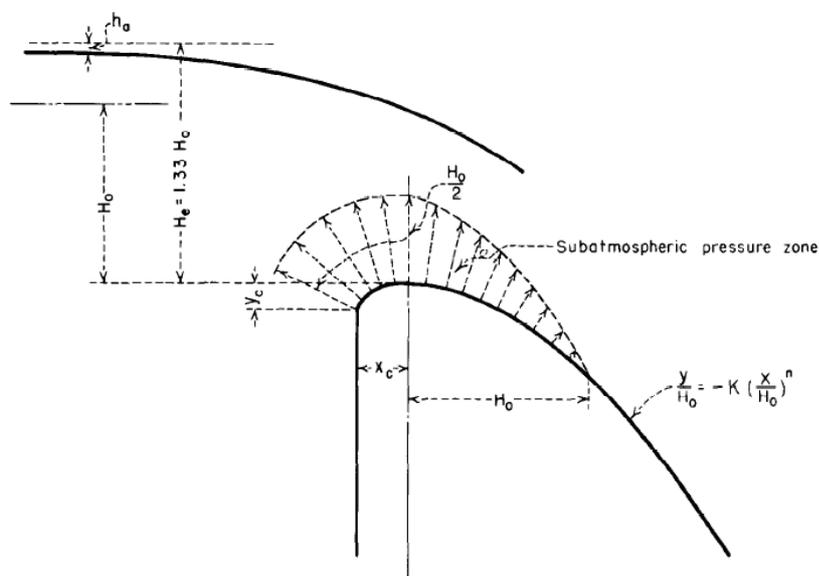


Figura 5.1. Gradiente de presiones sobre el aliviadero.

El fenómeno de la cavitación hace presencia cuando el caudal que circula por el aliviadero es superior al caudal de diseño, por el contrario cuando el caudal es inferior al de diseño, el gradiente de presiones sobre el aliviadero es superior a la presión atmosférica.

Con esta intención el U. S. Army Corp of Engineers desarrolló algunos perfiles característicos en su Waterways Exarimental Station (WES), el resultado de estas investigaciones condujo a la proliferación de este tipo de perfiles en infraestructuras hidráulicas de todo el mundo.

La parte superior de este tipo de vertederos queda definida por una curva simple o por una curva tangente circular compuesta, mientras que la parte de aguas abajo es definida por una ecuación de este tipo:

$$\frac{y}{H_0} = -K \left(\frac{x}{H_0} \right)^n \quad (5.1)$$

Donde K y n dependen de la inclinación del paramento de aguas arriba y velocidad de aproximación y H_0 es la carga total sobre el aliviadero.

5.2. Flujo sobre el vertedero

El caudal vertido por este tipo de aliviaderos es $Q = CLH_0^{\frac{3}{2}}$ donde:

Q = caudal.

C =coeficiente de vertido.

L = longitud efectiva de coronación.

H_0 =carga total sobre la coronación.

El coeficiente de desagüe C queda influenciado por diversas variables como inclinación del paramento, calado de aguas arriba y de aguas abajo y otras consideraciones constructivas.

La velocidad teórica a la salida de la estructura se encuentra aplicando Bernoulli aguas arriba y al pie, quedando la siguiente expresión $V_1 = \sqrt{2g(Z + h_a - y_1)}$ donde Z es la altura desde la solera del canal al pie hasta el nivel de la lamina aguas arriba, h_a es la carga de velocidad aguas arriba e y_1 es el calado contraído al pie del aliviadero.

La pérdida de energía por fricción hace diferir los resultados teóricos con los experimentales, en los cuales la diferencia es mayor cuanto menor es la carga (H) y mayor es la caída (Z). Otro factor importante en la pérdida de carga es la pendiente del aliviadero, donde las pérdidas son mayores a menor pendiente, por el contrario en pendientes empinadas, la pérdida por fricción no es significativa.

5.3. Resalto hidráulico

El resalto hidráulico es una elevación abrupta en el nivel del agua cuando por un canal circula agua en régimen supercrítico y esta se retiene debido a las condiciones de flujo de aguas abajo. Exactamente cuando se igualan los momentos aguas arriba y aguas abajo.

La formulación del resalto hidráulico se obtiene igualando las fuerzas exteriores, que actúan en la masa de agua, con el incremento de la cantidad de movimiento. La formula general es:

$$V_1^2 = g \frac{a_2 \bar{y}_2 - a_1 \bar{y}_1}{a_1 \left(1 - \frac{a_1}{a_2}\right)} \quad (5.2)$$

V_1 = velocidad antes del resalto.

a_1 y a_2 = áreas antes y después del resalto.

y_1 e y_2 = a las profundidades desde la superficie del agua hasta el centro de gravedad de las secciones transversales.

En términos de caudal, la formula general es:

$$Q^2 = g \frac{a_2 \bar{y}_2 - a_1 \bar{y}_1}{\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right)} \quad (5.3)$$

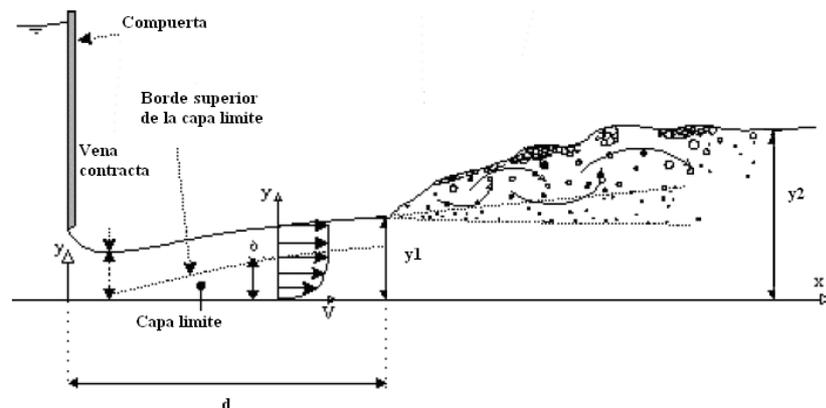


Figura 5.2. Resalto hidráulico.

5.4. Tipos de resaltos hidráulicos

Los resaltos hidráulicos sobre soleras horizontales se clasifican en varias clases. De acuerdo con los estudios del U.S Bureau of Reclamation estos pueden clasificarse convenientemente según el número de Froude al inicio del resalto:

- $F_1=1$, el flujo es crítico y no se forma el resalto.
- $1 < F_1 < 1.7$, la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el *resalto ondulante*.
- $1.7 < F_1 < 2.5$ se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero aguas abajo la lamina es muy uniforme. La pérdida de energía es baja. Este se denomina *resalto débil*.
- $2.5 < F_1 < 4.5$ existe un chorro que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, que puede viajar a lo largo de varios kilómetros, se produce entonces el *resalto oscilante*.
- $4.5 < F_1 < 9$ la extremidad de aguas abajo del remolido 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 entre 45% y 70%. Se presenta entonces el *resalto estable*.
- $F_1 > 9$, 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 oscilaciones 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%. Este resalto se denomina *resalto fuerte*.

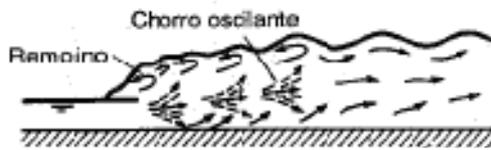
Se debe recalcar que los rangos del número de Froude dados arriba para los siguientes tipos de resalto no están claramente demarcados sino que se trasladan en cierto modo según las condiciones locales.



$F_1 = 1 - 1,17$ Resalto ondulante



$F_1 = 1,17 - 2,5$ Resalto débil



$F_1 = 2,5 - 4,5$ Resalto oscilante



$F_1 = 4,5 - 9,0$ Resalto estable



$F_1 > 9,0$ Resalto fuerte

Figura 5.3. Tipos de resaltos hidráulicos.

Pérdida de energía.

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

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (5.4)$$

Donde

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

E_1 = energías específica en la sección 1

E_2 = energía específica en la sección 2

La pérdida de energía ΔE en el resalto se calcula apartir de la siguiente ecuación:

$$\frac{q^2}{2gy_1^2} + y_1 = \frac{q^2}{2gy_2^2} + y_2 + \Delta E$$

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

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (5.5)$$

Y por tanto

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{2 - 2(y_2 y_1) + F_1^2 [1 - (y_1 y_2)^2]}{2 + F_1^2} \quad (5.6)$$

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

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (5.7)$$

6. ANÁLISIS TEÓRICO EXPERIMENTAL

6.1. Introducción

El resalto hidráulico es un fenómeno bien conocido como método útil para disipar el exceso de energía de flujos de alta velocidad.

Los resaltos hidráulicos pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de canal en los que ocurren, como resaltos hidráulicos en canales rectangulares y no rectangulares, resaltos hidráulicos en canales horizontales e inclinados y resaltos hidráulicos forzados. Los resaltos hidráulicos pueden ser clasificados también como resaltos hidráulicos libres y resaltos hidráulicos sumergidos y como resaltos al pie de la estructura de control y desplazados.

En este proyecto se presenta un estudio sistemático de las formas más fundamentales de resaltos hidráulicos en canales rectangulares aguas abajo de un aliviadero.

6.2. Consideraciones de los efectos de escala

Los efectos de escala son un fenómeno que se manifiesta por la presencia adicional de pérdida de energía para similares condiciones de flujo cuando trabajamos con canales de anchos pequeños.

Chanson (2005) muestra la presencia de efectos de escala al realizar experiencias en semejantes condiciones de flujo en dos canales de anchos 0,50 m y 0,25 m, cuando el parámetro de Reynolds $[Re = \frac{Rh \cdot V1}{\mu}]$ se encuentra por debajo de 21000.

Detectada la presencia de efectos de escala, se procede a una clasificación de los rangos de datos bajo estos efectos, para ello se utilizó el criterio de Chanson, aunque para nuestras mediciones encontramos una mayor definición con el límite de número de Reynolds de 18000.

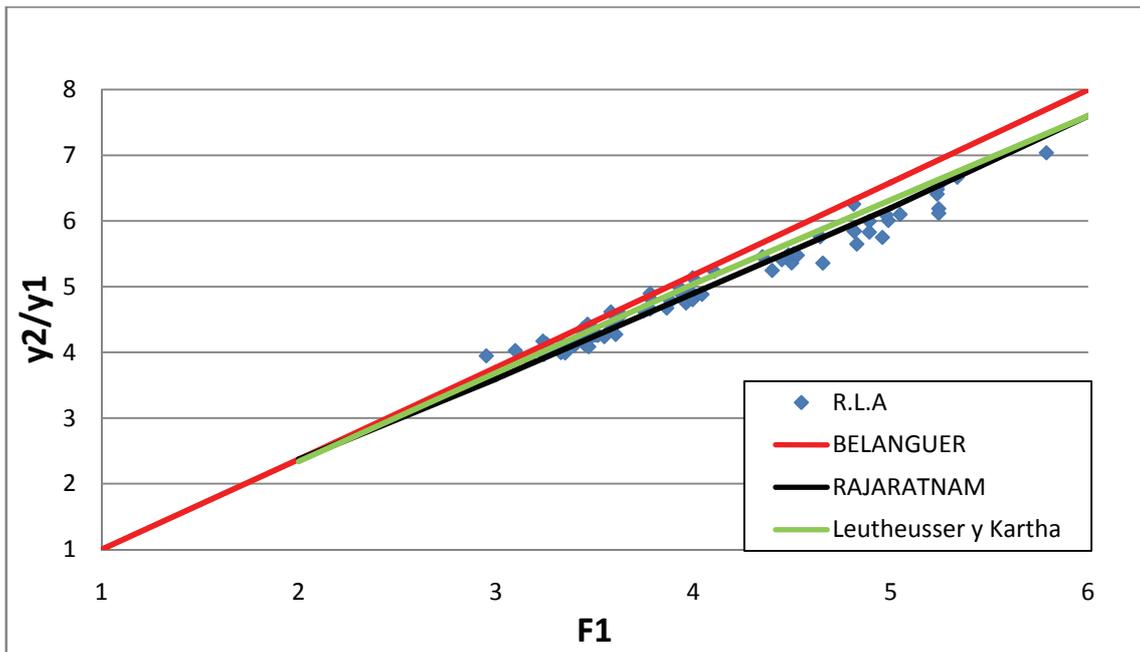


Figura 6.1. Serie de datos sin clasificar según Reynolds.

Como podemos apreciar en las figuras 6.1 y 6.2 en función del número de Reynolds, los datos medidos se clasifican con y sin efectos de escala para un límite de 18000.

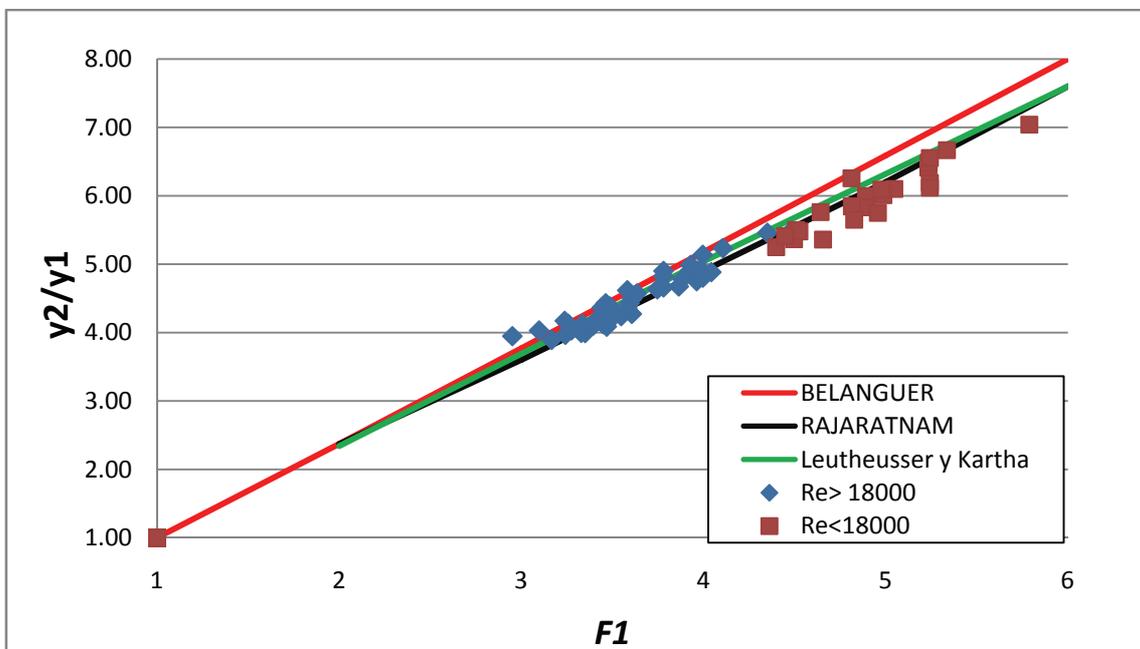


Figura 6.2. Diferencia entre mediciones bajo efecto de escala y sin efecto de escala.

Teniendo en cuenta que un aumento de pérdida de energía produce menores velocidades y, por tanto, mayores calados al inicio del resalto, la relación y_2/y_1 disminuirá.

Concordante con esta deducción se muestran los datos con $Re < 18000$ o ensayos con efecto de escala.

6.3. Flujo desarrollado y no desarrollado. Capa Límite

Es un fenómeno localizado al pié del resalto hidráulico debido al fuerte gradiente de velocidad producido desde la solera del canal. Este efecto se traduce en un deslizamiento de una parte del flujo supercrítico conocida como capa potencial sobre una capa de fluido de menor velocidad y que evita que la totalidad del flujo se encuentre bajo los efectos de la fricción o tensión de corte con la solera.

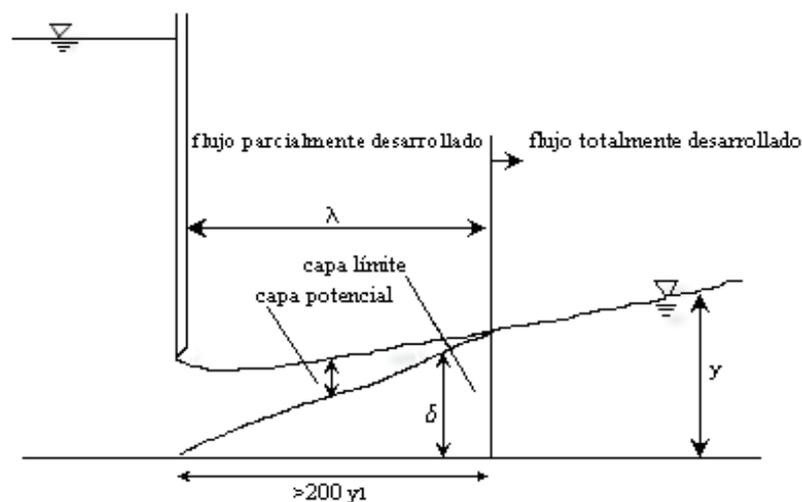


Figura 6.3. Desarrollo de la capa límite. (Márquez, 2006)

Esta capa hace su presencia generalmente aguas abajo de compuertas, donde se da un flujo supercrítico. No obstante también aparece en aliviaderos tipo ogee si la longitud desde la coronación no es suficiente para que la subcapa laminar alcance el calado aguas abajo.

Se conoce como flujo no desarrollado o parcialmente desarrollado al flujo bajo el efecto de la capa límite y totalmente desarrollado cuando ésta deja de tener presencia.

Al incrementar la distancia desde la compuerta, el espesor de la capa límite aumenta, mientras que la capa potencial decrece. Después de una longitud λ de avance del flujo, el espesor de la capa límite δ llega a ser igual a la profundidad del flujo y , constituye en este momento, un flujo totalmente desarrollado.

Resch y Leutheusser (1972) observaron que la longitud necesaria para que la capa límite alcance el calado del flujo (flujo totalmente desarrollado), debería ser mayor de $200y_1$, (y_1 es el calado contraído), en sus experiencias aguas abajo de compuertas. Otros investigadores más modernos establecen esta longitud a $50y_1$.

El fenómeno de la capa límite y su efecto lubricante consigue que para las mismas condiciones, correspondiente al flujo no desarrollado posea menores pérdidas de energía que el totalmente desarrollado.

Con este criterio, y apoyándonos en el parecido de nuestros datos al ajuste de autores que aseguran haber conseguido resaltos hidráulicos con flujos totalmente desarrollados, conseguimos distinguir el desplazamiento necesario para que el flujo sea totalmente desarrollado. Para tal efecto nos apoyamos en la relación y^2/y_1 frente al F_1 y en las relaciones propuestas por Rajaratnam, (1965), Leutheusser & Kartha (1972) y en la relación teórica de calados conjugados de Bélanguer.

Para nuestras experiencias afirmamos que el flujo totalmente desarrollado se alcanza en desplazamientos superiores 28 cm, es decir, distancias $30y_1$ para flujos aguas abajo de un aliviadero.

6.4. Relación entre calados inicial y final

Seleccionando la zona de un resalto libre en un canal horizontal como un volumen de control, la Ec. (6.2) se puede derivar de la ecuación de momentum (6.1), que es aplicada en la dirección-x, junto con una ecuación de continuidad bajo las siguientes suposiciones:

- 1) el resalto se forma sobre un fondo horizontal de gran anchura,
- 2) la turbulencia es insignificante al comienzo del resalto,
- 3) las tensiones viscosa y turbulenta son insignificantes sobre la superficie libre

$$\int_S \bar{V}(n_0 \cdot \bar{V}) dS = \int_S n_1 \bar{p} dS - \left[\int_S \mu \frac{\partial \bar{V}}{\partial n_1} dS + \rho \int_S \overline{V'(n_0 \cdot V')} dS \right] \quad (6.1)$$

Donde $\bar{V} = \bar{u}i + \bar{v}j$ (velocidad media temporal), $V' = u'i + v'j + w'k$ (velocidad turbulenta fluctuante), p : intensidad de presión media temporal, S : superficie de control, n_0 : vector unitario normal hacia fuera de dS , n_1 : vector unitario normal hacia dentro de dS .

$$\begin{aligned} \rho Q(\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1) = \\ = \lambda_1 \gamma (h_g A)_1 - \lambda_2 \gamma (h_g A)_2 - \int_0^{L_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho(-\overline{u'v'}) \right)_{y=0} dx - \int_0^{y_2} (\rho \overline{u'^2})_{x=L_j} dy \end{aligned} \quad (6.2)$$

donde:

ρ : densidad del agua

A : área de la sección

y : coordenada vertical dirigida hacia arriba empezando desde el fondo del canal.

Q : caudal unitario ($q = Q/B$).

$$\beta = \int_A (\bar{u}/v)^2 dA/A$$

$$\lambda' = 1 + \left(\frac{1}{h_g A} \right) \int_A \left(\frac{\Delta p}{\gamma} \right) dA$$

h_g Profundidad al centro de gravedad de la sección (en la sección rectangular, $h_g = y/2$)

γ : peso específico del agua ($\gamma = \rho \cdot g$)

(Δp : indica la desviación de la presión hidrostática)

En forma adimensional, la Ec. (6.1) se puede expresar como:

$$\lambda'^2 \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 + [2(\gamma_2 - \beta_1)F_1^2 + S_f - \lambda'^1] \left(\frac{y_2}{y_1}\right) + 2\beta_2 F_1^2 = 0 \quad (6.3)$$

donde:

$$S_f = \frac{P_f}{\gamma \frac{y_1^2}{2}}$$

($P_f = \int_0^{L_j} \tau_0 dx$; donde τ_0 es la tensión de corte en el contorno:

$$\tau_0 = \left[\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho(-\overline{u'v'}) \right]_{y=0}$$

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}$$

$$\gamma_2 = \int_0^{y_2} \frac{u'^2 dy}{v_1^2 y_1}$$

La Ec. (6.2) se puede expresar también como:

$$F_1^2 = \frac{(y_2/y_1)[\lambda_2'(y_2/y_1)^2 + S_f - \lambda_1']}{2[(1+\Delta\beta_1 - \gamma_2)(y_2/y_1) - (1+\Delta\beta_1)]} \quad (6.4)$$

donde:

$$\beta_1 = 1 + \Delta\beta_1$$

$$\beta_1 = 1 + \Delta\beta_2$$

Cuando $\lambda_1' = \lambda_2' = 1$, $S_f = 0$, $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_2 = 0$ y $\gamma_2 = 0$, la Ec. (6.4) se puede reducir a la común relación de profundidad secante o ecuación de los calados conjugados de Bélanger, Ec. (6.5):

$$\frac{y_2}{y_1} = (\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1)/2 \quad (6.5)$$

Harleman (1958) encontró que los errores debidos a la uniformidad asumida del flujo ($\beta_1 = \beta_2 = 1$) y a no tener en cuenta la turbulencia al comienzo y al final del resalto ($\gamma_1 = \gamma_2 = 0$) son muy pequeños y tienden a cancelarse unos a otros, y que la tensión de corte del fondo integrada S_f es el único término adicional importante a considerar:

Por esta razón, $\lambda'_1 = \lambda'_2 = 1$, $\beta_1 = \beta_2 = 1$ y $\gamma_2 = 0$ y le Ec.(6.3) se deduce la Ec.(6.6):

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right) - [2F_1^2 + 1 - S_f](y_2/y_1) + 2F_1^2 = 0 \quad (6.6)$$

Desde la Ec. (6.6) se puede observar que a mayores valores de S_f y para un valor de F_1 dado, la relación y_2/y_1 , tiende a ser más pequeña.

Rajaratnam (1965), demostró que los datos obtenidos para diversos experimentos y de diversa procedencia, mostraban mejor concordancia con la Ec. (6.6) que con la Ec. (6.5). De acuerdo con esto, en un supuesto Caso “a” referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo potencial, justo debajo de la compuerta, el valor experimental de y_2/y_1 para un F_1 dado era algo más pequeño que el valor de y_2/y_1 dado por la Ec. (6.5); pero en un supuesto Caso “b” referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo totalmente desarrollado, se asumía que el valor experimental podía coincidir con el valor de y_2/y_1 derivado de la Ec. (6.5). Esto se explicaba por la suposición de que en el Caso “a”, los efectos de S_f podrían ser grandes dado que la capa límite no se separa del fondo del canal, mientras que en el Caso “b”, $S_f \approx 0$, porque la capa límite podría estar separada del fondo del canal (flujo totalmente desarrollado).

Ohtsu et al. (1990) también encuentran diferencias entre las éstas relaciones de los calados conjugados para los casos “a” y “b”, pero consideran que las diferencias son pequeñas y sugieren que para propósito de diseño práctico, se aplique indistintamente la ecuación de Bélanger, a los resaltos con flujo totalmente desarrollado y parcialmente desarrollado.

Sin embargo en nuestros ensayos, sí encontramos una diferencia con lo expresado por Rajaratman (1965). Para flujos no desarrollados o parcialmente desarrollados, obtenemos valores de y_2/y_1 mayores que para flujos totalmente desarrollados.

Leutheusser y Kartha (1972) llevaron a cabo un estudio semiempírico de resaltos hidráulicos aguas abajo de compuertas. Sus ensayos corresponden a flujos totalmente desarrollados. Propusieron la siguiente relación de calados conjugados:

$$F_1^2 = \frac{\frac{y_2}{y_1} \left[\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 - 1 \right]}{2.06 \left[\frac{y_2}{y_1} - 1 \right] - 0.0244 \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2} \quad (6.7)$$

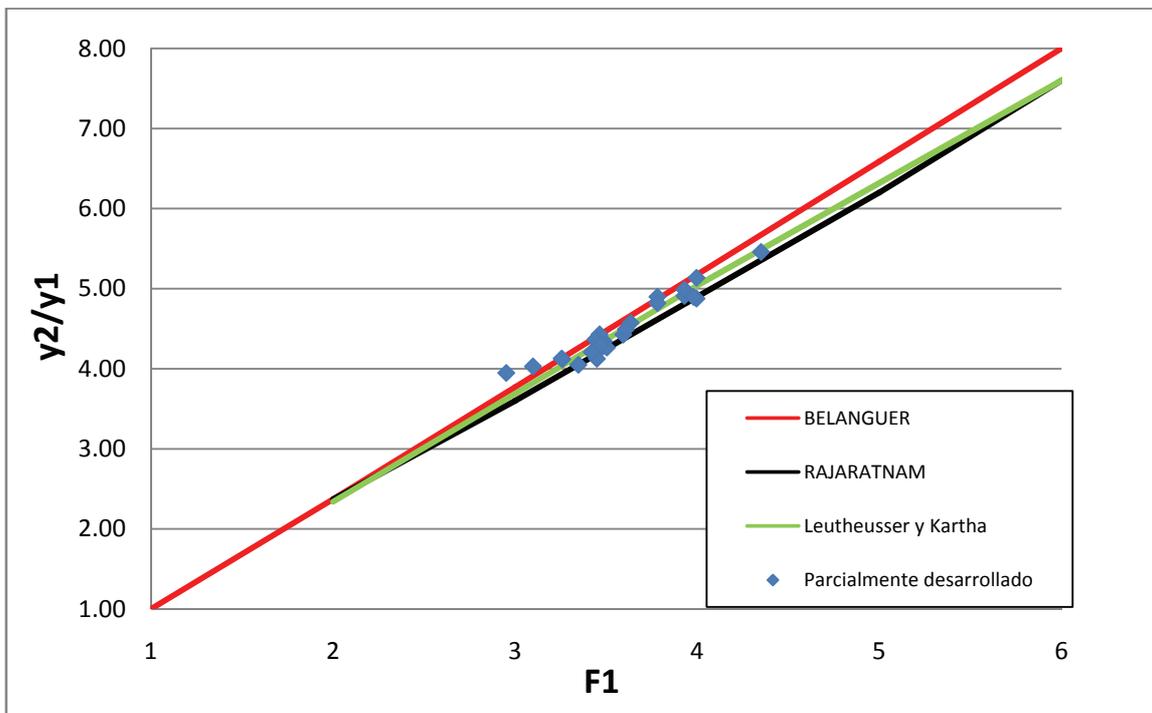


Figura 6.4. Relación y_2/y_1 para F_1 en flujo parcialmente desarrollado.

Obsérvese en la figura anterior cómo los ensayos muestran una mejor tendencia a la ecuación teórica de Bélanguer. Dada la similitud con las relaciones ya descritas y el pequeño rango de Froude que abarca nuestro trabajo, nos abstenemos de obtener una

relación de calados conjugados para flujo potencial, concluyendo que para este caso la formulación más aproximada es la ecuación de Bélanguer.

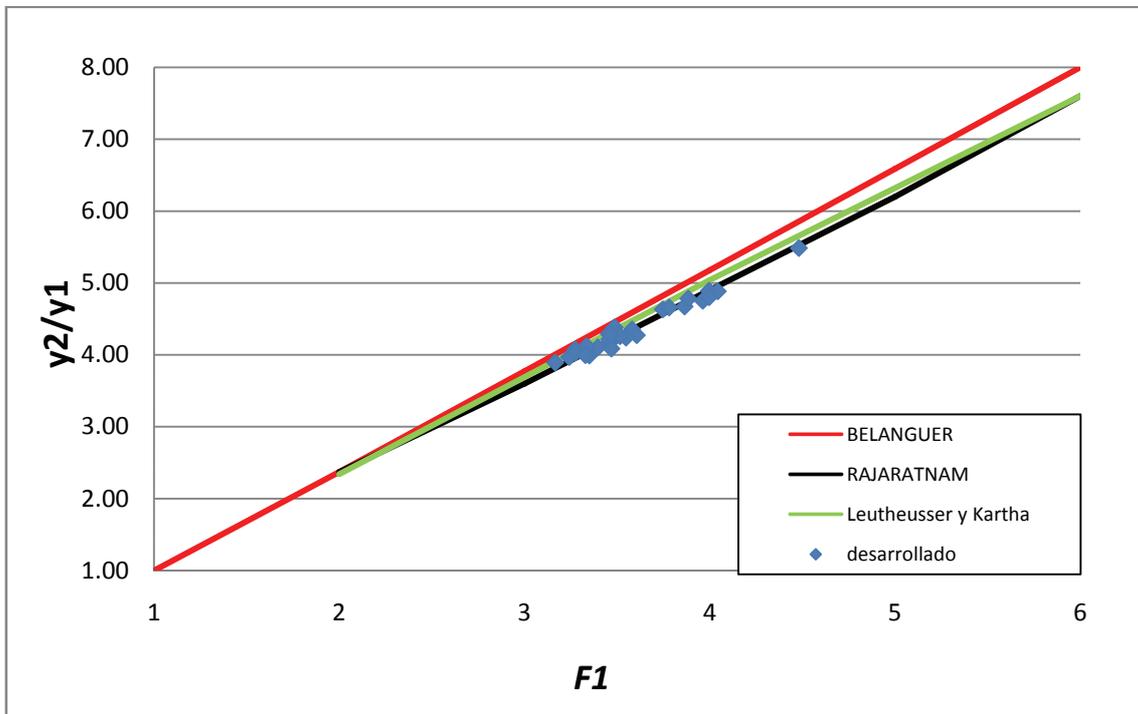


Figura 6.5. Relación y_2/y_1 para F_1 , en flujo totalmente desarrollado.

De la figura anterior concluimos también que la relación de calados para flujo totalmente desarrollado muestra un ajuste sistemático con la ecuación de Rajaratman y de Leutheusser y Kartha (1972). Esto es debido a que la fricción del agua con el fondo y paredes del canal ejerce una mayor influencia que las pérdidas ejercidas por la acción del flujo viscoso.

Para los datos bajo los efectos de escala, también se distinguen las tendencias entre desarrollado y parcialmente desarrollado, sólo que estos datos al poseer una pérdidas mayores y además desproporcionadas para el rango de Froude dado $[4,5 < F_1 < 6]$, se muestran descolgados de los ajustes de Bélanguer y Rajaratman.

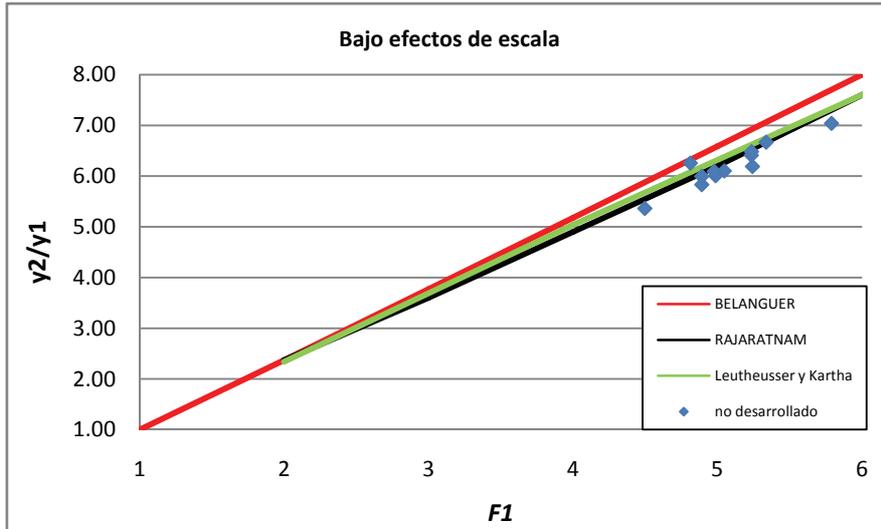


Figura 6.6. Relación de calados bajo efectos de escala y flujo parcialmente desarrollado

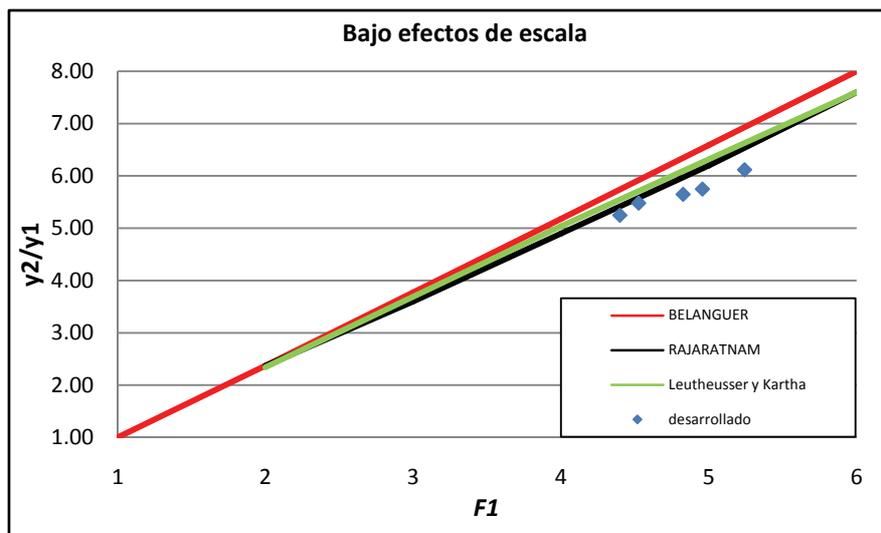


Figura 6.7. Relación de calados bajo efectos de escala y flujo totalmente desarrollado.

6.5. Características de la longitud del resalto

Con respecto a la longitud L de los resaltos libres y sumergidos, se interpreta como la longitud de la zona en la que la disipación de energía se lleva a cabo, pudiendo derivarse la siguiente relación general:

$$f\left(\frac{L}{H_L}; \frac{H_L}{H_0}\right) = 0 \quad (6.8)$$

donde H_L es la pérdida de energía en el resalto, y H_0 es la energía específica total al comienzo del resalto.

Considerando F_1 e y_1 como el número de Froude y el calado al comienzo del resalto y B el ancho del canal, se han establecido diferentes resaltos hidráulicos libres, con el propósito de observar algunas condiciones del flujo y realizar mediciones del perfil y campo de velocidades en este estudio.

Se formaron tres tipos de resaltos hidráulicos. El primero se refiere a un resalto libre justo al pie del aliviadero (R.L.A 0). Ver figura siguiente:

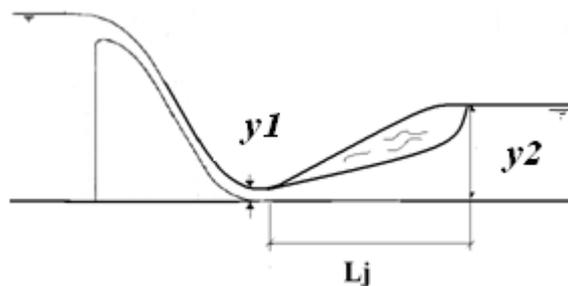


Figura 6.8. Resalto al pie del aliviadero.

El segundo se refiere al inicio de un resalto libre estabilizado a 14 centímetros del aliviadero, bajo condiciones de flujo parcialmente desarrollado (R.L.A 14). Ver figura 6.9.

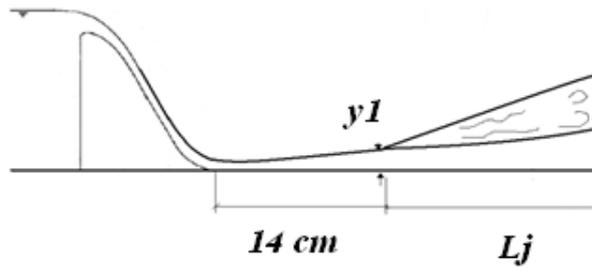


Figura 6.9. Desplazamiento a 14 cm

Y un tercer resalto localizado a 28 cm del pie del aliviadero. (R.L.A. 28).

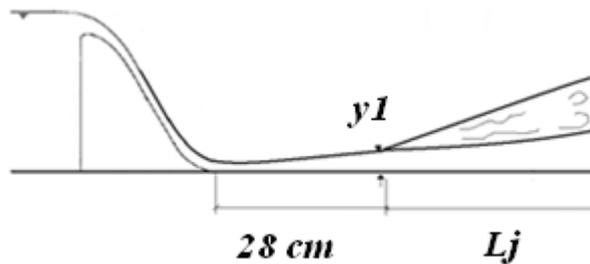


Figura 6.10. Desplazamiento a 28 cm

Desde el comienzo del resalto se producen oscilaciones irregulares en la dirección del canal, dicha posición se define como el comienzo del resalto ($x=0$), donde el final del resalto ($x=L_j$) se determina como la primera sección donde casi no existe una variación de la velocidad máxima del flujo. De acuerdo con esto, L_j es la longitud del resalto, siendo y_2 la profundidad del agua donde $x=L_j$ (Figura 6.11).

Además, se confirma que la sección donde $x=L_j$ es la primera en la que la superficie del agua llega a estar nivelada y ya no se observa una alteración significativa del flujo en la superficie.

Además, la primera sección donde el cambio del perfil de velocidad en el flujo es despreciable se define como $x=L_t$. Así, para $x < L_t$ el perfil de velocidad cambia sustancialmente con x , pero para $x > L_t$ el perfil cambia muy poco en la dirección del flujo.

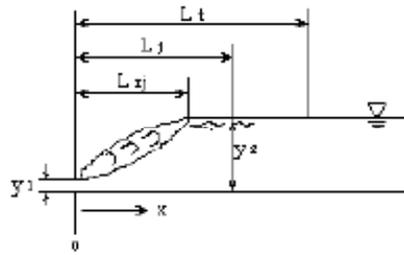


Figura 6.11. Longitudes de resalto

Según estudios experimentales realizados en la Universidad Nihon [Ohtsu et al. (1990)], las relaciones L_{rj}/y_2 , L_j/y_2 , L_t/y_2 medidas en función de F_1 para un resalto libre bajo las condiciones del flujo potencial y, un resalto libre bajo las condiciones del flujo totalmente desarrollado, se indican en la Figura 6.12. Como se puede apreciar los valores de L_{rj}/y_2 , L_j/y_2 , y L_t/y_2 cambian considerablemente en el rango $2,3 < F_1 < 3,5$, pero los valores llegan a ser aproximadamente constantes para $F_1 > 5$ ($L_{rj}/y_2 = 3,7$; $L_j/y_2 = 5,5$ y $L_t/y_2 = 7,6$). En esta figura también se han incluido nuestros resultados experimentales en los resaltos libres establecidos, así como también la ley teórica según el Bureau of Reclamation para resaltos libres, Ec. (6.9):

$$L = 6.1 y_2 \quad \text{para } (6 < F_2 < 11) \tag{6.9}$$

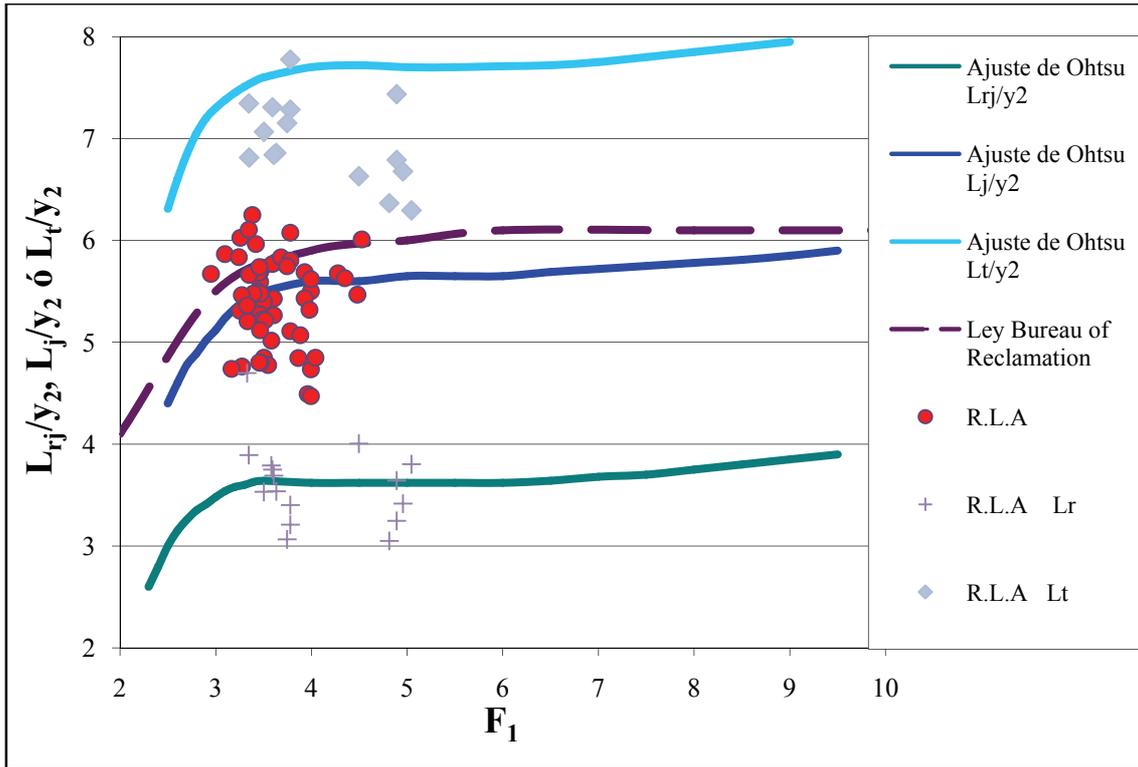


Figura 6.12. Características de longitud de resalto libre.

Se puede observar que los resultados experimentales obtenidos en nuestro trabajo se encuentran en un rango $[2,9 < F_1 < 5,8]$ y la longitud de resalto medido se encuentra entre los valores L_{rj} y L_j establecidos por Ohtsu et al. (1990). Los valores de L_{rj} muestran una nube clara entorno a su propuesta, sin embargo los valores de L_t se muestran descolgados para el ajuste L_t/y_2 .

En la figura 6.13 se representa la relación L_j/y_1 medida en función del número de Froude junto con la Ec. (6.10) propuesta por Silvester (1964):

$$\frac{L_j}{y_1} = 9.75(F_1 - 1)^{1.01} \quad (6.10)$$

Ajuste Márquez (2006):

$$\frac{L_j}{y_1} = 9.8(F_1 - 1)^{0.8} \quad (6.11)$$

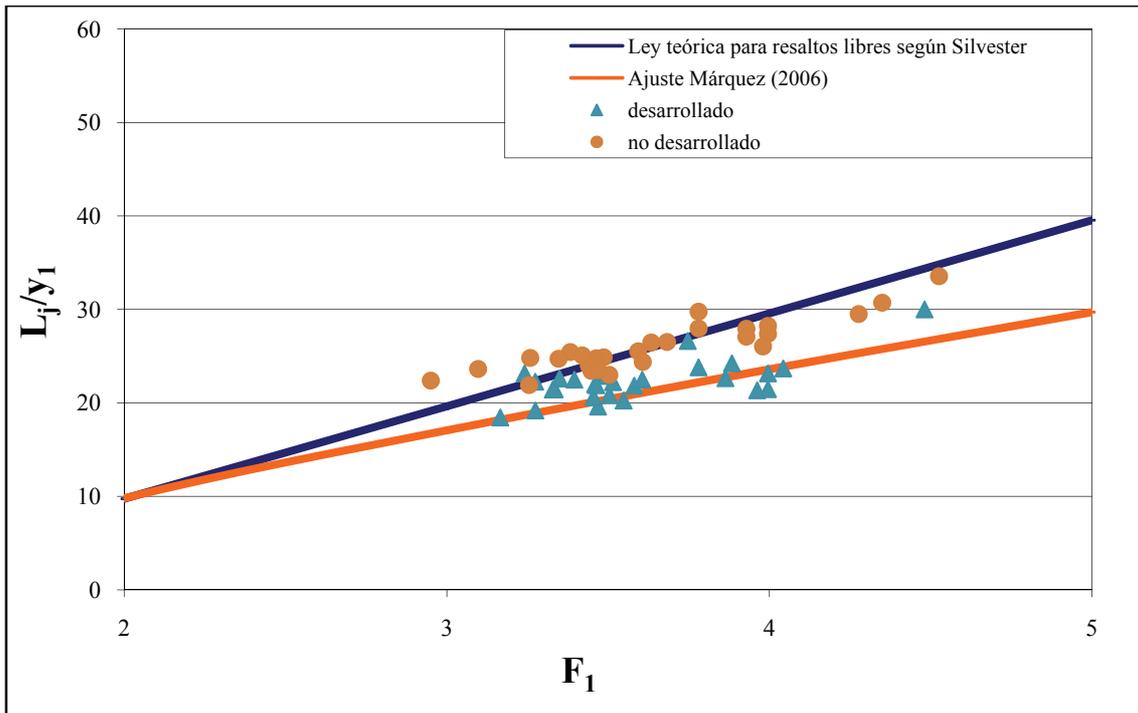


Figura 6.13. Características de la longitud de resalto

Se puede apreciar que para flujo parcialmente desarrollado la longitud de resalto muestra concordancia con la ley propuesta por Silvester. Sin embargo para flujo parcialmente desarrollado la curva de ajuste experimental propuesta por Márquez (2006) es un referente, dado que esta curva fue propuesta a partir de resaltos parcialmente desarrollados aguas abajo de una compuerta.

De esta relación podemos continuar reafirmando el hecho de que para resaltos con flujo totalmente desarrollado, la pérdida de energía es superior a los de parcialmente desarrollado, debido a que la longitud de resalto es un parámetro indicativo de la disipación de energía.

6.6. Caída de velocidad máxima

Los datos experimentales de caída de velocidad máxima u_m en el resalto, analizados en base a la relación (6.12), revelan que u_m decae rápidamente con la longitud L_j tal como se muestra en la Figura 6.14.

$$f\left(\frac{u_m - v_2}{v_1}, \frac{x}{L_j}\right) = 0 \quad (6.12)$$

Ohtsu et al. (1990) ajusta la relación empírica siguiente:

$$(u_m - v_2)/v_1 = (0,0855 - 1,114 \log_{10}(X/L_j)) ; \text{ para } (0,15 \leq x/L_j \leq 1) \text{ y } (3 \leq F1 \leq 9,5) \quad (6.13)$$

donde $v_1 = Q/(B y_1)$ y $v_2 = Q/(B y_2)$, siendo Q el caudal circulante.

De este modo, u_m cambia sustancialmente para $x < L_j$, pero es casi constante para $x \geq L_j$.

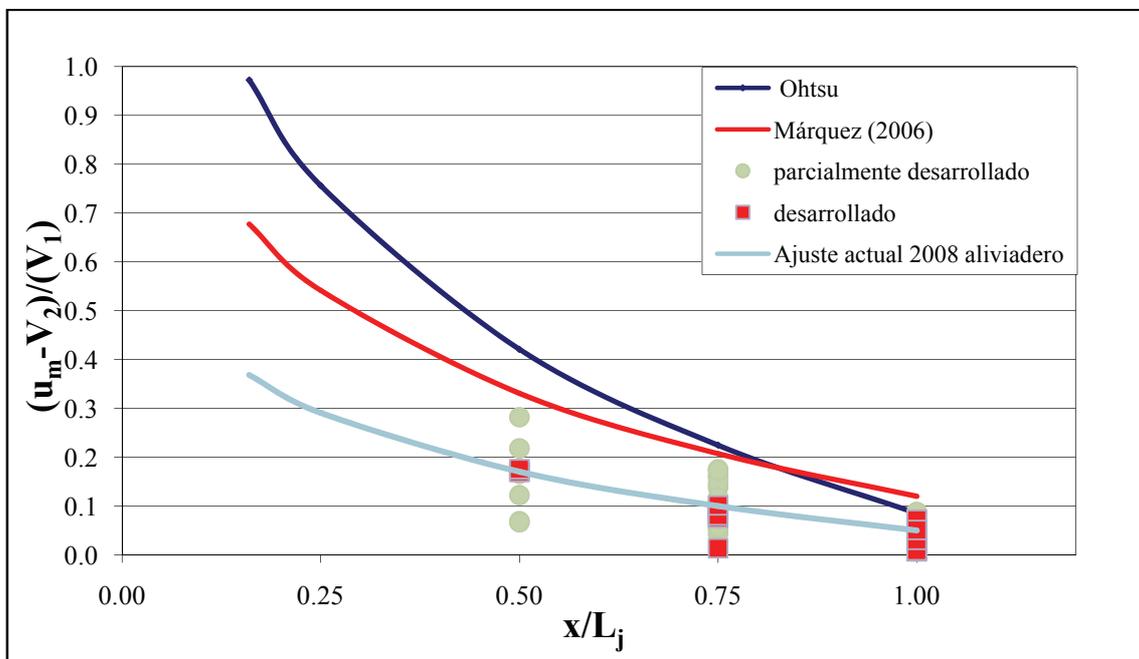


Figura 6.14. Caída de velocidad máxima para resaltos libres.

Obteniéndose una distribución muy irregular en nuestras experiencias y a la vez muy discordantes de las propuestas por Ohtsu y Márquez (2006), proponemos una nueva formulación que se ajusta a nuestros datos.

$$(u_m - v_2)/v_1 = (0,05 - 0,4 \log_{10}(X/L_j)) ; \text{ para } (0,15 \leq x/L_j \leq 1) \quad (6.14)$$

6.7. Perfiles superficiales

Ohtsu analiza los datos experimentales de acuerdo a la relación (6.15), y propone que el perfil superficial del resalto se puede expresar por las Ec. (6.16) y (6.17). (Figura 6.15).

$$(y - y_1)/(y_2 - y_1) = f(x/L_j) \quad (6.15)$$

$$(y - y_1)/(y_2 - y_1) = 1 - (1 - x/L_j)^{2.9} \quad \text{Para } (2,3 < F_1 < 3) \quad (6.16)$$

$$(y - y_1)/(y_2 - y_1) = 1 - (1 - x/L_j)^{1.9} \quad \text{Para } (3,5 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.17)$$

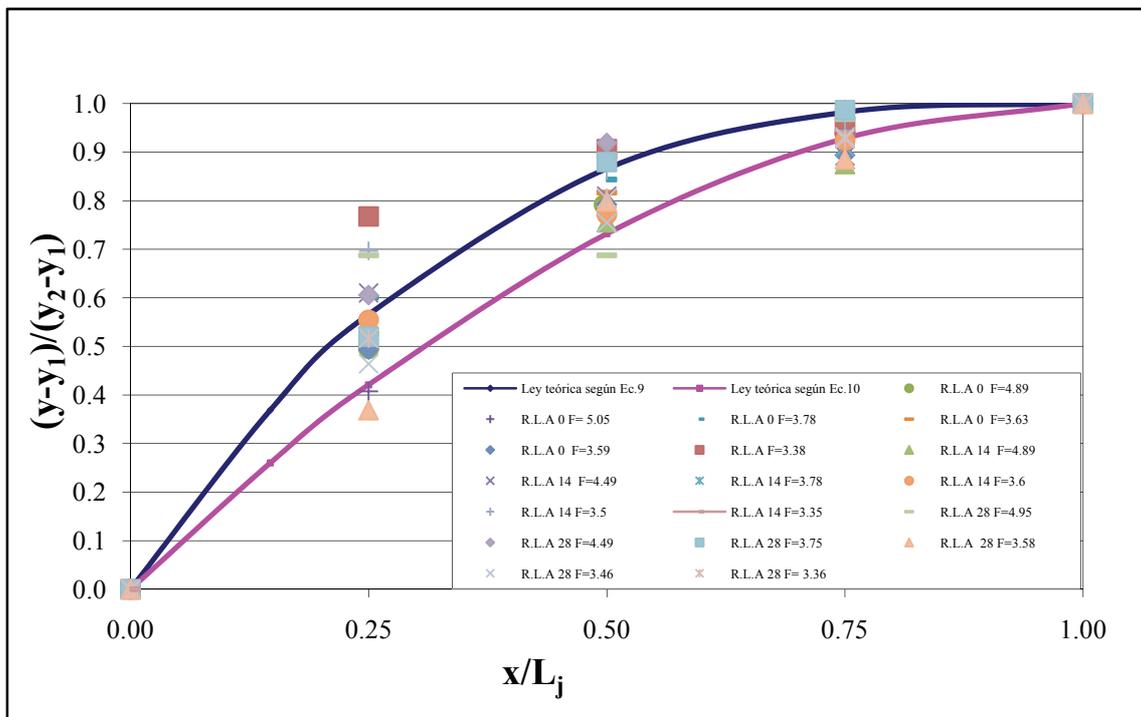


Figura 6.15. Perfiles superficiales.

Para nuestras experiencias en las que se abarca un rango de Froude entre 3,35 y 5,05, obtenemos una distribución de nuestros perfiles en posiciones intermedias a los perfiles según las ecuaciones (6.16) y (6.17), pero en algunos casos el perfil adimensionalizado sobrepasa a los teóricos en la sección 1 es decir a $x/L_j=0,25$, quedando así ciertas dudas

sobre la influencia en la medición del proceso turbulento y oscilatorio en secciones iniciales del resalto.

6.8. Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos

Aplicando la ecuación de la energía del flujo medio para la zona de resalto ($0 \leq x \leq L_j$), se obtiene la Ec. (6.19). En este caso, los términos de tensión viscosa media y los efectos de la tensión de Reynolds en la superficie de control, no se tienen en cuenta:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \lambda_1 y_1 &= \\ &= \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \lambda_2 y_2 + \left[-\frac{1}{\gamma} \int_{(D)} \{ \rho(\overline{u'^2} - \overline{v'^2}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \overline{u'v'} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \} dw \right] \end{aligned} \quad (6.18)$$

donde:

α es el coeficiente de energía o de Coriolis

$dw (= dA \cdot dS)$ es el volumen elemental infinitesimal

$$\lambda = 1 + (1/Qh) \int_{(A)} (\Delta p / \gamma) u dA$$

En las secciones $x=0$ y $x=L_j$, es posible poner $\alpha = 1$ y $\lambda = 1$.

De acuerdo con esto, la Ec. (6.18) puede ser expresada como la Ec. (6.19):

$$\frac{v_1^2}{2g} + y_1 = \frac{v_2^2}{2g} + y_2 + \left[-\frac{1}{\gamma} \int_0^{L_j} \int_0^{y(x)} \{ \rho(\overline{u'^2} - \overline{v'^2}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \overline{u'v'} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \} dy dx \right] \quad (6.19)$$

Si la ecuación de energía para la turbulencia es aplicada a los resaltos, se obtiene la Ec. (6.20). En este caso, los términos de tensión viscosa media, la difusión de energía

turbulenta, los efectos de las fluctuaciones de presión y las tensiones viscosas causadas por la turbulencia en la superficie de control, no se tienen en cuenta comparados con otros factores:

$$Prod.Turb.=Disip.Vis.+Convecc.Turb. \quad (6.20)$$

donde:

Prod.Turb. = [tercer término en el lado de la derecha de la Ec. (6.19)] = Cantidad total de energía transferida desde el flujo medio a la energía turbulenta (producción turbulenta).

Disip.Vis. = Disipación viscosa

Convecc.Turb. = Convección de energía turbulenta (relación en que la energía cinética turbulenta es transmitida)

$$Disip.Vis. = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{q} \int_0^{L_j} \int_0^{y(x)} \mu \overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} dy dx$$

$$Convecc.Turb. = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{q} \int_0^{y_2} \rho \frac{\overline{V'^2}}{2} u dy$$

donde $V'^2 = u'^2 + v'^2 + w'^2$

De la Ec. (6.19) y la Ec. (6.20), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$H_1 = H_2 + (Disip.Vis. + Convecc.Turb.) \quad (6.21)$$

donde:

$$H_1 = \frac{v_1^2}{2g} + y_1$$

$$H_2 = \frac{v_2^2}{2g} + y_2$$

Sin embargo, la Ec. (6.21) puede ser rescrita en la forma de la Ec.(6.22):

$$100(\%) = \left(\frac{Disip.Vis.}{(H_1 - H_2)} + \frac{Ind.Turb.}{(H_1 - H_2)} \right) 100(\%) \quad (6.22)$$

Ohtsu et al. (1990) a partir de las medidas de velocidad media \bar{u} e intensidad turbulenta $\overline{u'^2}$, en las secciones donde $x \geq L_j$, y haciendo uso de la suposición de que $\overline{V'^2} = 2\overline{u'^2}$, obtienen los valores de $(Convecc.Turb.)_x$

	F₁	Convecc.Turb./(H₁-H₂)(%)	Disip.Vis./(H₁-H₂)(%)
Caso a	3,79	5,4	94,6
Caso a	4,05	3,5	96,5
Caso a	5,19	3,0	97,0
Caso a	5,83	2,5	97,5
Caso a	7,12	1,5	98,5
Caso a	8,19	1,0	99,0
Caso b	3,93	4,2	95,8
Caso b	4,29	5,0	95,0

Caso b	4,47	4,7	95,3
Caso b	5,04	1,7	98,3
Caso b	5,68	1,3	98,7

Tabla 1. Valores de Convecc.Turb./(H₁-H₂) y Disip.Vis./(H₁-H₂)

Encuentran que los valores de Disip.Vis./(H₁-H₂) resultan ser muy superiores a los de Convecc.Turb./(H₁-H₂) en la medida en que Disip.Vis./(H₁-H₂) representa entre el 94 y el 99% y convecc.Turb./(H₁-H₂) representa entre el 1 y el 6% en la disipación de la turbulencia. Por esta razón, se puede concluir que Convecc.Turb./(H₁-H₂) es despreciable.

De este modo, se pueden derivar la Ec. (6.23) y Ec. (6.24):

$$H_1 = H_2 + Disip.Vis. \quad (6.23)$$

$$Prod.Turb.=Disip.Vis. \quad (6.24)$$

En otras palabras, cuando $x \leq L_j$, la mayoría de la turbulencia se ha disipado por disipación viscosa (fenómeno de disipación de energía en cascada).

De acuerdo con esto, L_j puede ser interpretado como la longitud de la zona necesaria para que la disipación de energía en el resalto se complete, y la pérdida de energía H_L entre el inicio ($x=0$) y el final ($x=L_j$) del resalto puede ser expresada mediante la siguiente ecuación unidimensional:

$$H_L = H_1 - H_2 = (v_1^2 / 2g + y_1) - (v_2^2 / 2g + y_2) \quad (6.25)$$

Usando la Ec. (6.25) junto con la ecuación de continuidad, la pérdida de energía relativa puede ser expresada con la Ec. (6.26):

$$\frac{H_L}{H_1} = \frac{2(1 - \frac{y_2}{y_1}) + (1 - \frac{1}{(\frac{y_2}{y_1})^2})F_1^2}{2 + F_1^2} \quad (6.26)$$

Analizando la Ec. (6.26) y la Ec. (6.5), la relación entre H_L/H_1 y F_1 se representa en la Figura 6.16.

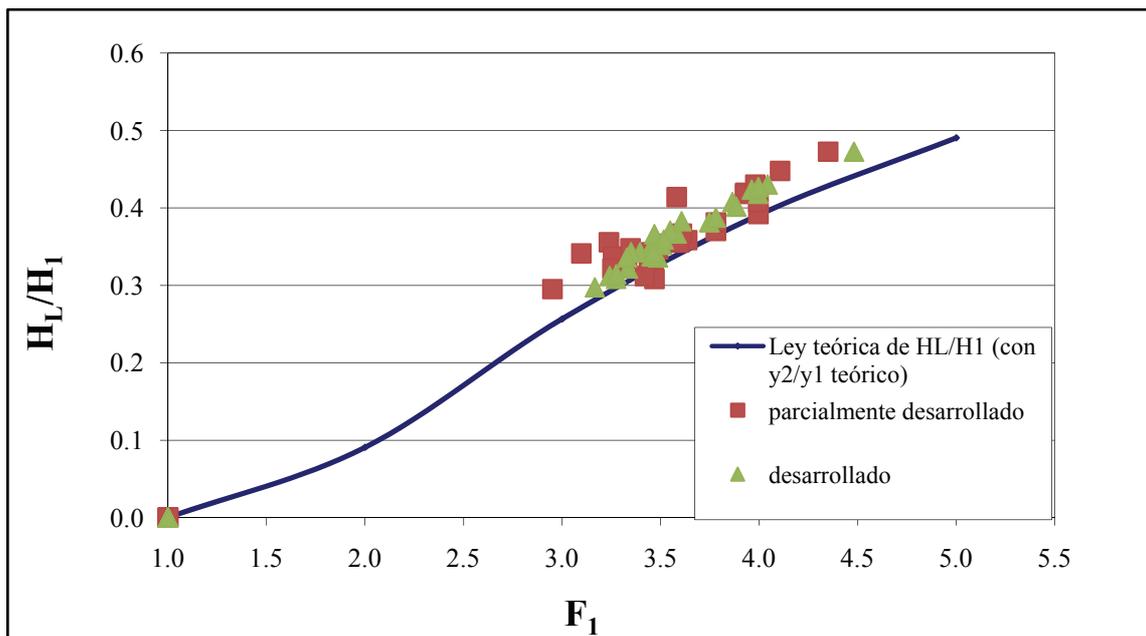


Figura 6.16. Pérdida de energía relativa en resaltos libres.

Analizando la representación de la pérdida de energía relativa en los resaltos libres estudiados, en función de los valores de Froude considerados y la relación correspondiente y_2/y_1 según la Ec. (6.5) (Ecuación de Bélanger de los calados conjugados), junto con la ley teórica propuesta según la Ec. (6.26), se observa que el resultado de la comparación entre los valores teóricos y los experimentales es superior al ajuste teórico. No se aprecia una clara distinción entre los resaltos con flujo parcialmente desarrollado y totalmente desarrollado. Esto se debe a que el proceso turbulento dentro del resalto es independiente en casi su totalidad, de lo que suceda aguas arriba de éste, ya que el flujo en cascada en el interior del resalto anula cualquier efecto del flujo entrante.

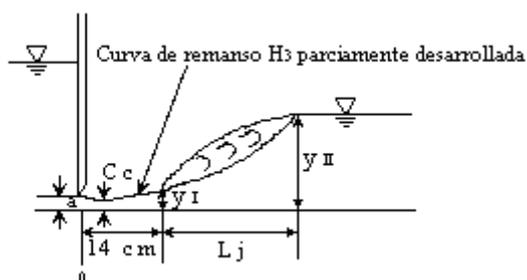


Figura 6.17. Esquema del resalto estabilizado a 14 cm de la estructura de control.

Otra manera de evaluar la disipación de energía en resaltos libres y sumergidos es utilizando la expresión clásica siguiente:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.27)$$

En la Tabla 2 se indica el porcentaje de disipación de energía en el rango de números de Froude considerados.

Resultados Teóricos		
F₁	H₂/H₁	Porcentaje de disipación de energía en velocidades teóricas medias
2,50	0,82	17,52
3,00	0,74	25,67
3,50	0,67	32,90
4,00	0,61	39,14
4,50	0,56	44,48
5,00	0,51	49,06
5,50	0,47	53,00

Tabla 2. Resultados teóricos

Para tratar los resultados experimentales obtenidos en laboratorio se ha calculado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos considerando las velocidades medias.

Se han utilizando las siguientes expresiones para calcular la disipación de energía:

Para tratar los resultados experimentales obtenidos en laboratorio, se ha calculado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos, considerando la velocidad como la obtenida por continuidad en la sección final e inicial del resalto, debido a que el equipo nos imposibilita la medición en todo el calado y poder obtener una velocidad empírica media de la sección.

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right) \times 100 \quad (6.28)$$

$$H_1 = (v_1^2 / 2g + y_1) \quad \text{y} \quad H_2 = (v_2^2 / 2g + y_2)$$

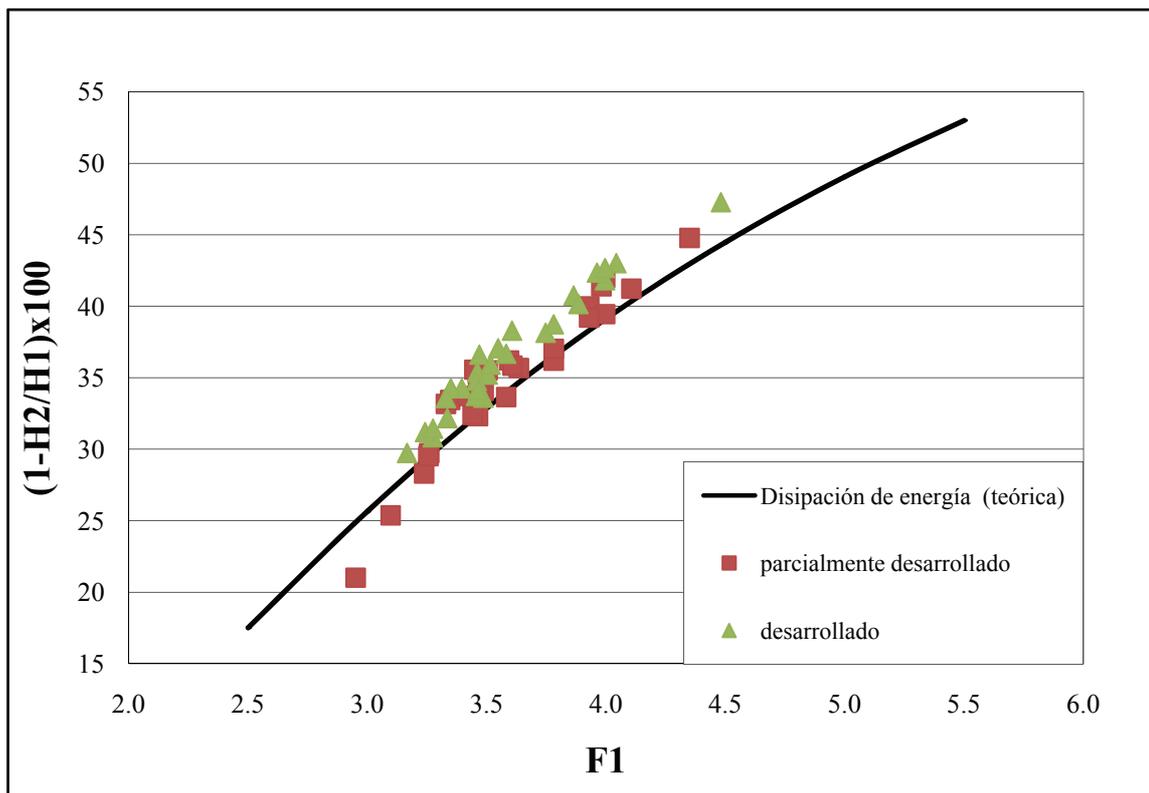


Figura 6.18. Disipación de energía para resaltos libres.

Analizando la figura anterior podemos observar el hecho de que el efecto de la capa límite lubrica el deslizamiento del flujo potencial, y por tanto, se produce una menor pérdida por fricción.

A continuación mostramos el ajuste de la curva de pérdida de energía para los distintos tipos de flujo:

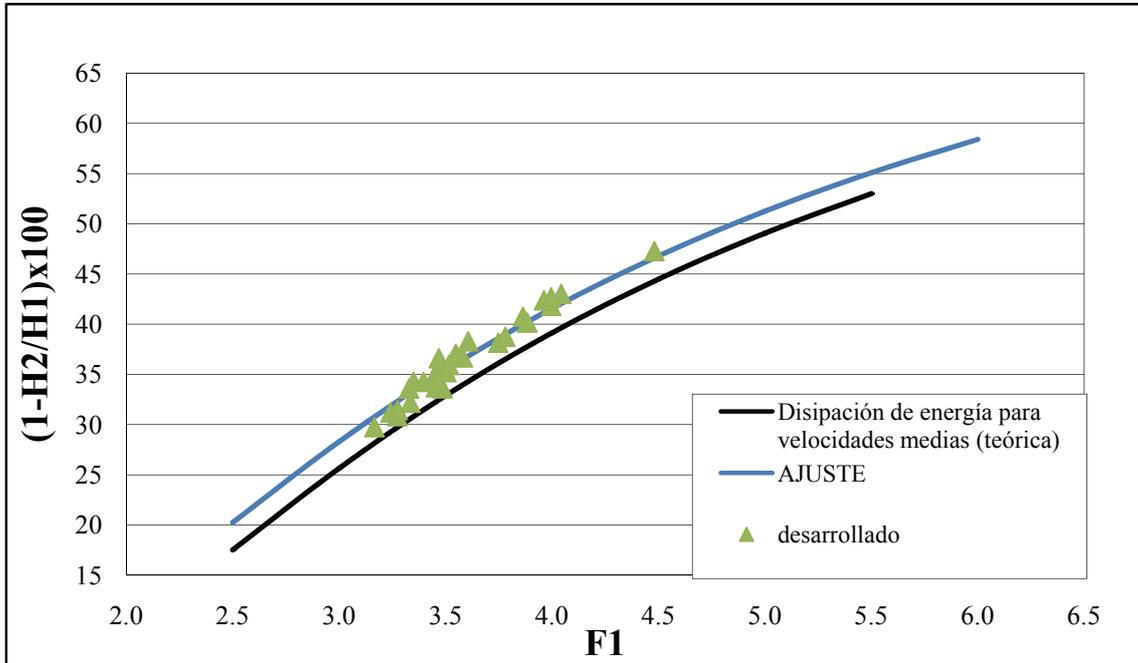


Figura 6.19. Ajuste de la curva de pérdida de energía para flujo desarrollado.

Para flujo totalmente desarrollado:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.492} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.29)$$

El ajuste ha sido obtenido variando el coeficiente 3/2 de la ecuación teórica hasta ajustar a la nube de puntos, aunque algunos datos para Froude de entre 3 y 3,5 se muestran descolgados.

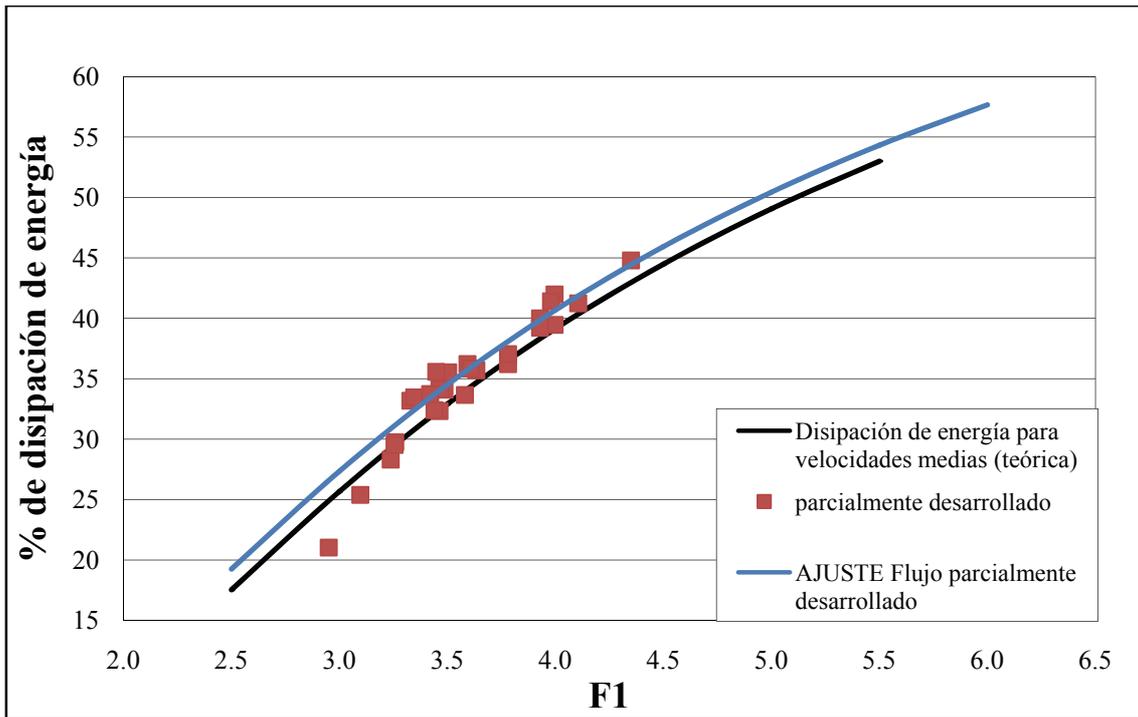


Figura 6.20. Ajuste para flujo parcialmente desarrollado.

Para flujo parcialmente desarrollado el ajuste es el siguiente:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.495} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.30)$$

La diferencia de energía entre flujo desarrollado y parcialmente desarrollado ha sido obtenida a partir de las ecuaciones (6.29) y (6.30). Restando ambas ecuaciones obtenemos en función del Froude que la disipación de energía entre los flujos disminuye conforme aumenta el Froude.

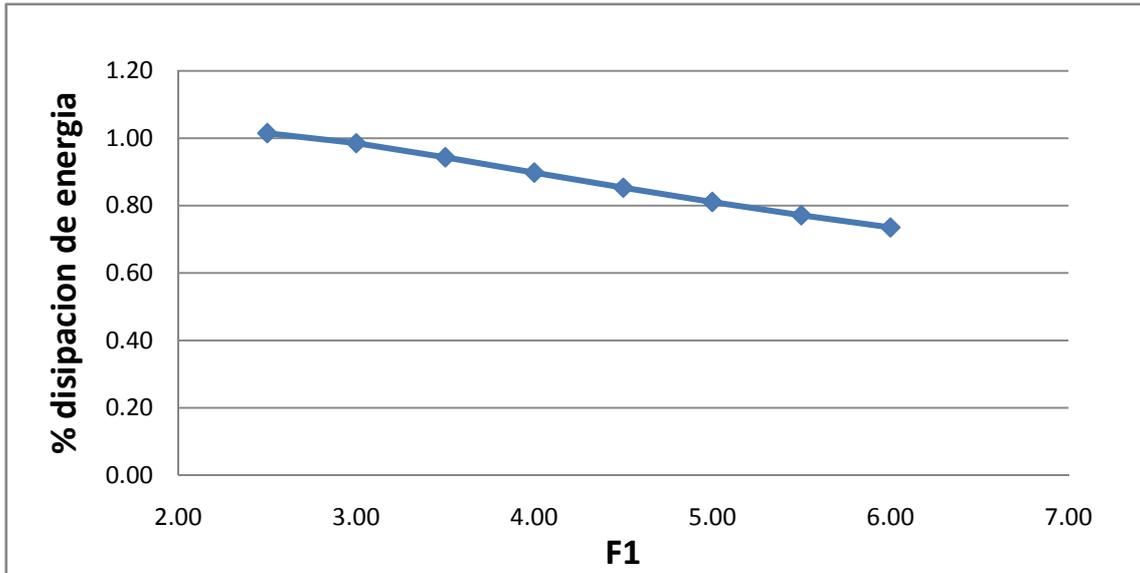


Figura 6.21. Diferencia de disipación de energía entre flujos totalmente y parcialmente desarrollado.

Otro análisis interesante es la pérdida de energía con respecto del desplazamiento desde la estructura de control. Para el estudio de esta pérdida se ha procedido de similar forma que para el análisis de los tipos de flujos anteriormente descritos.

En un primer paso y a partir de la curva de pérdida de energía, obtenemos los ajustes de la pérdida para cada desplazamiento y comparamos estos ajustes con la pérdida producida para las mismas en resaltos al pie del aliviadero, de manera que estos no están influenciados por la acción de la curva de remanso H_3 parcialmente desarrollada.

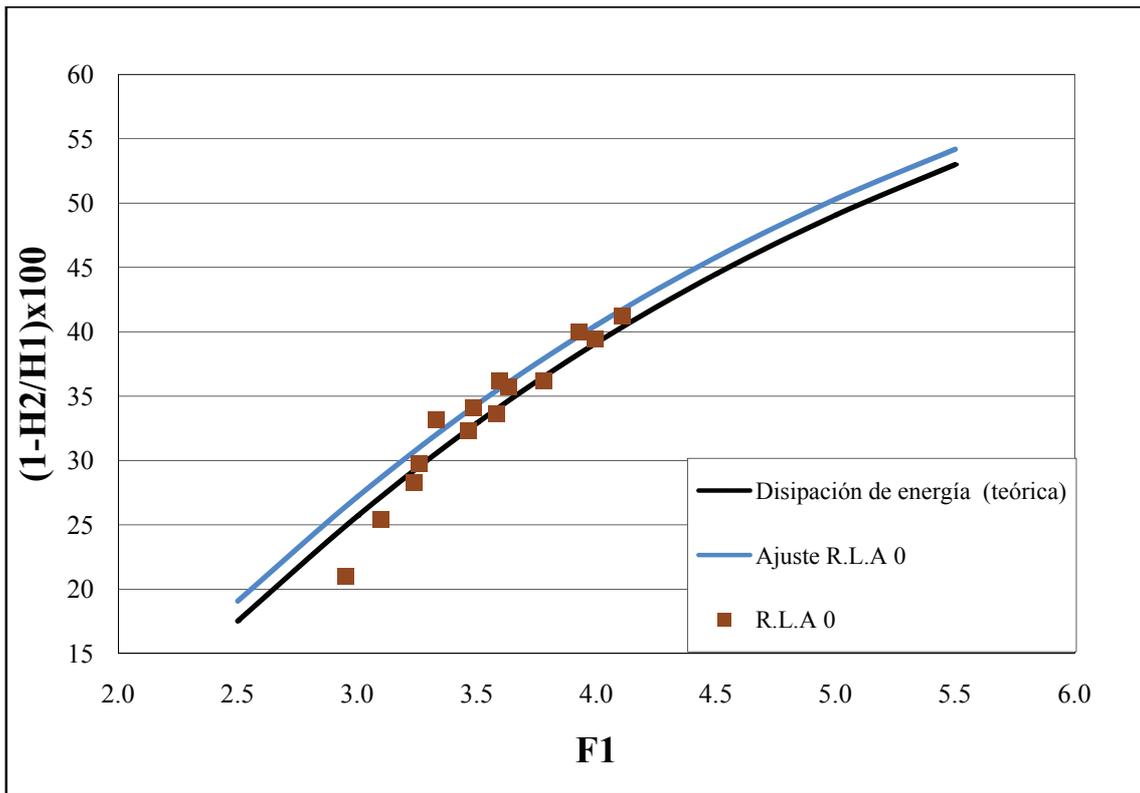


Figura 6.22. Ajuste para resaltos estabilizados al pie del aliviadero.

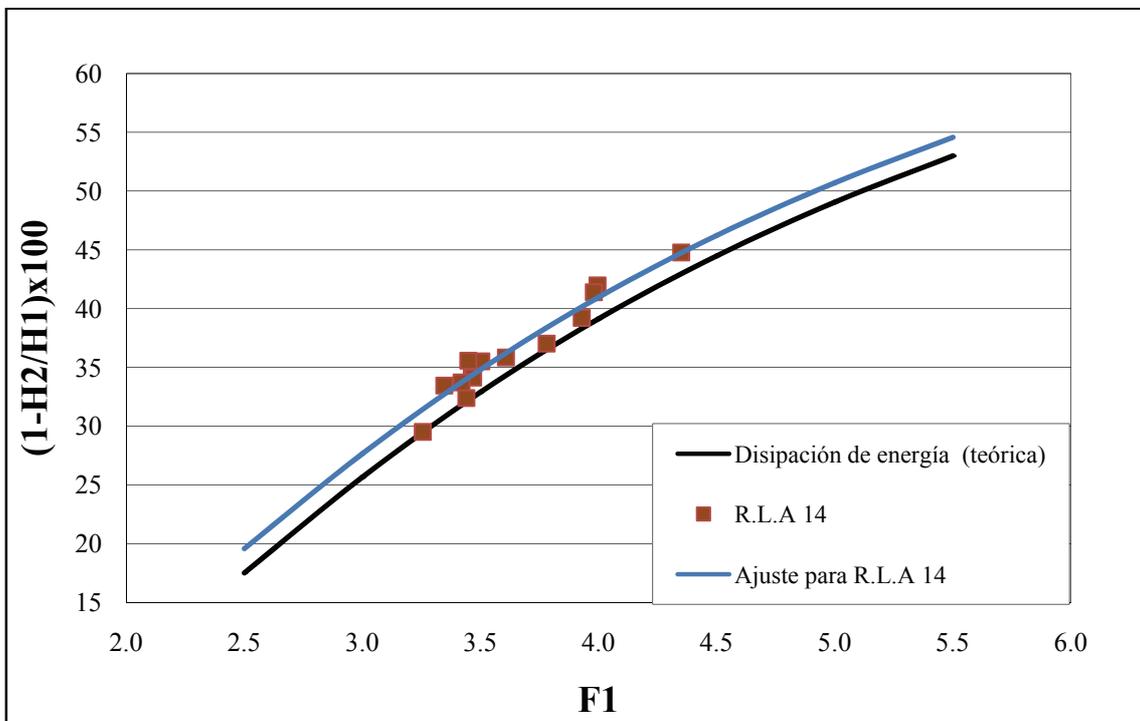


Figura 6.23. Ajuste para resaltos estabilizados a 14 cm

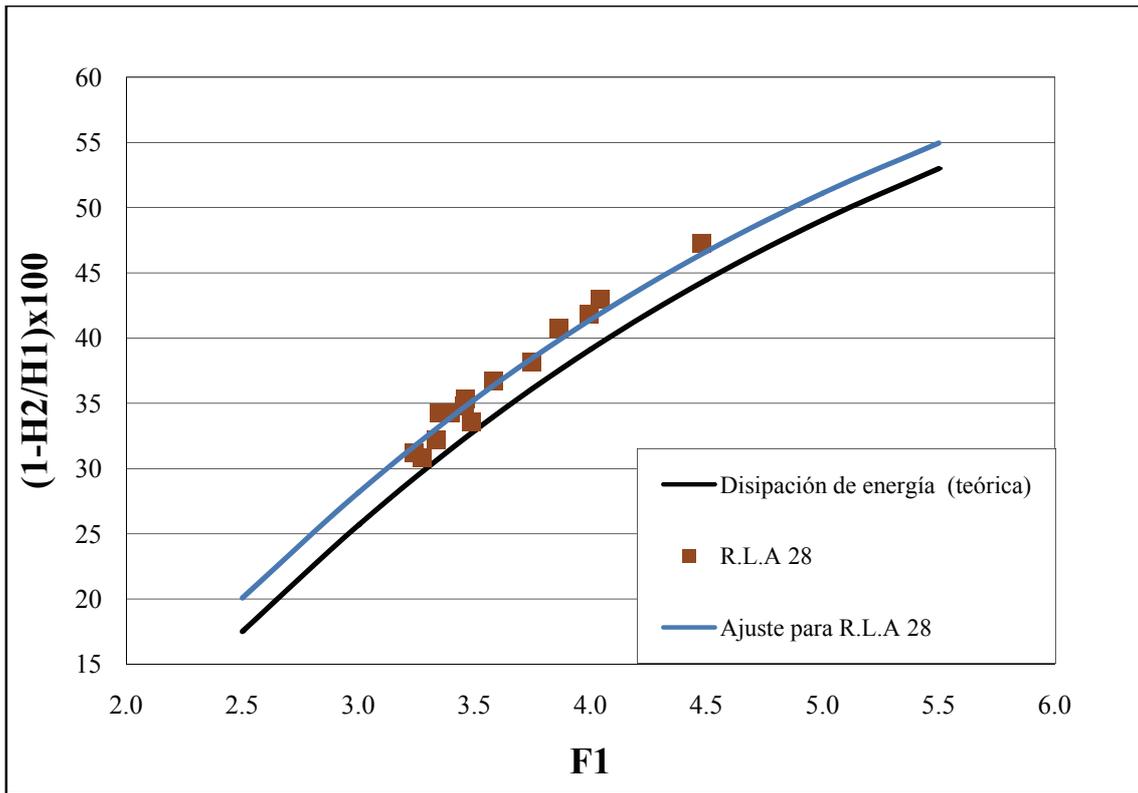


Figura 6.24. Ajuste para resaltos estabilizados a 28 cm

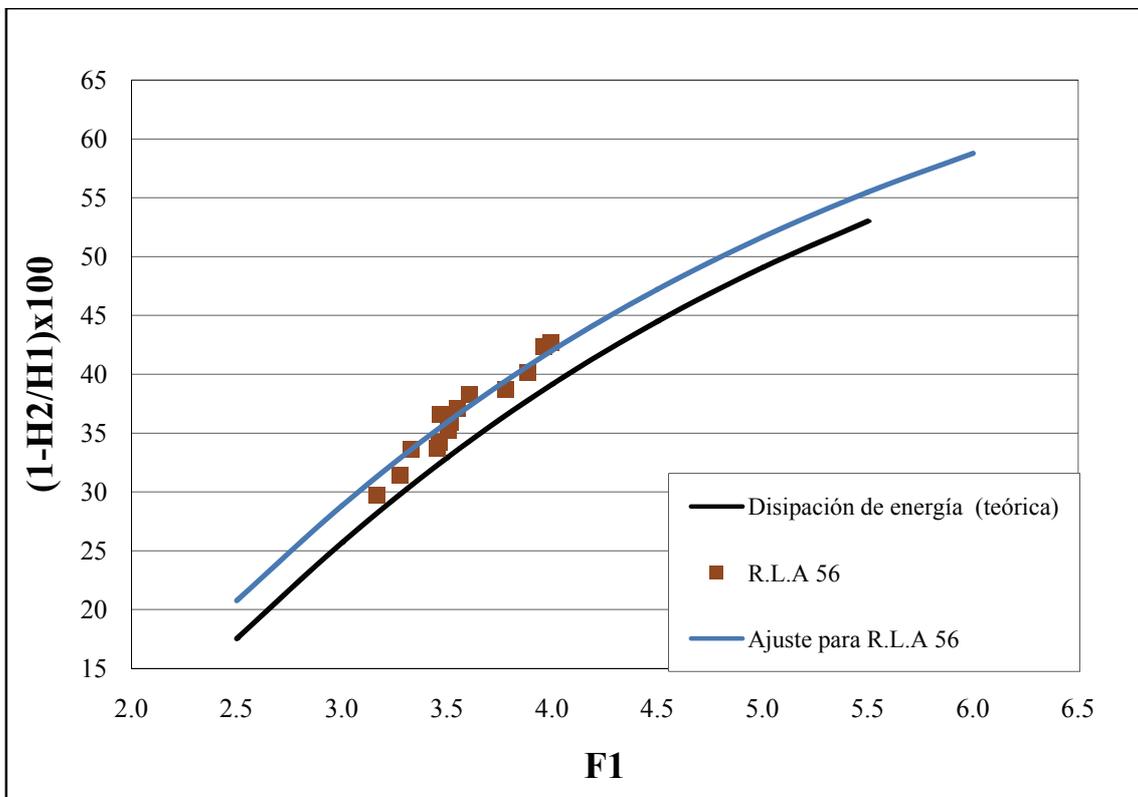


Figura 6.25. Ajuste para resaltos estabilizados a 56 cm

Obteniendo para cada uno de estos casos los siguientes ajustes:

Para resaltos al pie del aliviadero:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.4955} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.31)$$

Para resaltos estabilizados a 14 cm del aliviadero:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.494} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.32)$$

Para resaltos estabilizados a 28 cm:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.4925} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.33)$$

Para resaltos estabilizados a 56 cm:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.4905} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.34)$$

Obteniendo la diferencia entre la curva ajustada para cada desplazamiento con la curva para resaltos al pie, graficamos la Figura 6.26 donde se puede apreciar que la pérdida de energía, lógicamente, es mayor cuanto mayor es la distancia a la que se localiza el resalto desde la estructura de control.

Otra tendencia apreciable y ya comentada es que la pérdida de energía disminuye sistemáticamente conforme aumenta el número de Froude.

Siendo $[(1 - \frac{H_2}{H_1}) \times 100]_n$ la pérdida de energía para los desplazamientos 14, 28 y 56 cm (n= 14, 28 y 56)

y

$[(1 - \frac{H_2}{H_1}) \times 100]_0$ la pérdida para los resaltos al pie del aliviadero.

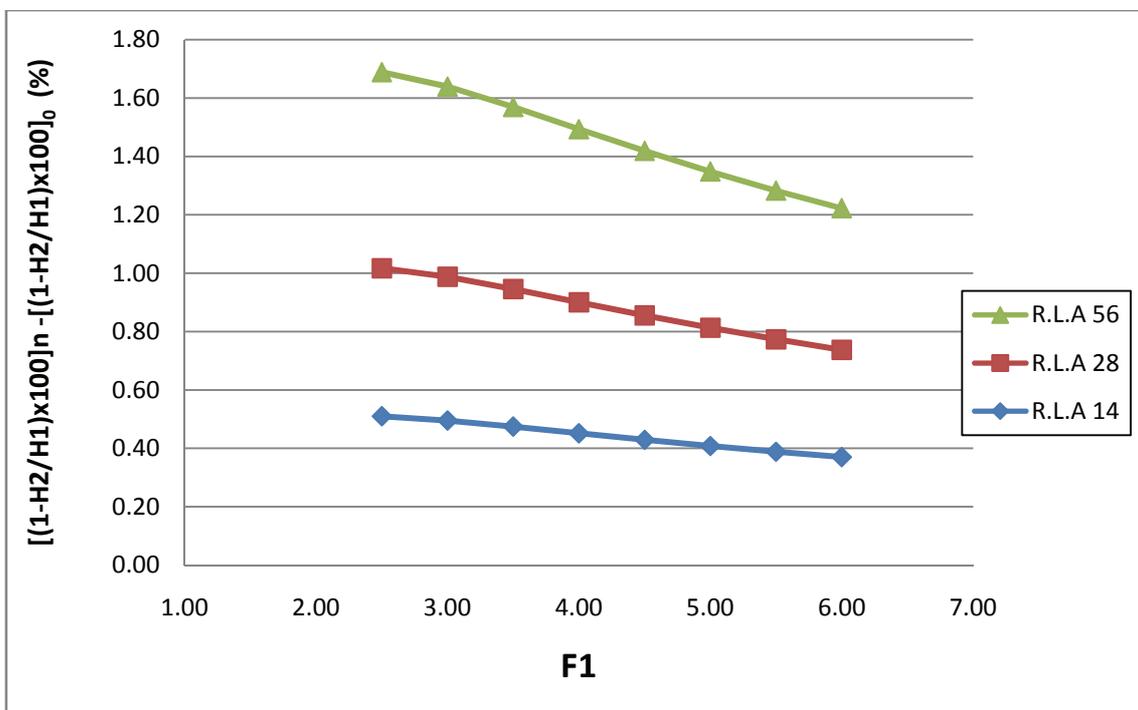


Figura 6.26. Disipación de energía por efecto de la curva de remanso.

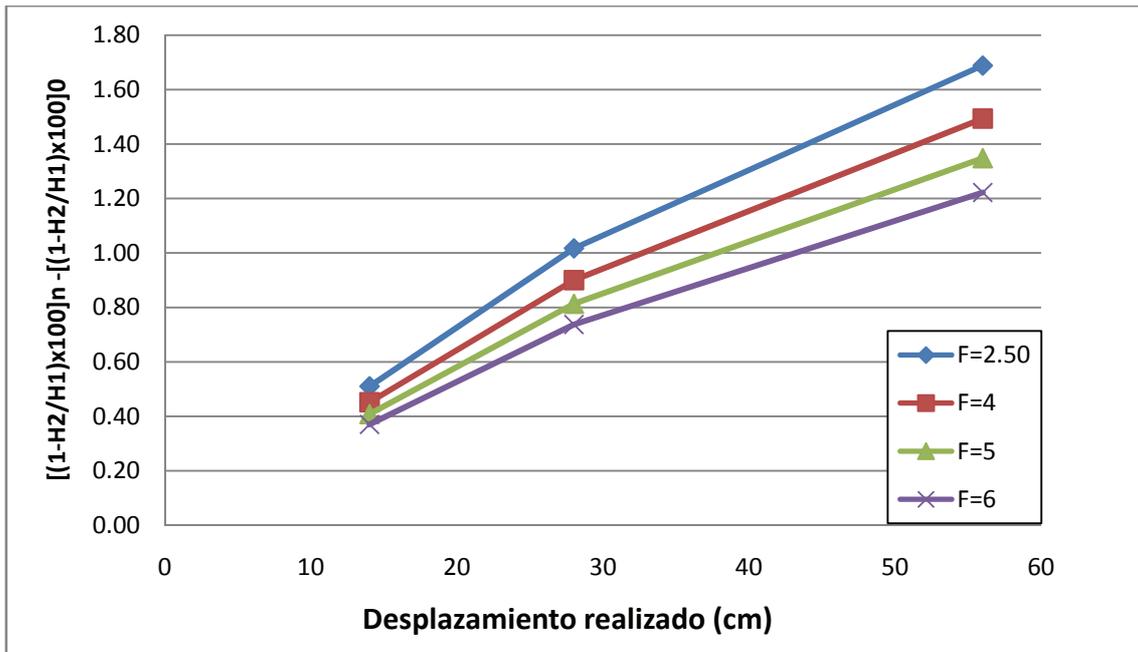


Figura 6.27. Disipación de energía por efecto de la curva de remanso frente al desplazamiento.

Por último se ha evaluado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos debida únicamente a la reducción de velocidades máximas entre la sección inicial del resalto ($x=0$) y la sección final del mismo donde $x=L_j$. Se han utilizado las siguientes expresiones:

% reducción de velocidad máxima experimental: $(1 - \frac{v_2}{v_1}) \times 100$

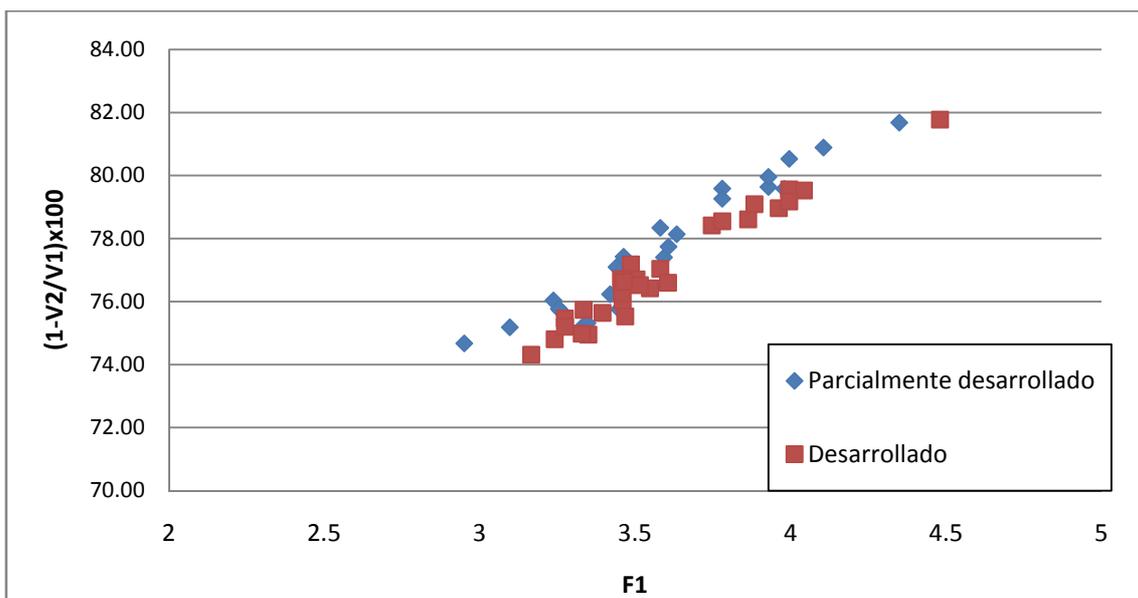


Figura 6.28. Reducción de velocidades máximas.

Debido a que el flujo parcialmente desarrollado llega al inicio del resalto con más energía, traducida ésta en velocidad para la figura anterior, y también debido a que el resalto actúa como un filtro para el fenómeno de la capa límite, la reducción de la velocidad para flujo parcialmente desarrollado es mayor que para flujo totalmente desarrollado.

6.8.1. Efectos de escala

También es importante el estudio de los efectos de escala desde un punto de vista energético. Con esta idea se ha procedido a analizar los datos con Reynolds por debajo de 18000 y así establecer un orden de magnitud la influencia de este fenómeno, sobre las experiencias de nuestro trabajo. De igual forma se ha procedido para los datos sin efectos de escala.

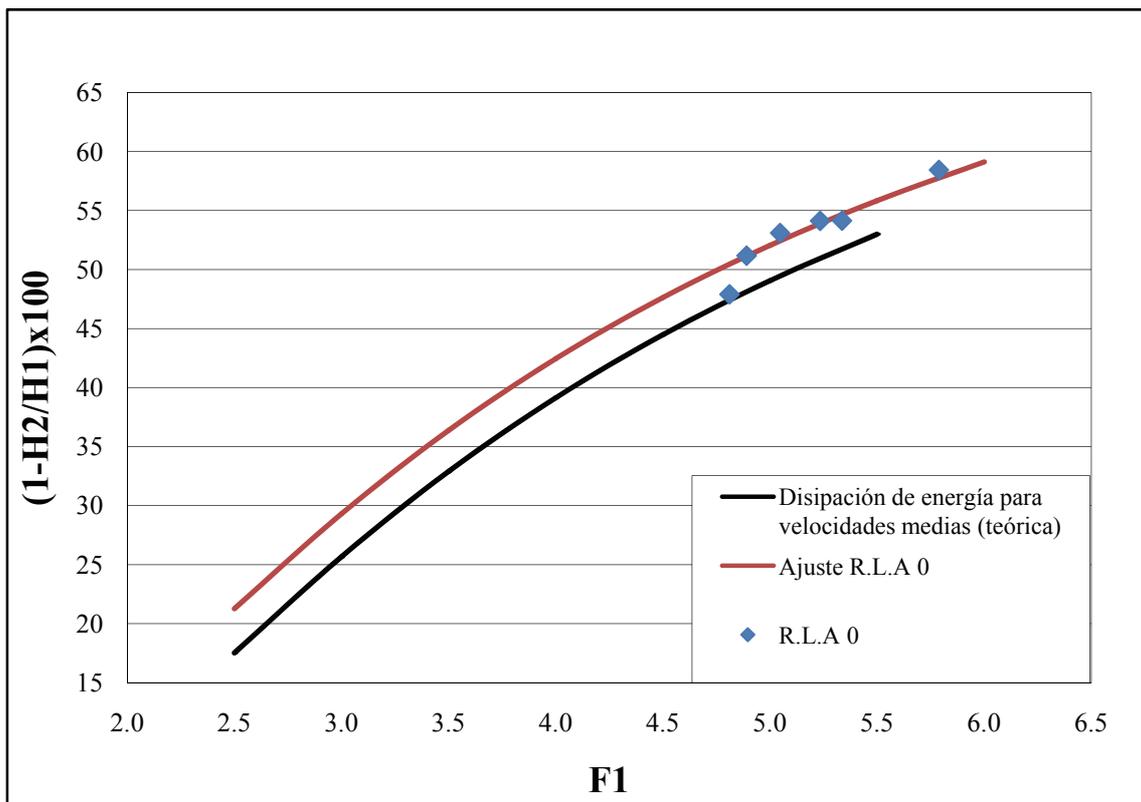


Figura 6.29. Ajuste para resaltos estabilizados al pie y bajo efectos de escala.

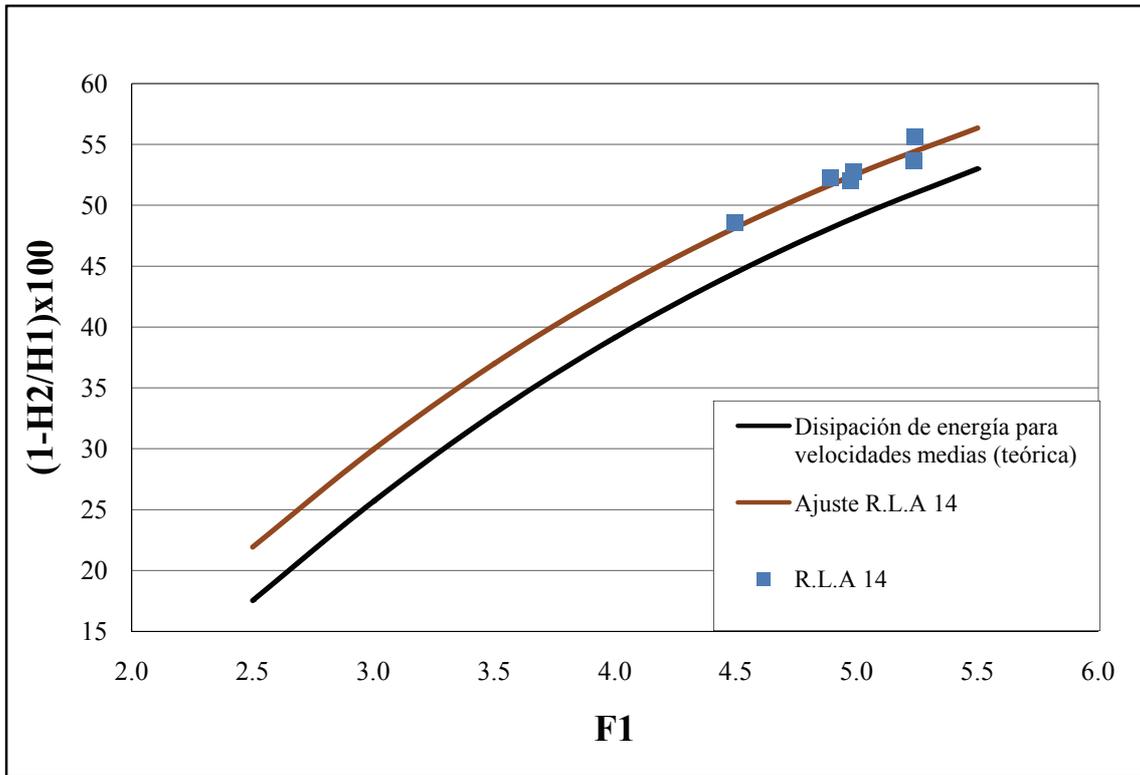


Figura 6.30.ajuste para resaltos estabilizados a 14 cm y bajo efectos de escala.

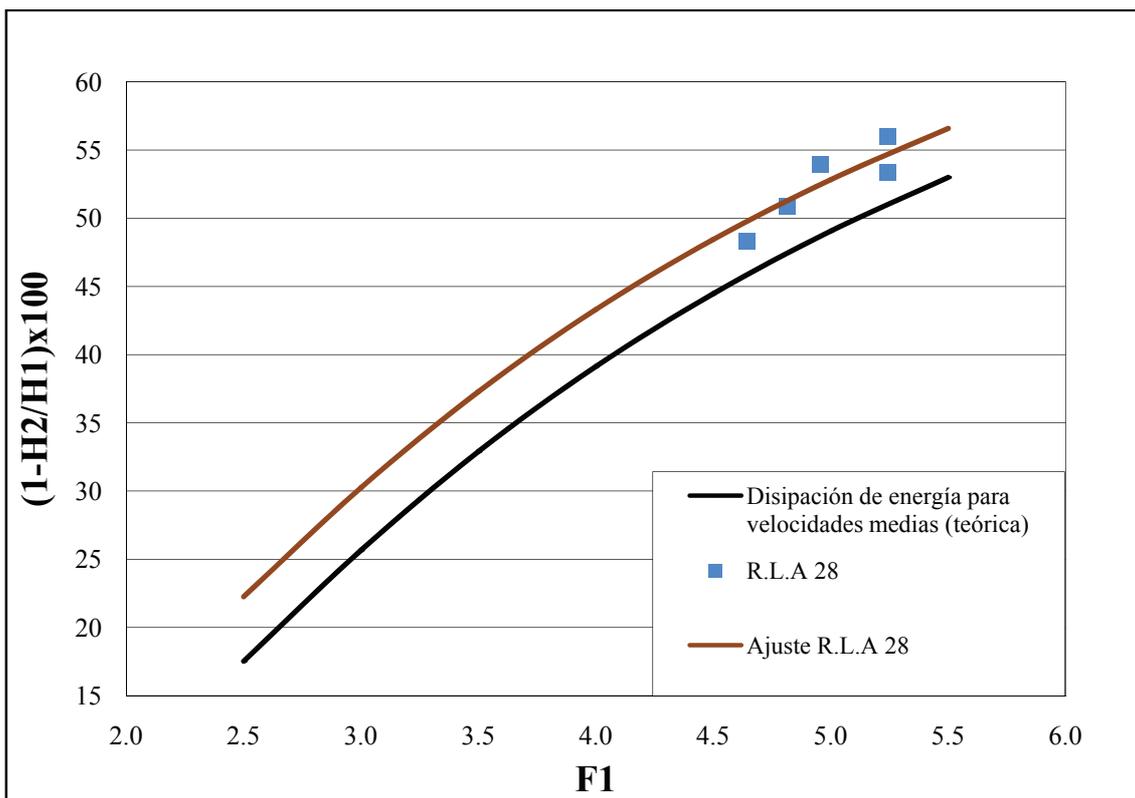


Figura 6.31. Ajuste para resaltos estabilizados a 28 cm y bajo efectos de escala.

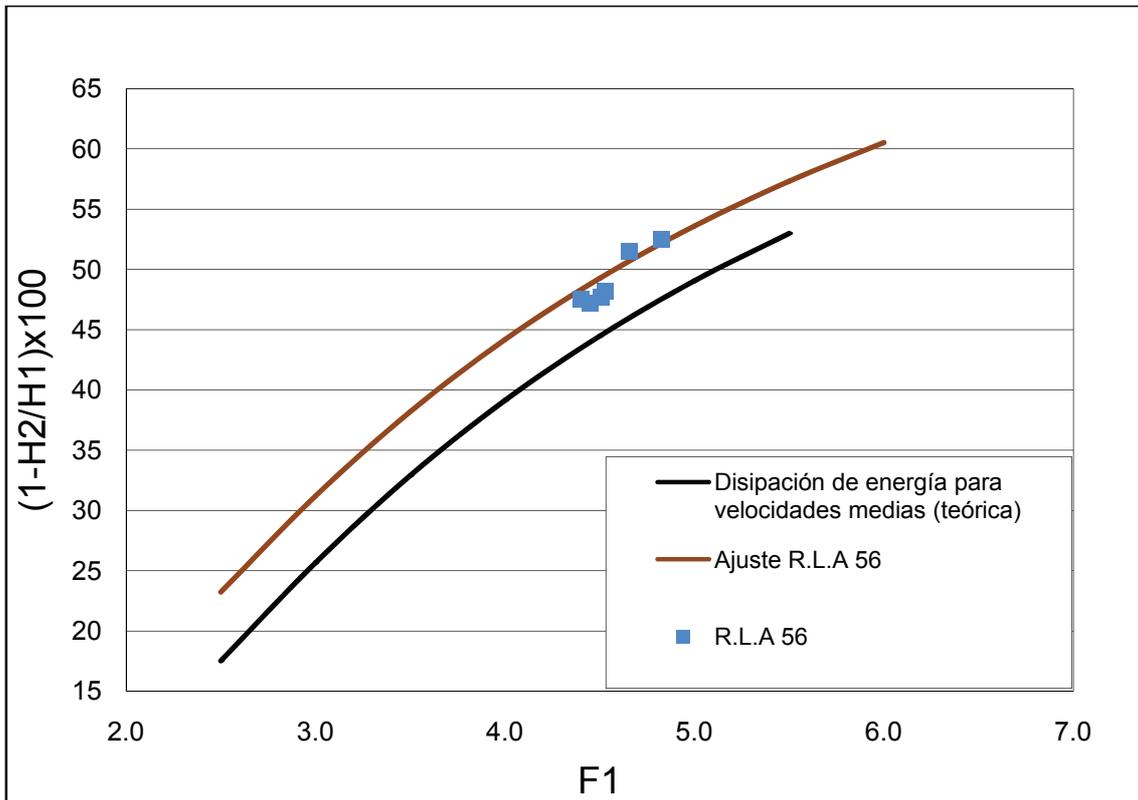


Figura 6.32. Ajuste para resaltos estabilizados a 56 cm y bajo efectos de escala.

Comparando los ajustes de de las curvas de pérdida de energía para los datos con fenómenos de escala y sin fenómenos, para iguales desplazamientos, definimos la variación de energía debida a este hecho.

A continuación se muestran los ajustes para los distintos desplazamientos:

Para resaltos al pie del aliviadero:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.489} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.35)$$

Para resaltos estabilizados a 14 cm del aliviadero:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.487} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.36)$$

Para resaltos estabilizados a 28 cm:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.486} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.37)$$

Para resaltos estabilizados a 56 cm:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{1.485} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (6.38)$$

$\left[\left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right)_{Re < 18000} - \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right)_{Re > 18000} \right]_n \times 100$ es la diferencia de energía para un mismo desplazamiento n entre resaltos con efectos y sin efectos de escala.

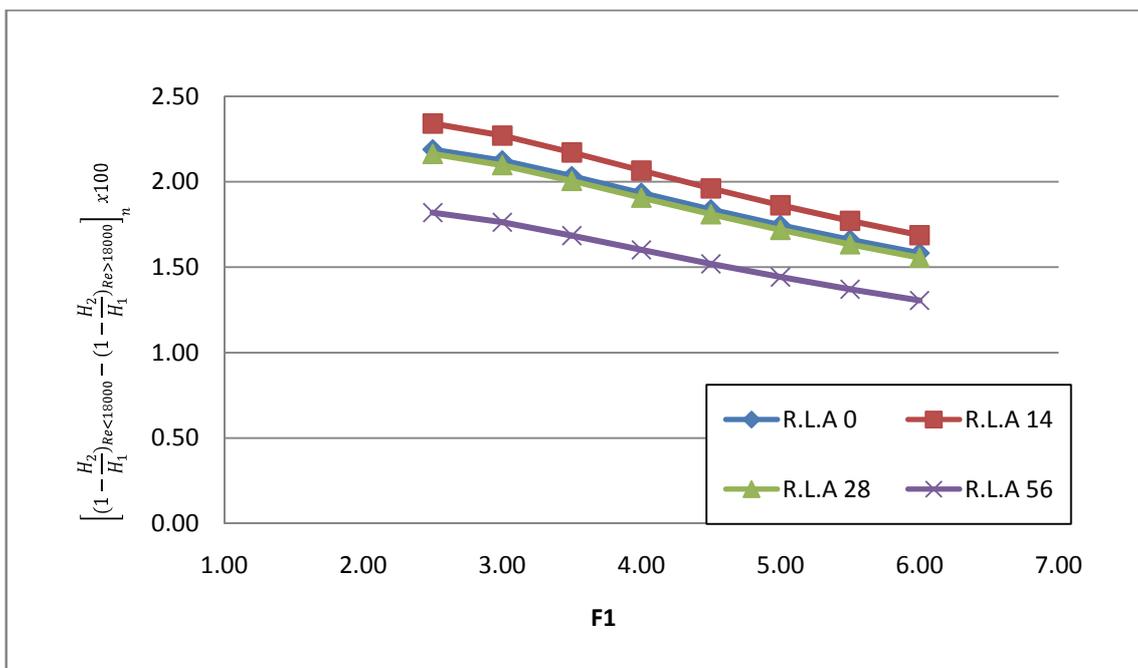


Figura 6.33. Variación de la energía producida por los efectos de escala.

Se puede observar que los efectos de escala tienen una mayor incidencia en el desplazamiento a R.L.A 14 seguido del desplazamiento al pie y muy seguido el R.L.A 28 sin embargo el desplazamiento a 56 cm, es sobre el que menos afectan. Para una mejor comprensión obsérvese la figura siguiente Figura 6.34.

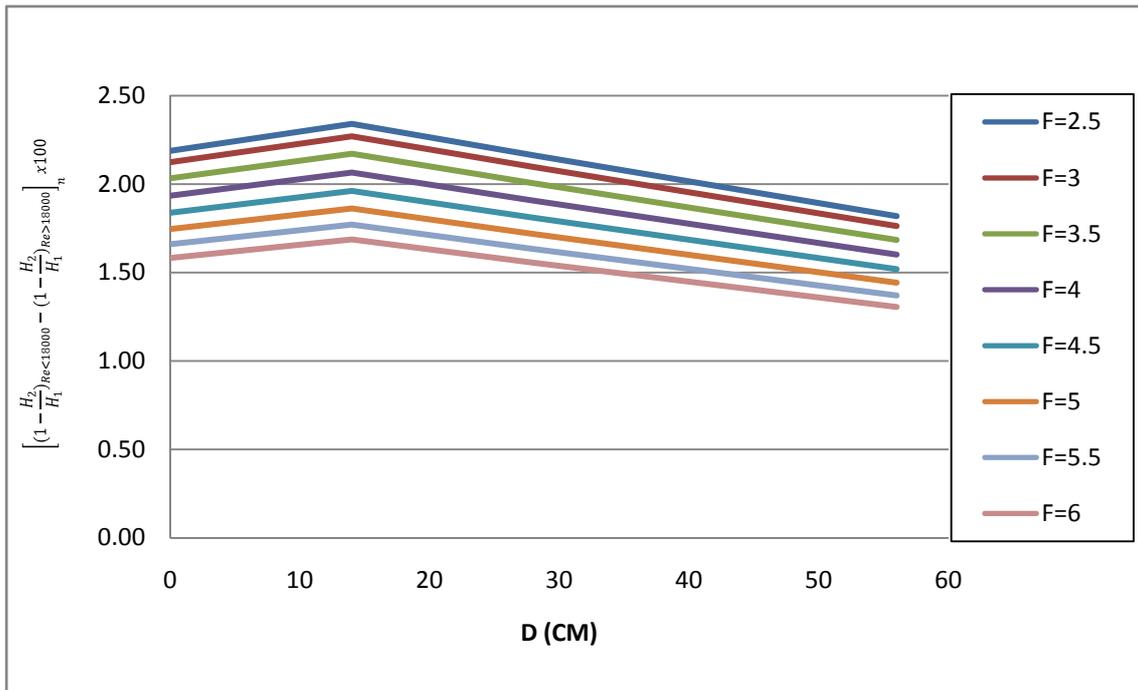


Figura 6.34. Influencia de los efectos de escala según desplazamiento.

Dado que los resaltos al pie y desplazados a 14 cm se encuentran bajo flujo parcialmente desarrollado, parece ser que en esta condición de flujo, este fenómeno tiene mayor incidencia, y además, proporcional al espesor de la capa límite. Conforme el flujo pasa a ser totalmente desarrollado, los efectos de escala disminuyen proporcionalmente al desplazamiento.

Sin embargo estos efectos solamente suponen una pérdida de energía de entre el 1,30% al 2,30% de la energía total disipada por el resalto hidráulico.

A continuación completamos nuestra grafica de pérdida de energía con mediciones para resaltos aguas abajo de una compuerta deslizante, obtenido por Vicente A, (2008).

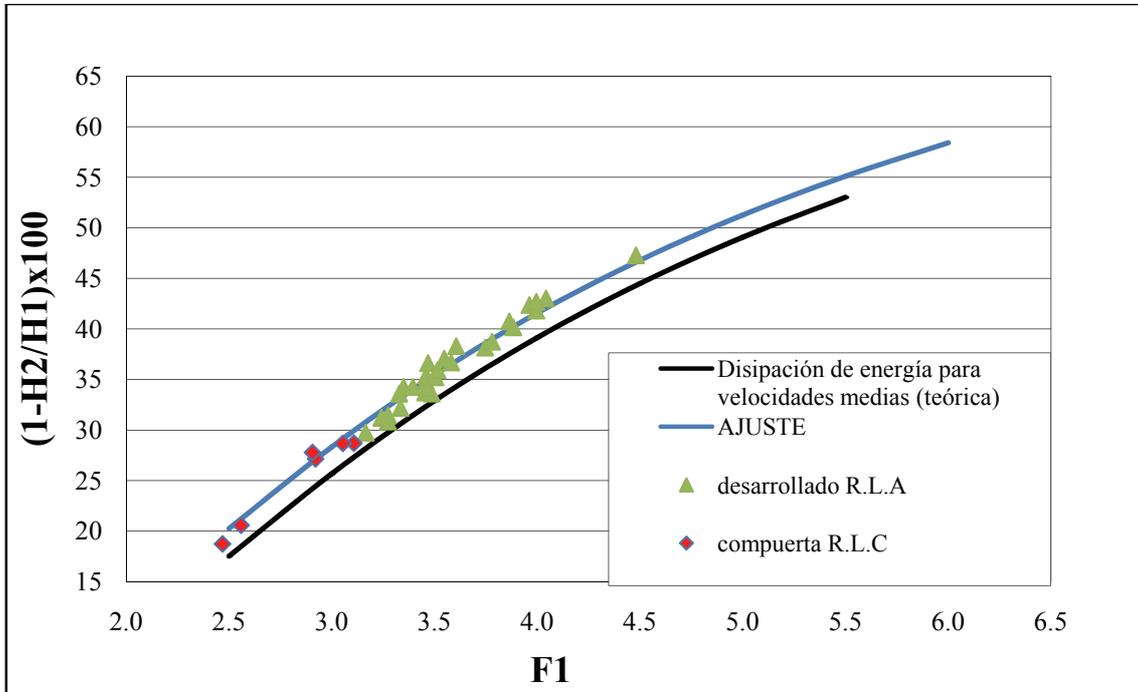


Figura 6.35. Flujo desarrollado bajo compuerta.

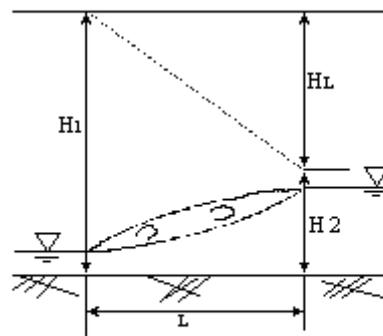
El material y procedimiento de obtención de datos es el mismo que para este trabajo. Para resaltos aguas abajo de compuertas, obtuvo un flujo totalmente desarrollado en los desplazamientos de 70 y 90 cm, quedando serias dudas sobre si los efectos de escala hacen su presencia a partir de Reynolds por debajo de 30000, y si están todas las mediciones influenciadas por estos efectos de escala.

6.9. Longitud del resalto hidráulico

Con respecto a la longitud del resalto hidráulico, muchos datos experimentales han sido analizados sin ninguna base teórica. Se ha intentado incluso analizar los datos considerando el significado físico.

Si la longitud del resalto L es interpretada como la longitud de la zona requerida para disipar la energía en el resalto, entonces L debería ser función de la energía específica H_* al comienzo del resalto y de la energía pérdida H_L en el resalto (Figura 6.36), implicando la siguiente relación:

$$f(L/H_L, H_L/H_*) = 0 \quad (6.39)$$



(a) Resalto libre

Figura 6.36. Relación entre L y H_L [Márquez 2006]

En el caso del resalto libre, la relación (6.39) puede ser expresada como:

$$f(L_j/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad (6.40)$$

siendo L_j : longitud del resalto libre

También, L_{rj} : longitud del rulo y L_t : longitud total, se asumen como proporcionales a L_j :

$$L_{rj} \propto L_j \propto L_t \quad (6.41)$$

De las relaciones (6.40) y (6.41), se derivan las relaciones (6.42) y (6.43):

$$f(L_{rj}/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad (6.42)$$

$$f(L_t/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad (6.43)$$

De acuerdo con datos experimentales y con las relaciones (6.40), (6.42) y (6.43), Ohtsu et. al (1990) demostraron éstas claras correlaciones que se indican en la Figura 6.37. Proponen las siguientes expresiones:

$$\log_{10} \frac{L_{rj}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,40; \quad \text{Para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.44)$$

$$\log_{10} \frac{L_j}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,58; \quad \text{Para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \text{ y } (0,14 \leq H_L/H_1 \leq 0,71) \quad (6.45)$$

$$\log_{10} \frac{L_t}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,72; \quad \text{para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.46)$$

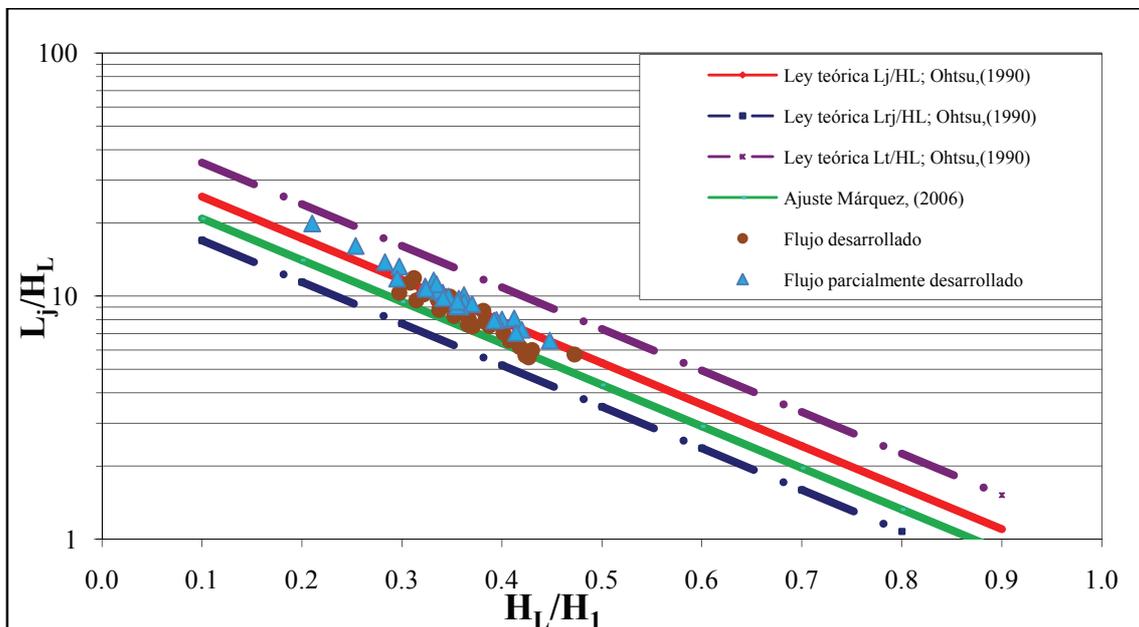


Figura 6.37. Relación entre L_j/H_L y H_L/H_1

Con respecto a los resultados que muestra la Figura 6.37 se puede hacer la siguiente interpretación: la pérdida de energía relativa más grande H_L/H_1 se da cuando el remolino superficial y las fluctuaciones de la velocidad turbulenta son mayores; así,

cuando el gradiente de la línea de energía H_L/L_j es mayor, entonces L_j/H_L será menor. Como contraste, la relación H_L/H_I más pequeña se corresponde con un remolino superficial y unas fluctuaciones de la velocidad turbulenta menores; así, H_L/L_j es menor mientras L_j/H_L es mayor. Comparando las leyes teóricas propuestas por Ohtsu et al. con los resultados experimentales se observa que los datos experimentales para ambos resaltos siguen la misma tendencia y pendiente que las teóricas.

Referente a los resultados de la relación anterior, comprobamos un buen ajuste con la ley teórica de Ohtsu para L_j de nuestros datos con flujo parcialmente desarrollado, por el contrario, para flujo desarrollado se observa que la nube de puntos cae entre esta ley y la propuesta por Márquez, (2006).

6.10. Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos

Desde el punto de vista del diseño de disipadores de energía hidráulica, es importante conocer que el campo de velocidad en el resalto cambia con F_I y las condiciones para el desarrollo de la capa límite, al comienzo del resalto libre.

Una investigación del campo de velocidades en el resalto ha sido llevada a cabo por Rajaratnam (1965), quien trató el resalto libre como chorro de pared, pero los cambios en las características de la velocidad dependientes de F_I no han sido totalmente descritos. Considerando el hecho de que el resalto hidráulico es un fenómeno que implica un remolino superficial, se puede considerar el resalto como chorro de pared, sin tener en cuenta el efecto de la superficie libre. Considerando el efecto que el desarrollo de la capa límite en flujo supercrítico tiene en las condiciones del flujo del resalto, una investigación experimental fue llevada a cabo por Leutheusser y Kartha (1972), y por Wilson y Turner (1972). Sin embargo, la precisión de los instrumentos de medida debido a los pequeños valores medidos de los calados contraídos podrían haber perturbado en algún grado las medidas.

A continuación se investigan los cambios en las características de la velocidad de los resaltos en relación a F_I .

Examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, se encuentra una distribución semejante de velocidades independiente de F_I y x dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$ (Figura 6.38), donde la longitud escalar Y es la distancia

perpendicular a la solera, en la que la velocidad \bar{u} es la mitad de la velocidad máxima u_m y el gradiente de velocidad es negativo, y $y_{m\acute{a}x}$ es la distancia perpendicular a la solera, en la que $\bar{u} = u_m$ (Figura 6.38).

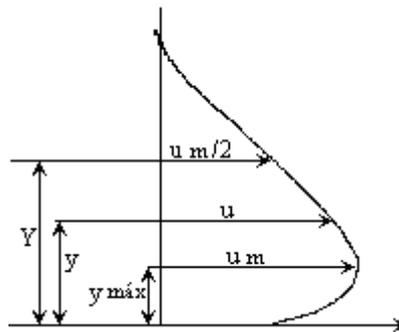


Figura 6.38. Definición esquemática de Y y $y_{m\acute{a}x}$ Márquez, (2006).

Esta distribución de velocidad se expresa por una ley de potencia, Ec. (6.47)(a), y una ley exponencial, Ec. (6.47)(b):

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left(\frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k \quad (6.47)(a)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{1,177}{1-k} \left(\frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1,5 \quad (6.47)(b)$$

donde $k = y_{m\acute{a}x} / Y$

A continuación se representan las leyes teóricas (Ec. (6.47)(a) y (6.47)(b)) obtenidas experimentalmente por Ohtsu para el Caso “a” (para flujo no desarrollado) donde $k=0,333$ y $n=12$, y para el Caso “b” (flujo desarrollado) donde $k=0,351$ y $n=7$.

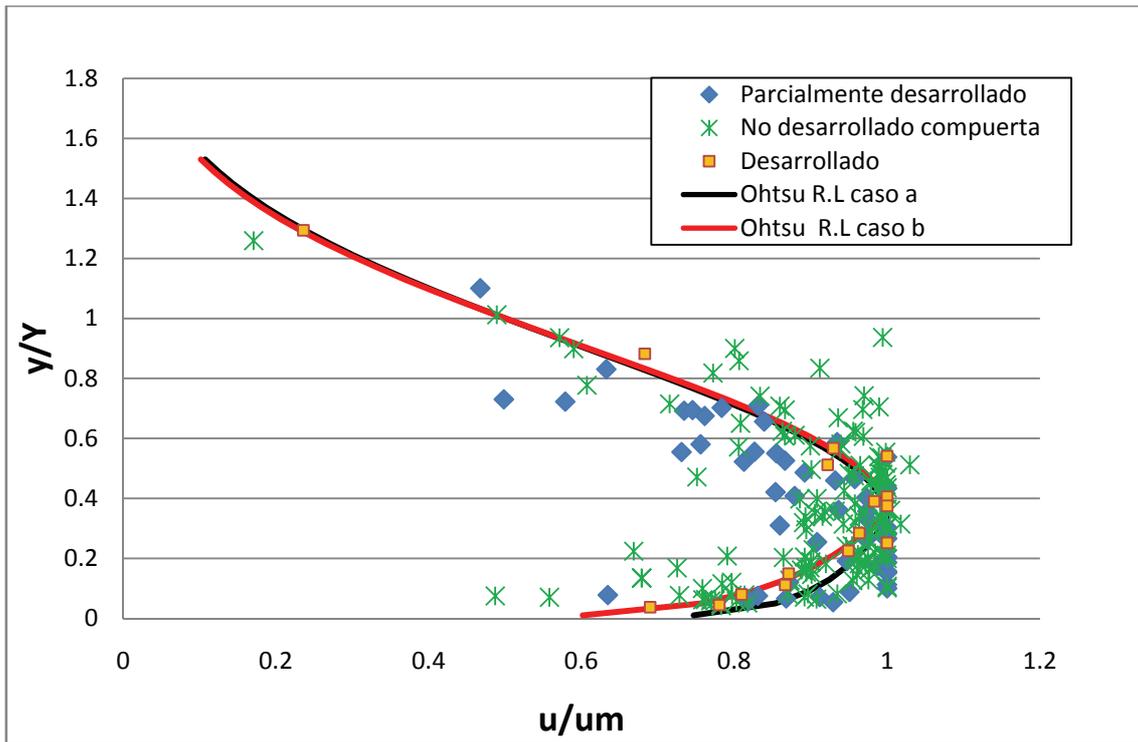


Figura 6.39. Distribución de velocidades.

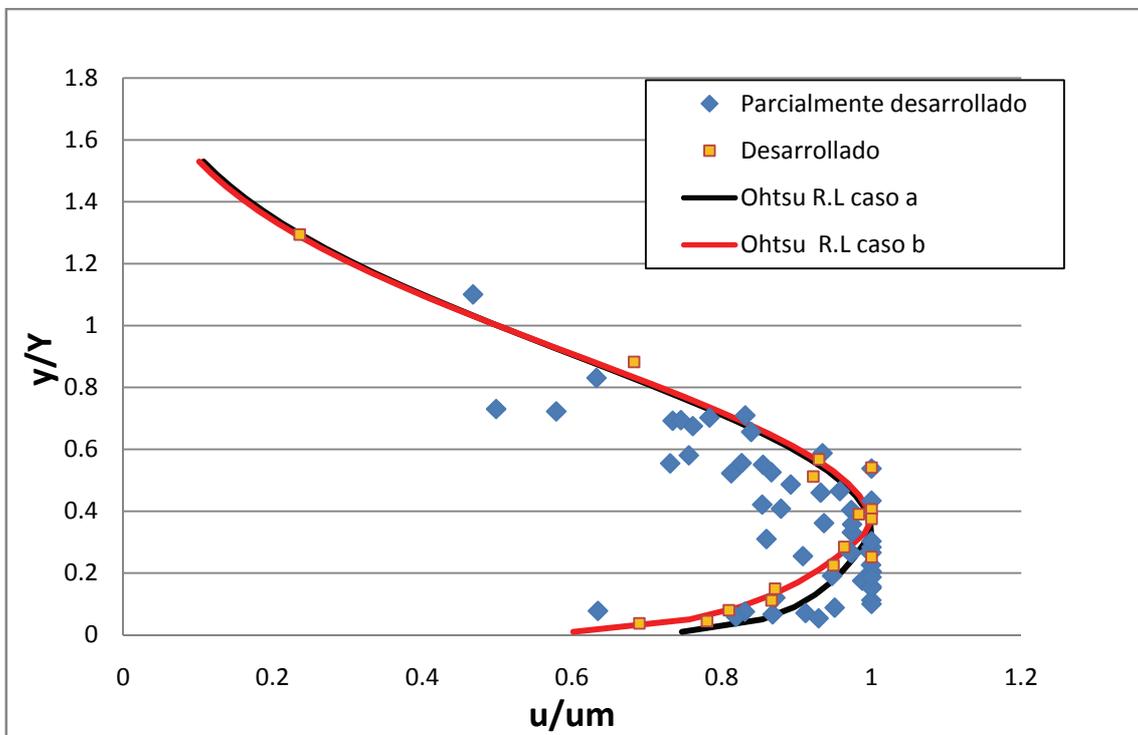


Figura 6.40. Distribución de velocidades para resaltos libres. Aliviadero.

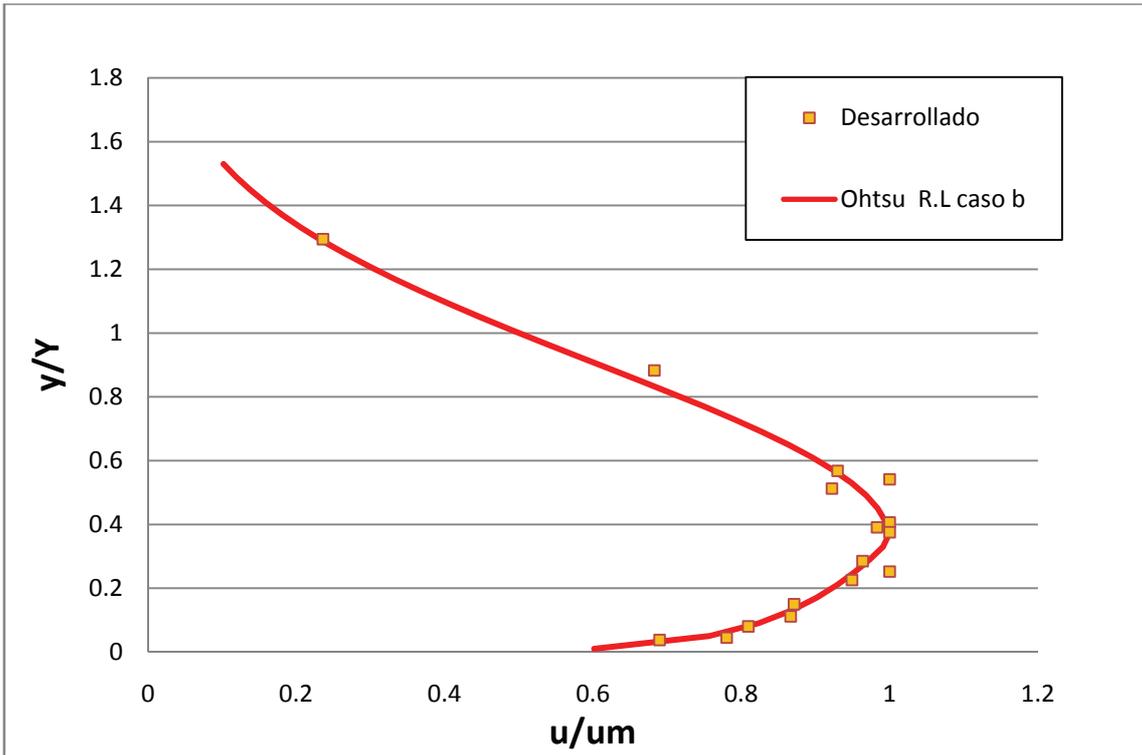


Figura 6.41. Distribución de velocidades para resaltos con flujo desarrollado.

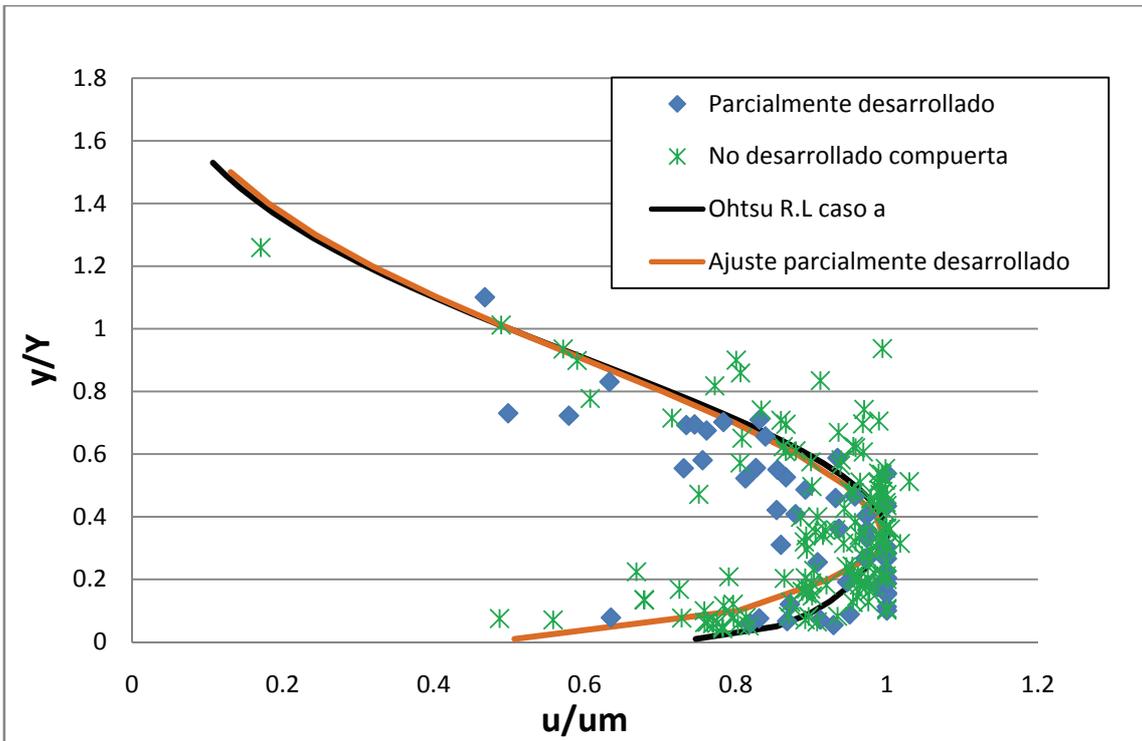


Figura 6.42. Distribución de velocidades para resaltos con flujo no desarrollado.

Se observa que para los resaltos con flujo totalmente desarrollado nuestras experiencias se muestran concordantes con el supuesto caso “b” de Ohtsu y además con una pequeña dispersión respecto de la ley dada por la ecuación (6.47)(b).

Sin embargo los resaltos con flujo parcialmente desarrollado muestran una mayor dispersión para el ajuste de la curva en su parte alta Ec. (6.47)(b), pero en su parte baja ecuación (6.47)(a) los datos se ajustan mejor para la ley de Ohtsu para su caso “a” . No obstante se propone un ajuste junto con los datos de resaltos aguas debajo de compuertas, donde $k = 0,3$ y $n = 5$ para la ecuación 6.47.

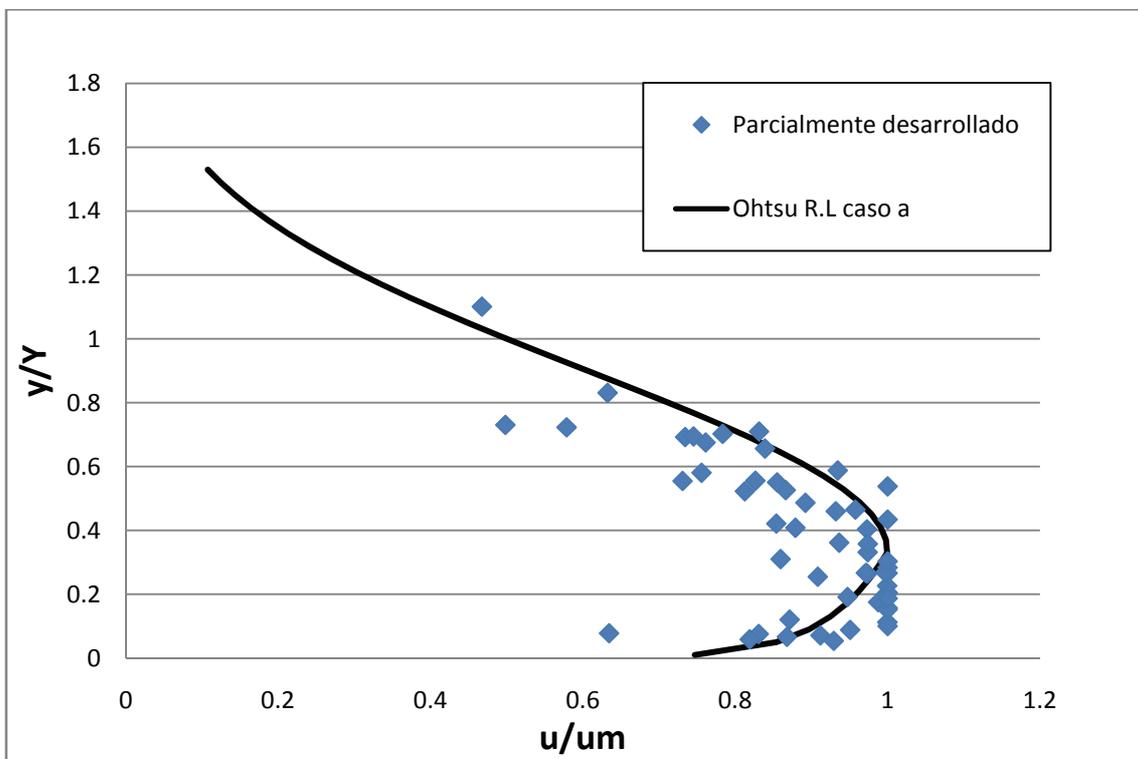


Figura 6.42. Distribución de velocidades para resaltos con flujo parcialmente desarrollado.

En la figura 6.43 se muestra la relación $u_m/v_1 = f(x/y_1, F_1)$, que fue obtenida por Ohtsu et al., proponiendo la siguiente ecuación:

$$u_m/v_1 = (0,175 F_1 + 1,57) / \sqrt{x/y_1} ; \text{ para } (3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.48)$$

La ecuación anterior es aplicable en la zona del resalto, dentro del rango $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$

En la figura se representan las leyes teóricas para cada Froude según la Ec. (6.48), junto con nuestros resultados experimentales, y se observa que los puntos medidos quedan por debajo de las líneas teóricas correspondientes, por lo tanto no se puede considerar el ajuste teórico-experimental como bueno. Se puede observar que nuestros valores experimentales caen asintóticamente por debajo de la relación propuesta por Ohtsu et. al (1990), concluyendo que la relación de velocidades máximas registradas para la velocidad contraída, son en media un 40% inferiores a las propuestas por Ohtsu. No se ha conseguido distinguir entre flujo desarrollado y parcialmente desarrollado.

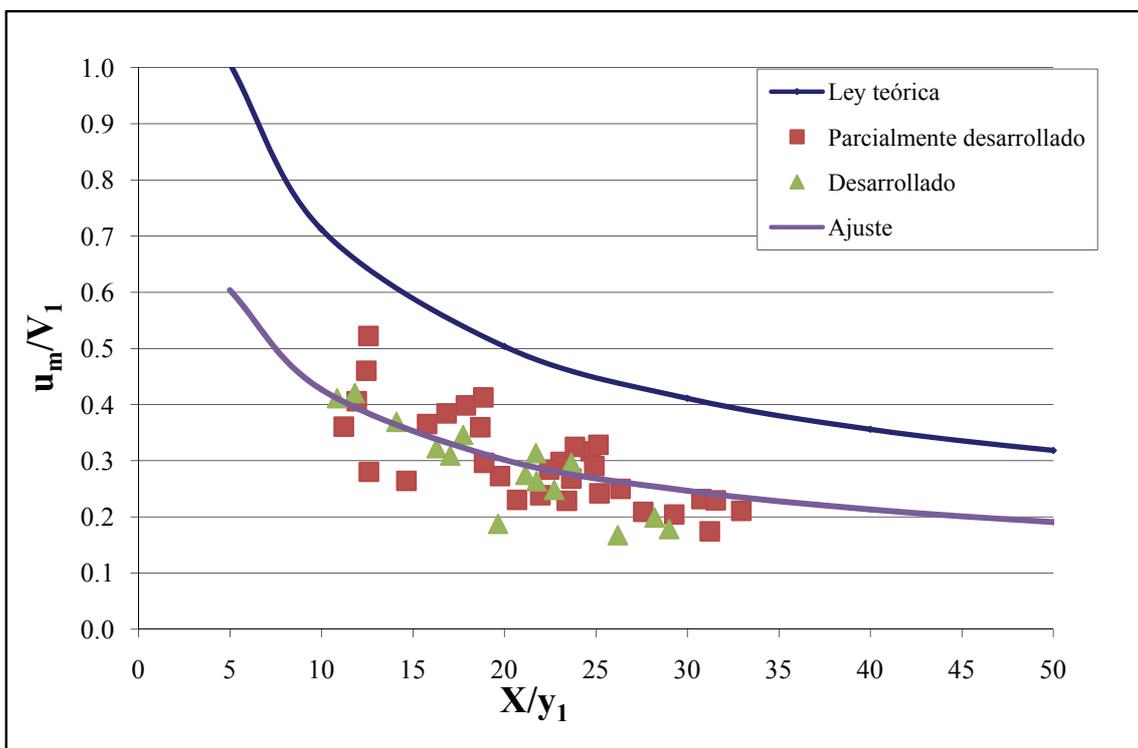


Figura 6.43. Caída máxima de velocidad.

Con respecto a la relación Y/y_1 para X/y_1 no se obtiene una clara relación para ninguna de nuestras experiencias debido a la dispersión que muestran los datos. La relación propuesta por Ohtsu et al es:

$$Y / y_1 = (0,330 / \sqrt{F_1}) x / y_1; \quad \text{para } (3 \leq F_1 \leq 9,5) \tag{6.49(a)}$$

$$Y / y_1 = (0,370 / \sqrt{F_1}) x / y_1; \text{ para } (3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (6.49)(b)$$

Siendo la ecuación (6.49)(a) para flujo parcialmente desarrollado y (6.49)(b) para totalmente desarrollado.

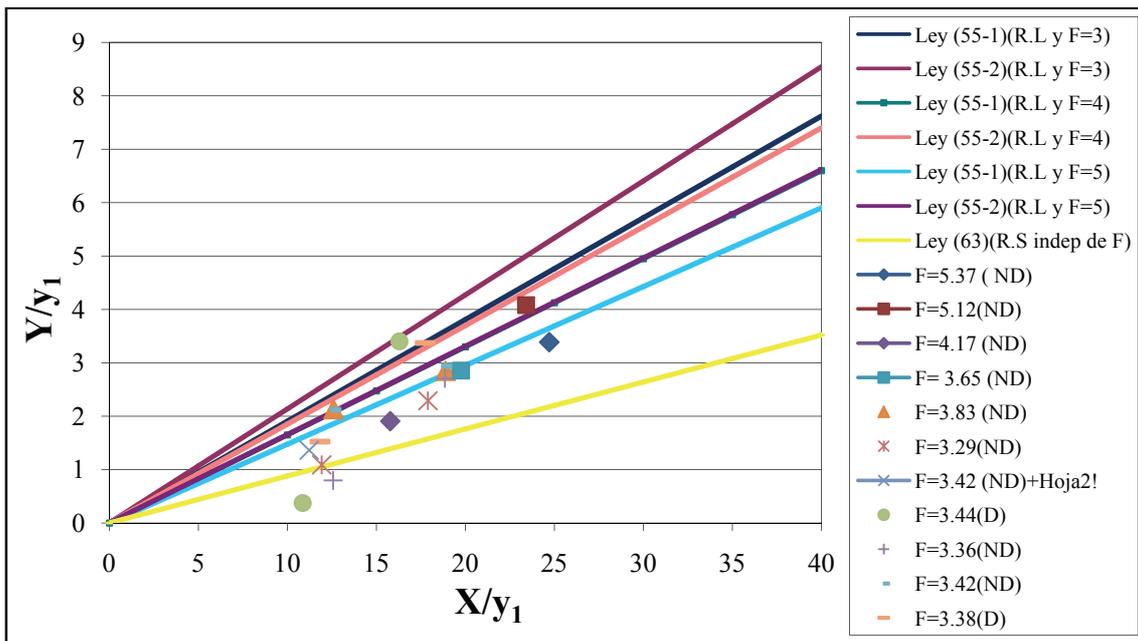


Figura 6.44. Relación $Y / y_1 = f(x / y_1)$.

El resultado de los datos experimentales, considerando la distribución de velocidades al final del resalto aguas abajo ($x=L_{jc}$), usando la relación (6.50), se muestra en la Figura 6.44:

$$\bar{u} / v_2 = f(y, y_2) \quad (6.50)$$

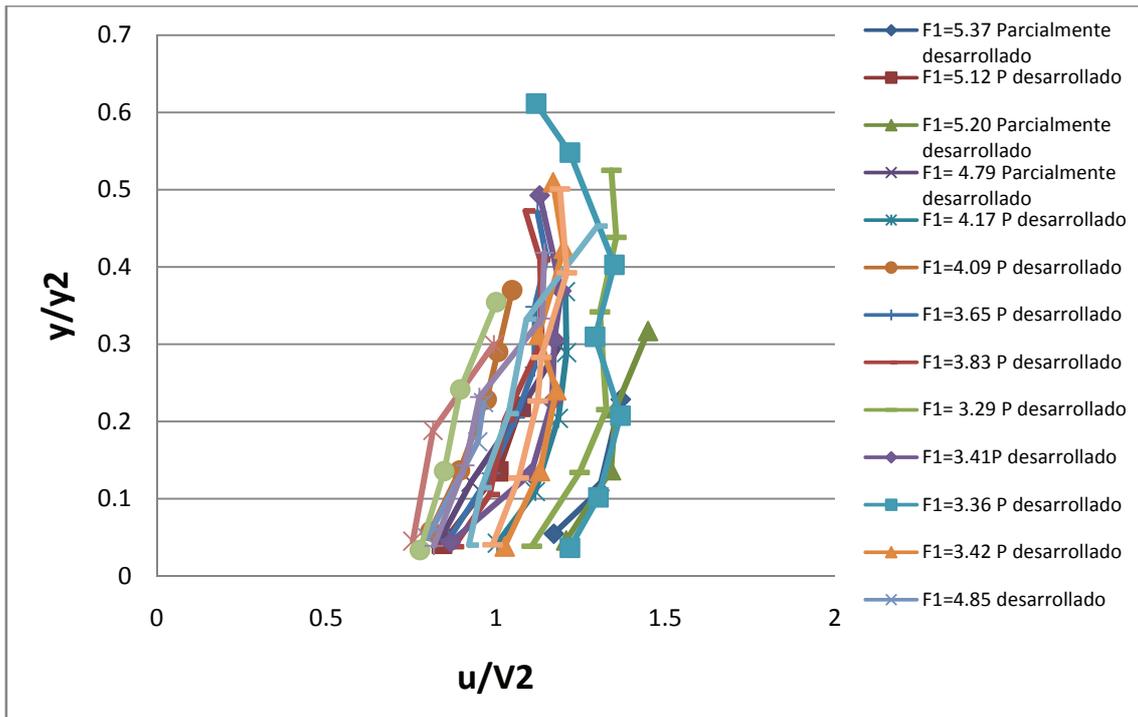


Figura 6.45. Distribución de velocidades en la última sección.

A la vista de los resultados en la distribución de velocidades en la sección final, no se aprecia ningún signo de la condición del flujo aguas arriba del resalto, pero si se clasifican respecto al desplazamiento, para ello véase la siguiente figura la distinción por colores. Obsérvese que los resaltos menos desplazados tengan un mayor valor de u/V_2 .

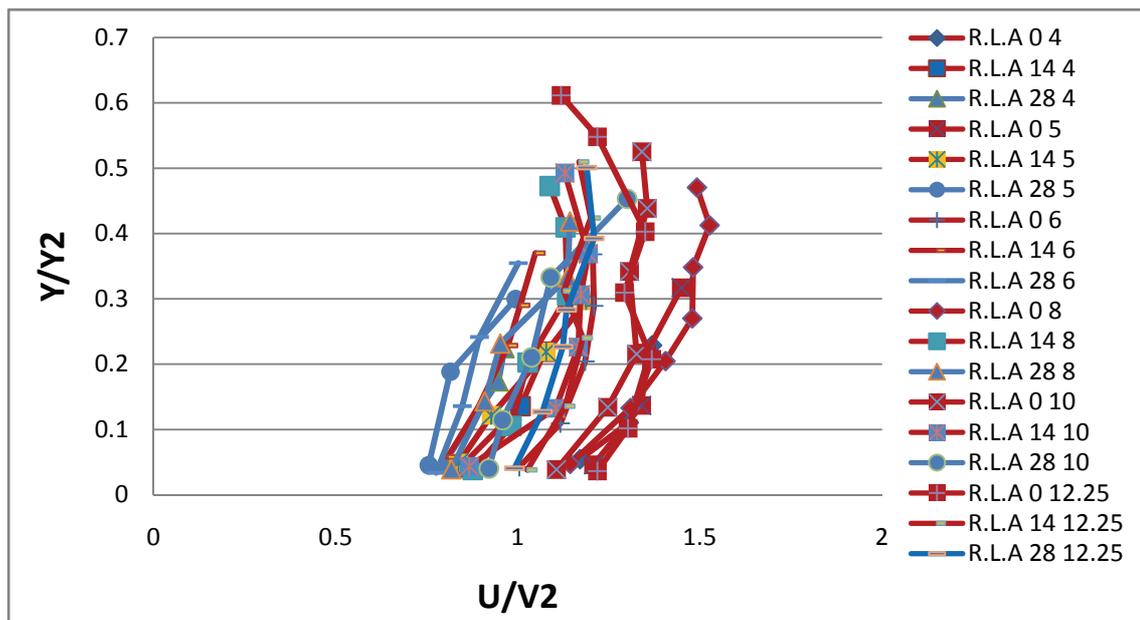


Figura 6.46. Distribución de velocidades en la última sección.

7. CONCLUSIONES

Equipo.

En relación al canal utilizado, debido a la presencia de efectos de escala y otros problemas que puedan quedar ocultos, se muestra la necesidad de un canal nuevo y con mayor capacidad para el estudio sistemático de los fenómenos hidráulicos en lámina libre de interés para la ingeniería civil y la comunidad científica.

Respecto a la metodología Doppler poco utilizada para esta finalidad debido a sus limitaciones, no ha supuesto un problema sino que agudiza el ingenio para solventar los problemas, como el filtro digital que se ha utilizado para el tratamiento de datos. No disponiendo presupuesto para una sonda Laser podemos ratificar que el equipo ADV es una solución técnica y económica viable.

Campos de estudio.

- Características de la longitud de resalto

Establecido nuestro criterio para determinar nuestra longitud de resalto hidráulico, tras comparar los resultados con los obtenidos por autores como Ohtsu y viendo la similitud del rango en que se presentan podemos concluir que el criterio para determinar la longitud es válido.

- Efectos de escala.

Los fenómenos de escala en vez de ser un problema que echara por tierra tantas horas de trabajo han resultado un campo de estudio interesante.

Estos fenómenos se dan para Reynolds menores de 18000 en nuestro canal de 8 cm de ancho y estos producen una pérdida de energía adicional de entre 2,3% y 1,3 % y más intensamente para Froude bajos y resaltos con flujo parcialmente desarrollado.

- Relación entre calados inicial y final.

Descartados los datos con Reynolds menores de 18000, se observa que para flujo potencial el ajuste es más tendente a la expresión teórica de Bélanger y para flujo desarrollado, la ecuación de Rajaratman es un buen referente. Esto es debido a que para flujo no desarrollado el efecto lubricante de la capa límite reduce las pérdidas de energía

y por tanto la relación de calado es similar a la de Bélanger, la cual es una expresión teórica que no tiene en cuenta las pérdidas por fricción. De la misma manera las experiencias con flujo desarrollado se asemejan a Rajaratnam ya que su expresión tiene en cuenta las pérdidas de energía.

- Pérdidas de energía.

Las pérdidas de energía en los resaltos hidráulicos son superiores en nuestras experiencias a la ley teórica. Para el caso de resaltos hidráulicos con flujo potencial la pérdida de energía es menor y por tanto más parecida a la teórica. Por el contrario, en flujo desarrollado se producen las mayores pérdidas de energía y además en ambos casos con una tendencia paralela a la teórica.

Respecto a la reducción de velocidad se aprecia una mayor reducción para el flujo parcialmente desarrollado que para desarrollado totalmente, esto puede ser debido que las condiciones aguas abajo sean similares para ambos casos pero la velocidad de entrada del flujo en el resalto para flujo no desarrollado sea mayor.

- Campos de velocidad en los resaltos hidráulicos

Referente a los perfiles de velocidad adimensionalizados, se aprecia en la figura 6.41 un buen ajuste de los datos de flujo desarrollado con la ley de Ohtsu et. al (1990). Para flujo parcialmente desarrollado existe una cierta dispersión que dificulta el ajuste, aun así se propone el siguiente ajuste: $k = 0,3$ y $n = 5$ para la expresión 6.47.

En la distribución de velocidades en la última sección entre los distintos desplazamientos, las mayores velocidades se encuentran en resaltos estabilizados al pie del aliviadero y las menores en resaltos desplazados 28 cm.

Respecto a la caída máxima de velocidad se aprecia una reducción del 40% en comparación con la ley de Ohtsu. Por otro lado no se consigue distinguir diferencias en las tendencias para flujo desarrollado y parcialmente desarrollado.

ANEXO I

**PERFILES DE VELOCIDAD PARA CADA
RESALTO ANALIZADO**

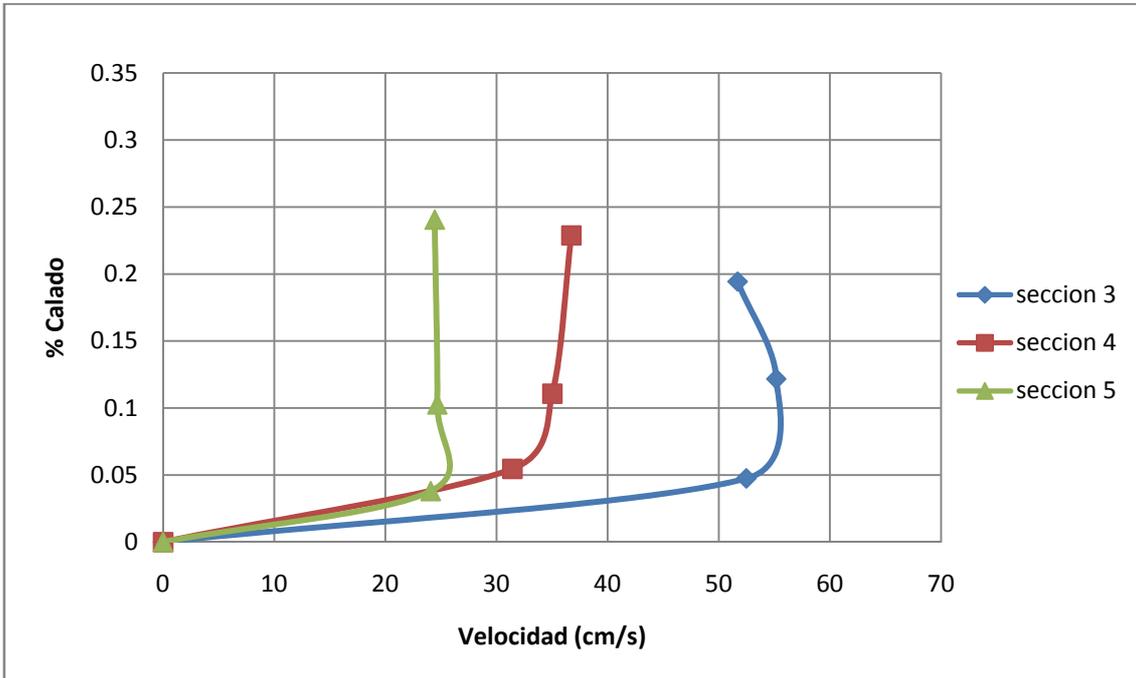


Figura A.I. 1. Perfiles de velocidad para resaltos al pie y $Q= 4 \text{ m}^3/\text{h}$.

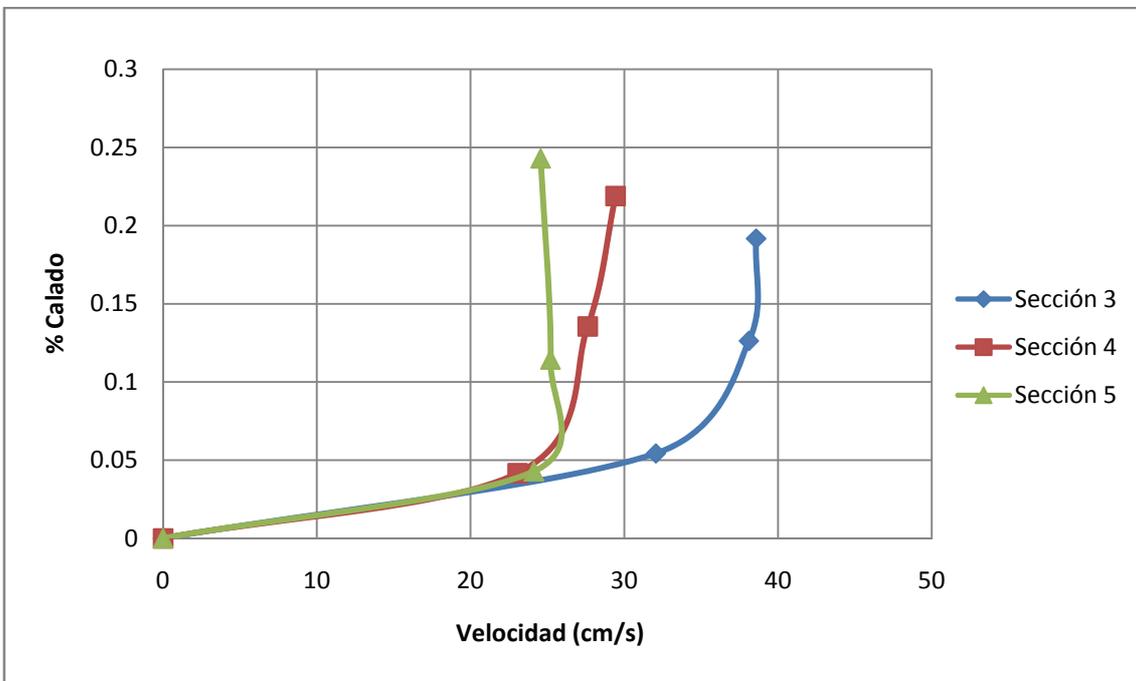


Figura A.I. 2. Perfiles de velocidad para resalto a 14 y $Q= 4 \text{ m}^3/\text{h}$.

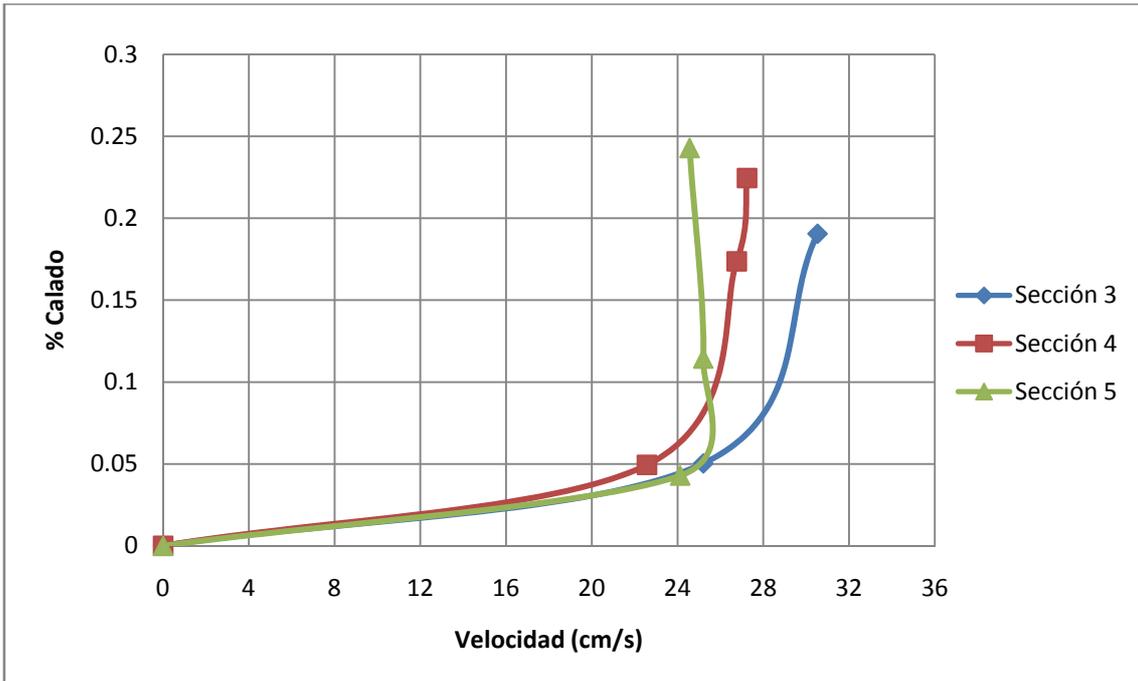


Figura A.I. 3. Perfiles de velocidad para resalto a 28 cm y $Q= 4 \text{ m}^3/\text{h}$.

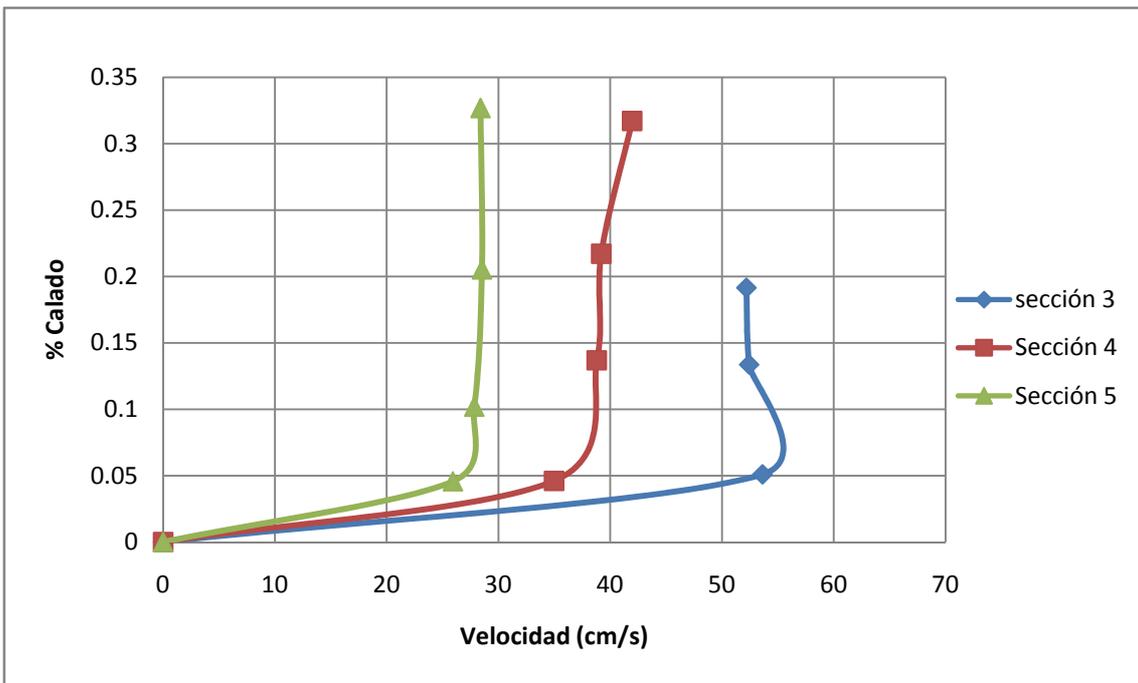


Figura A.I. 4. Perfiles de velocidad para resalto al pie y $Q= 5 \text{ m}^3/\text{h}$.

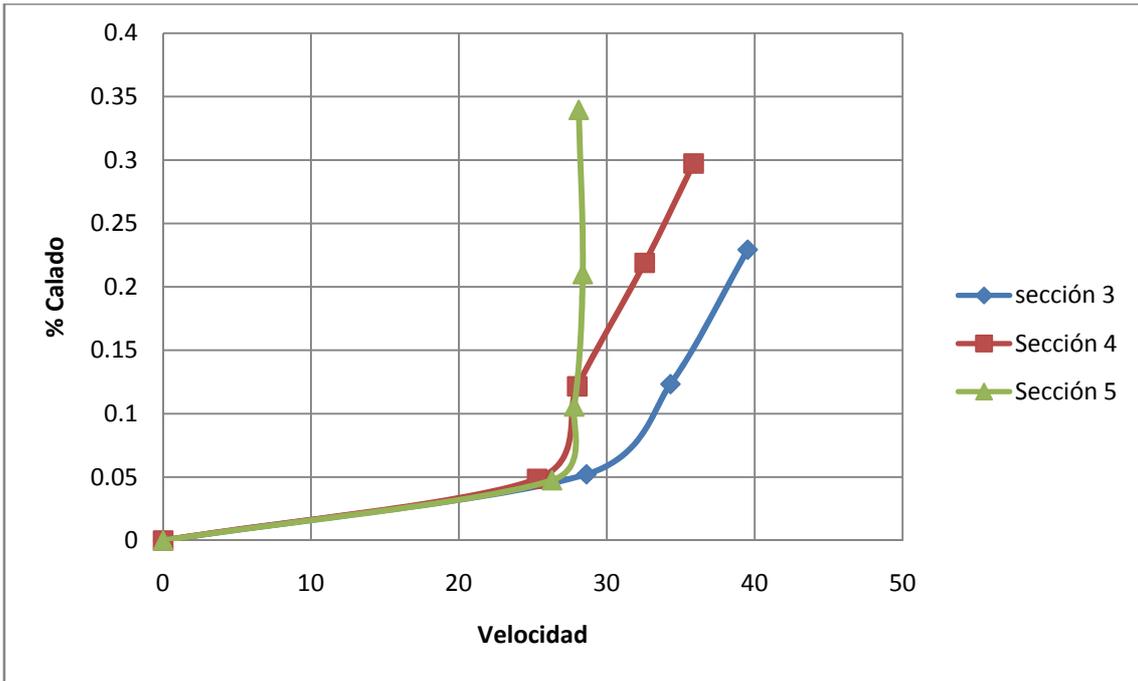


Figura A.I. 5. Perfiles de velocidad para resalto a 14 cm y $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$.

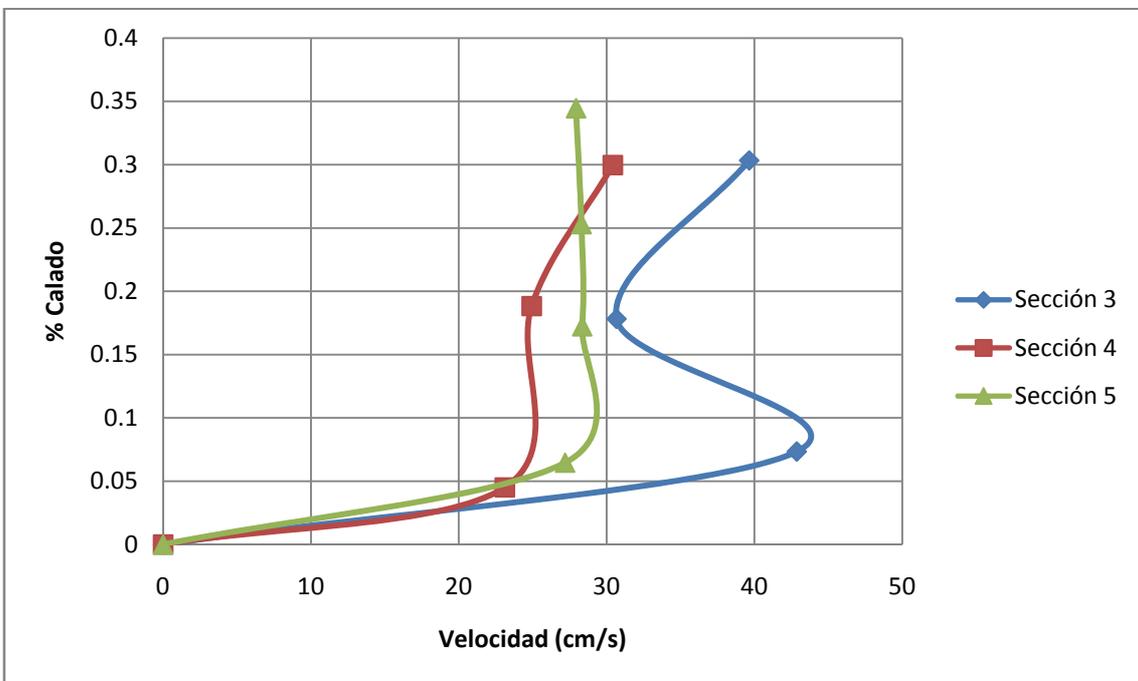


Figura A.I. 6. Perfiles de velocidad para resalto a 28 y $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$.

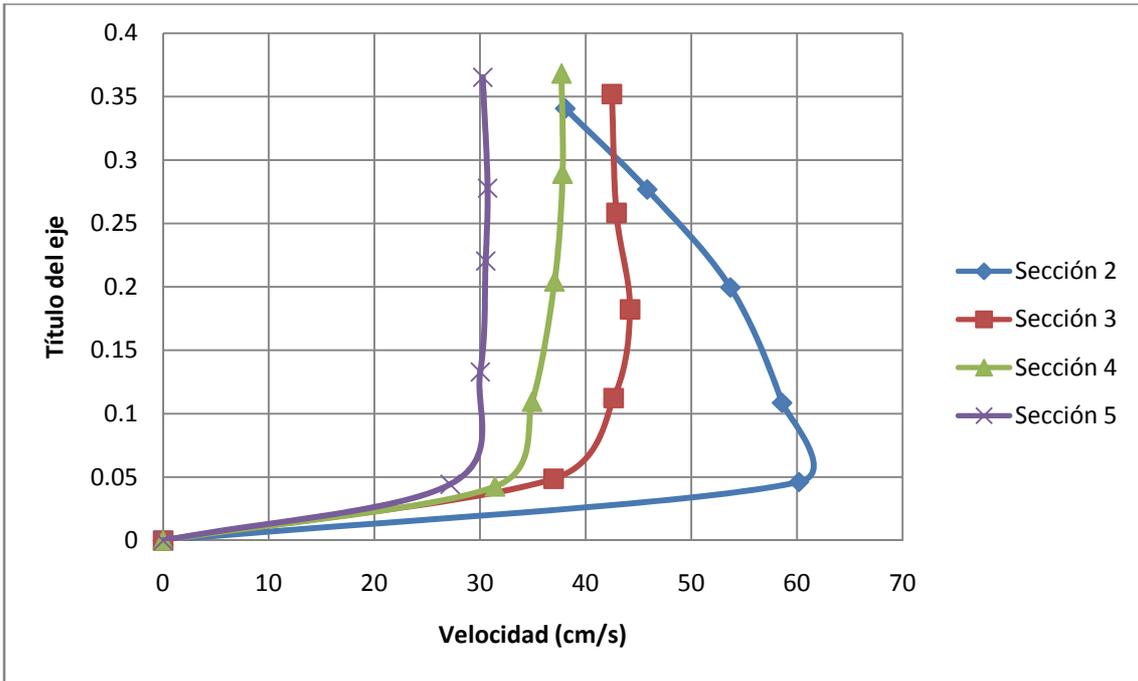


Figura A.I. 7. Perfiles de velocidad para resalto al pie y $Q=6 \text{ m}^3/\text{h}$.

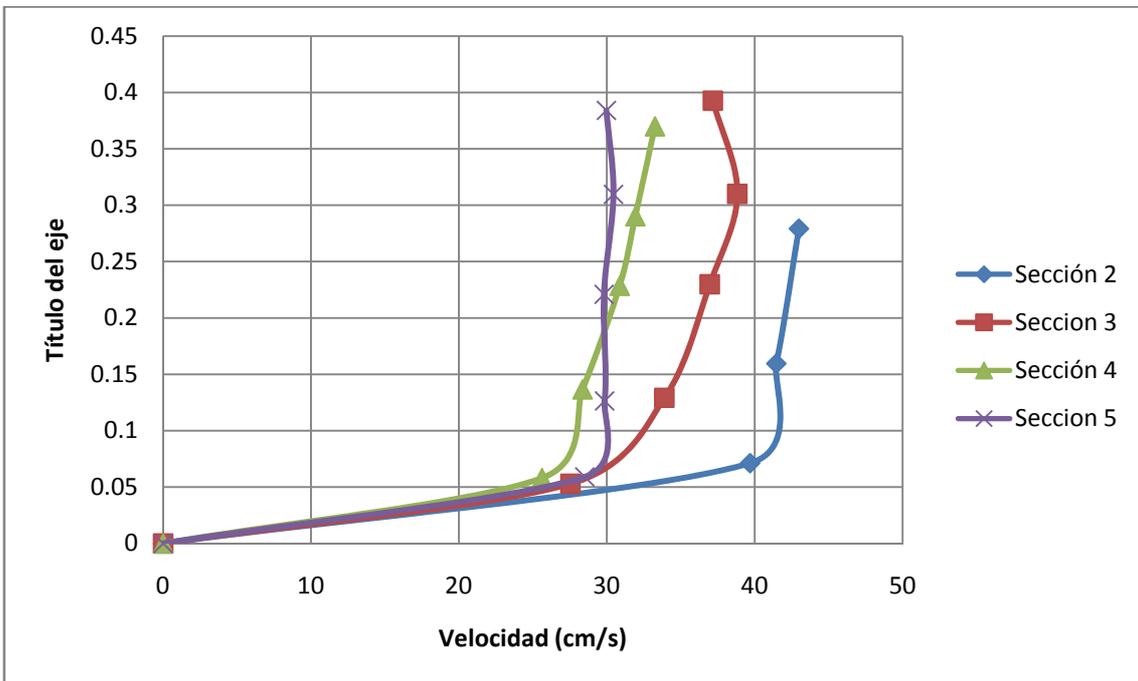


Figura A.I. 8. Perfiles de velocidad para resalto a 14 y $Q=6 \text{ m}^3/\text{h}$.

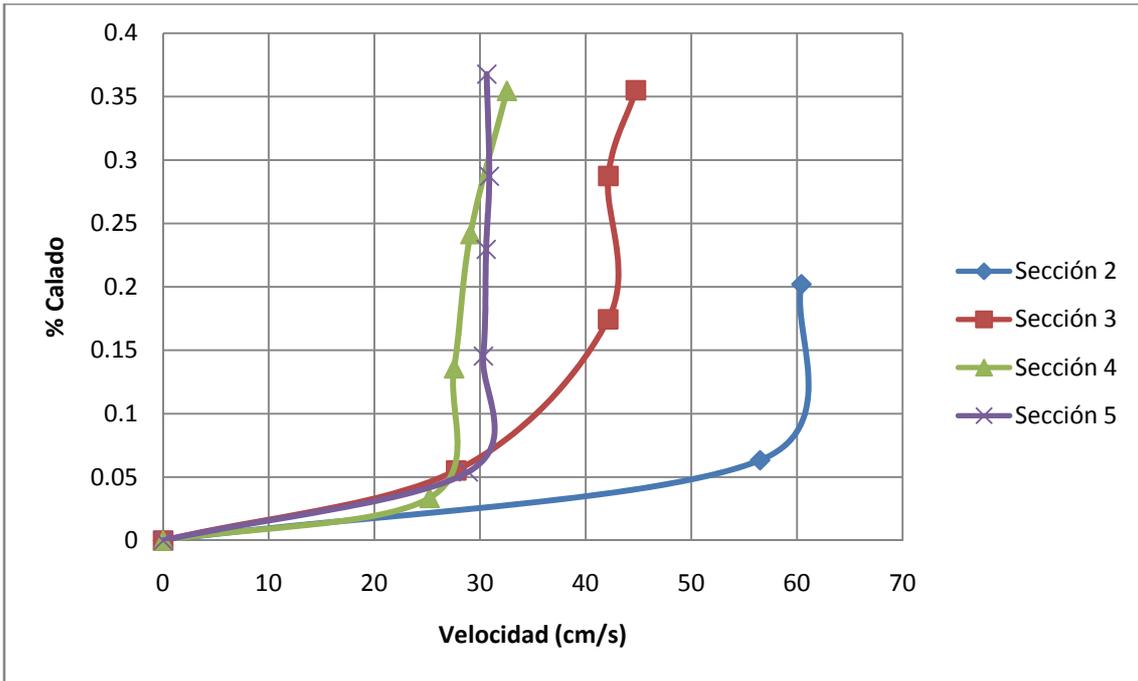


Figura A.I. 9. Perfiles de velocidad para resalto a 28 y $Q= 6 \text{ m}^3/\text{h}$.

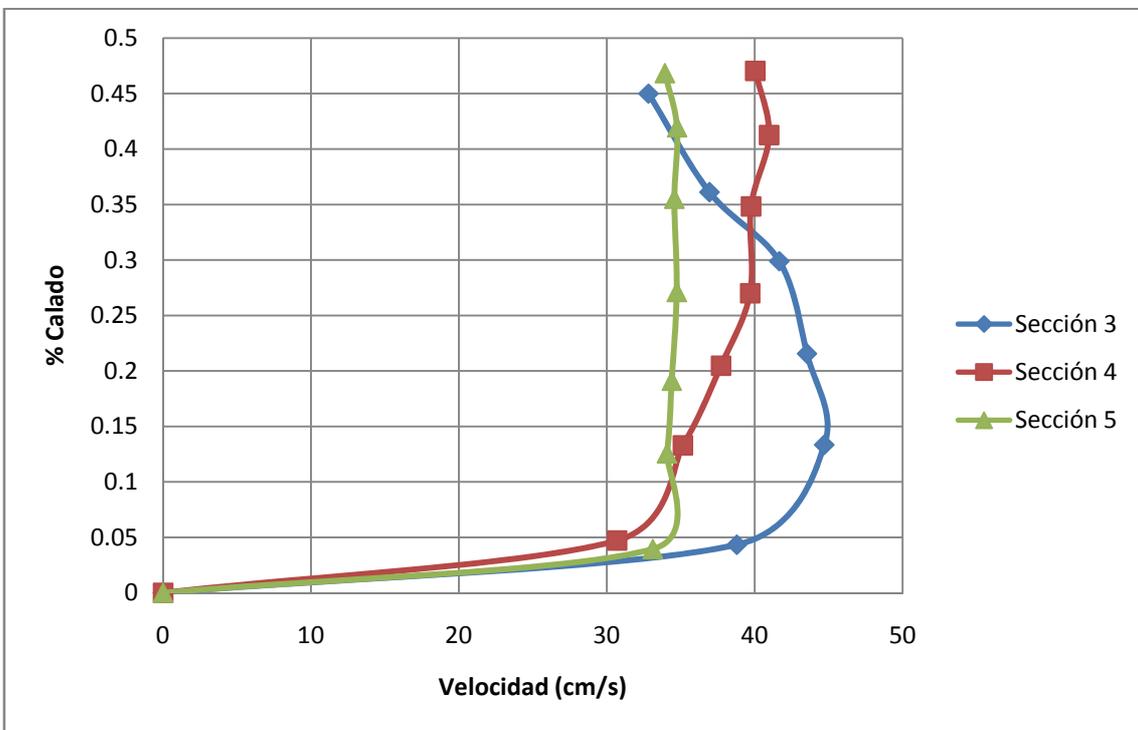


Figura A.I. 10. Perfiles de velocidad para resalto al pie y $Q= 8 \text{ m}^3/\text{h}$.

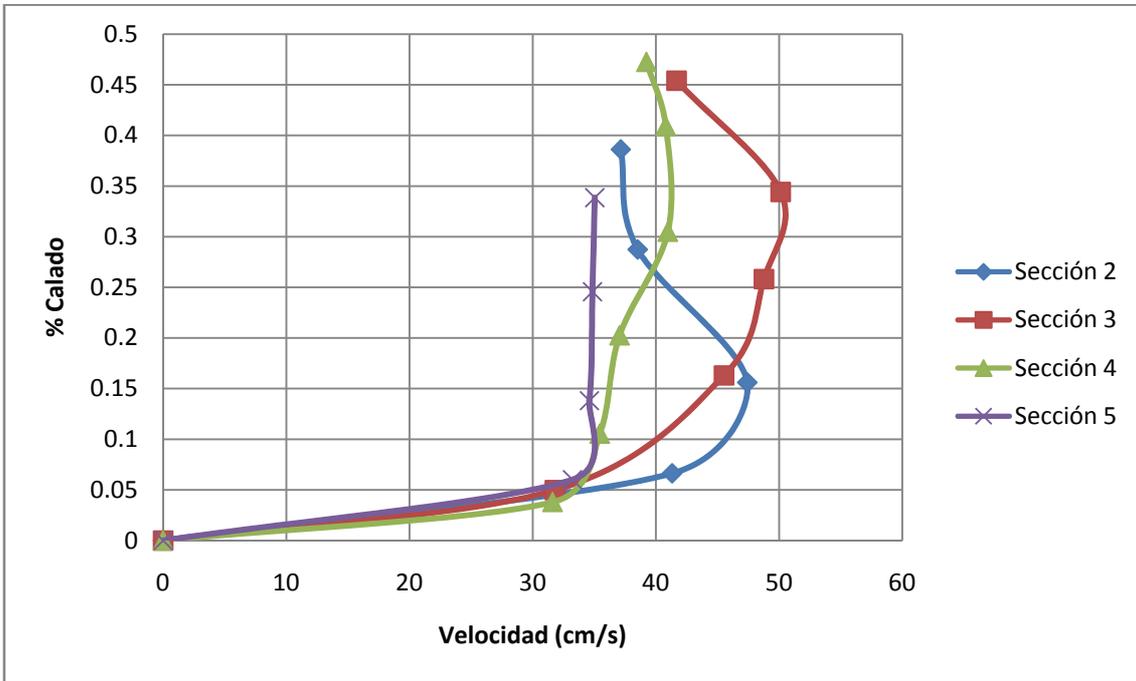


Figura A.I. 11. Perfiles de velocidad para resalto a 14 y $Q= 8 \text{ m}^3/\text{h}$.

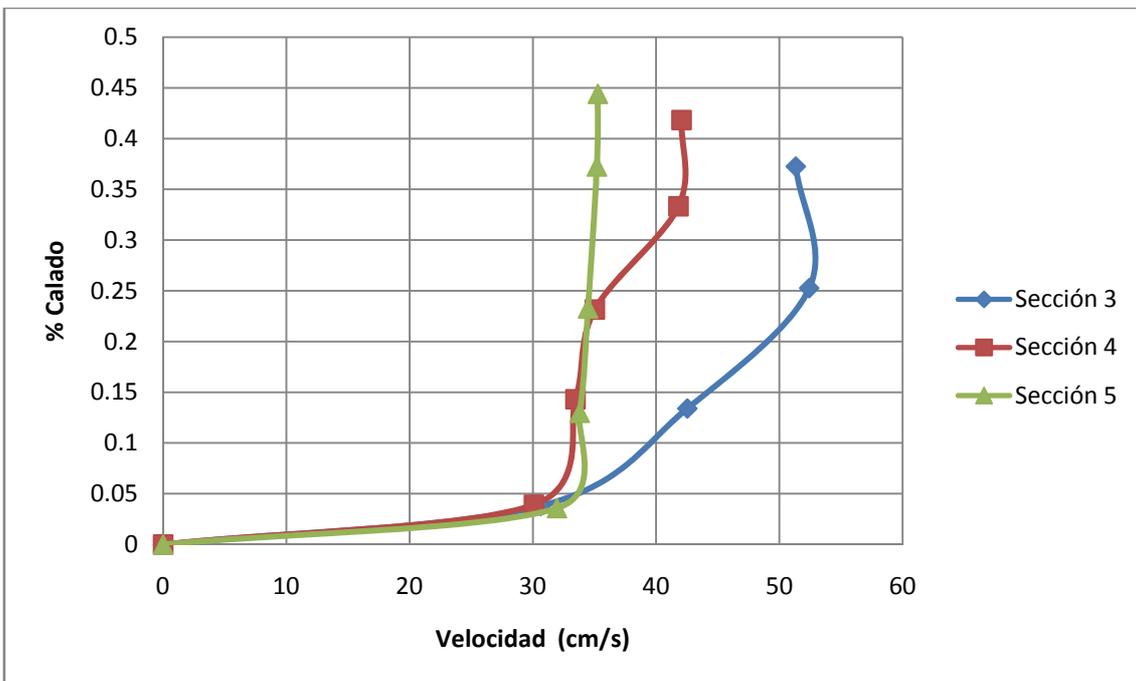


Figura A.I. 12. Perfiles de velocidad para resalto a 28 cm y $Q= 8 \text{ m}^3/\text{h}$.

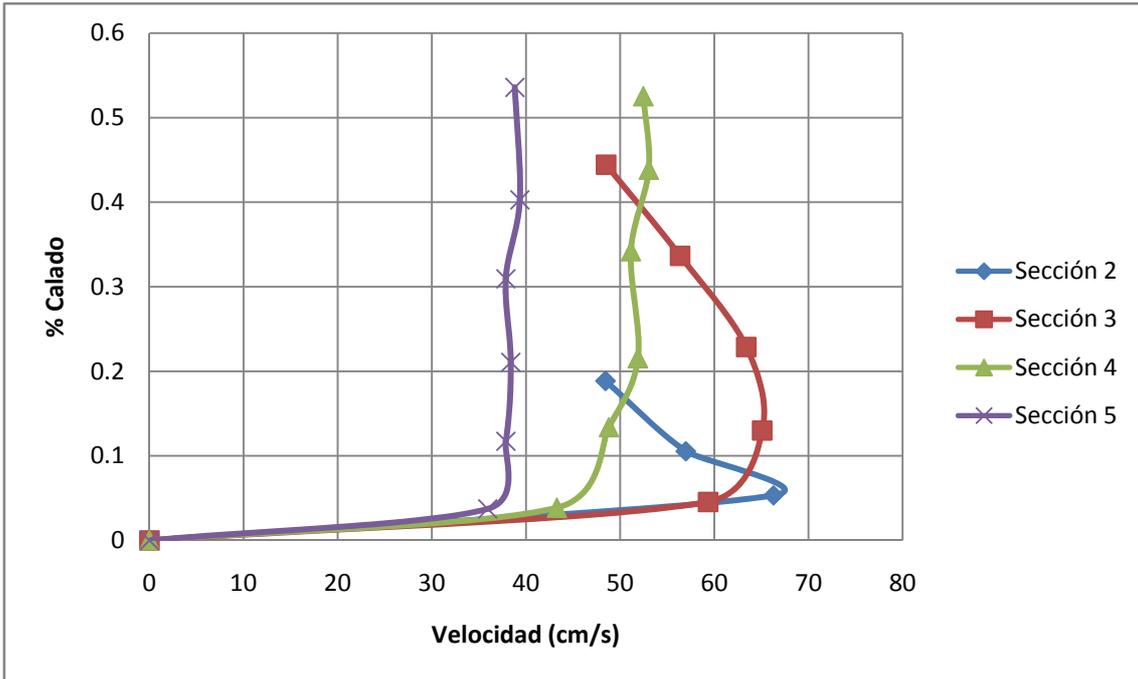


Figura A.I. 13. Perfiles de velocidad para resalto al pie y $Q= 10 \text{ m}^3/\text{h}$.

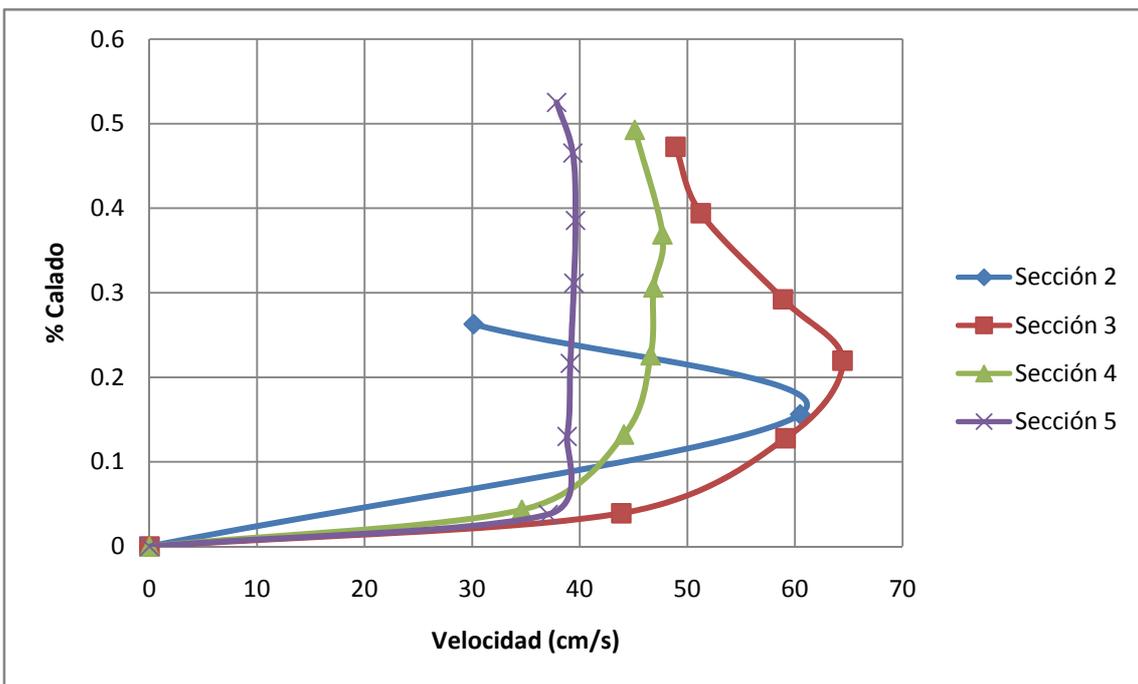


Figura A.I. 14. Perfiles de velocidad para resalto a 14 y $Q= 10 \text{ m}^3/\text{h}$.

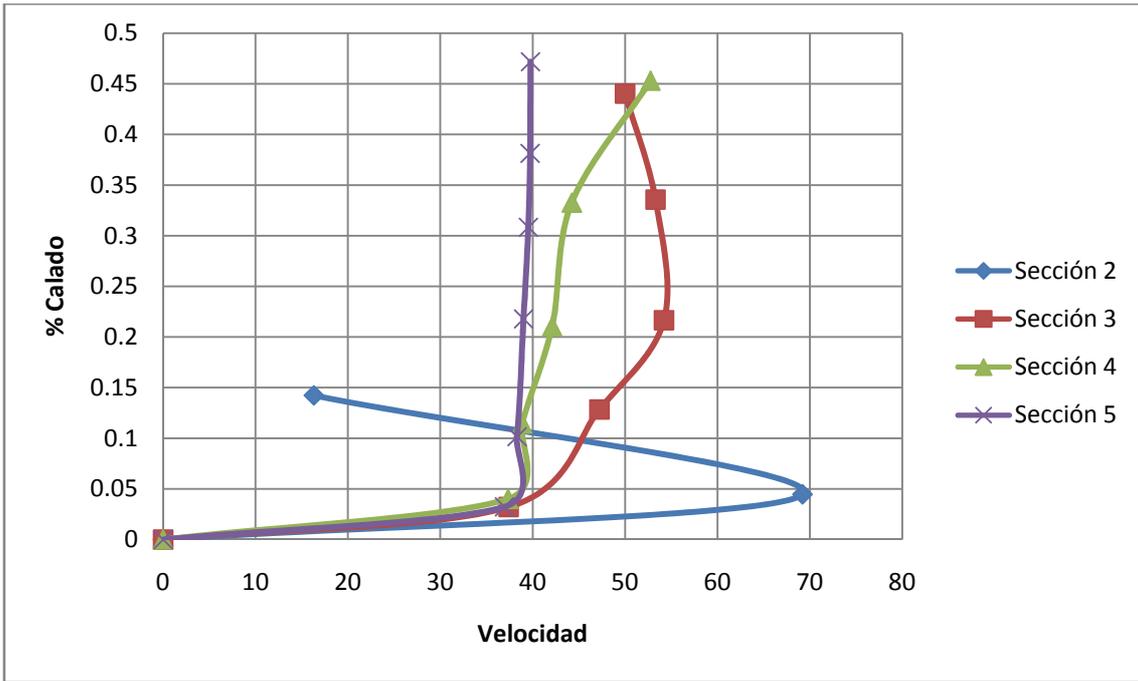


Figura A.I. 15. Perfiles de velocidad para resalto a 28 cm y $Q=10 \text{ m}^3/\text{h}$.

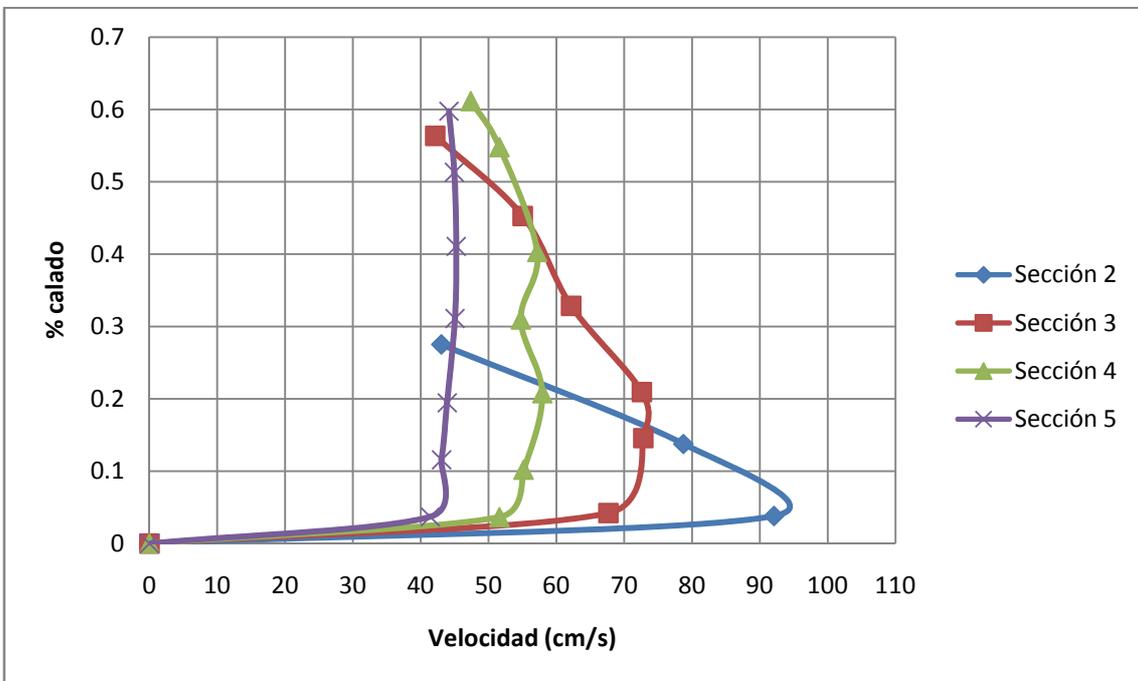


Figura A.I. 16. Perfiles de velocidad para resalto al pie y $Q=12.25 \text{ m}^3/\text{h}$.

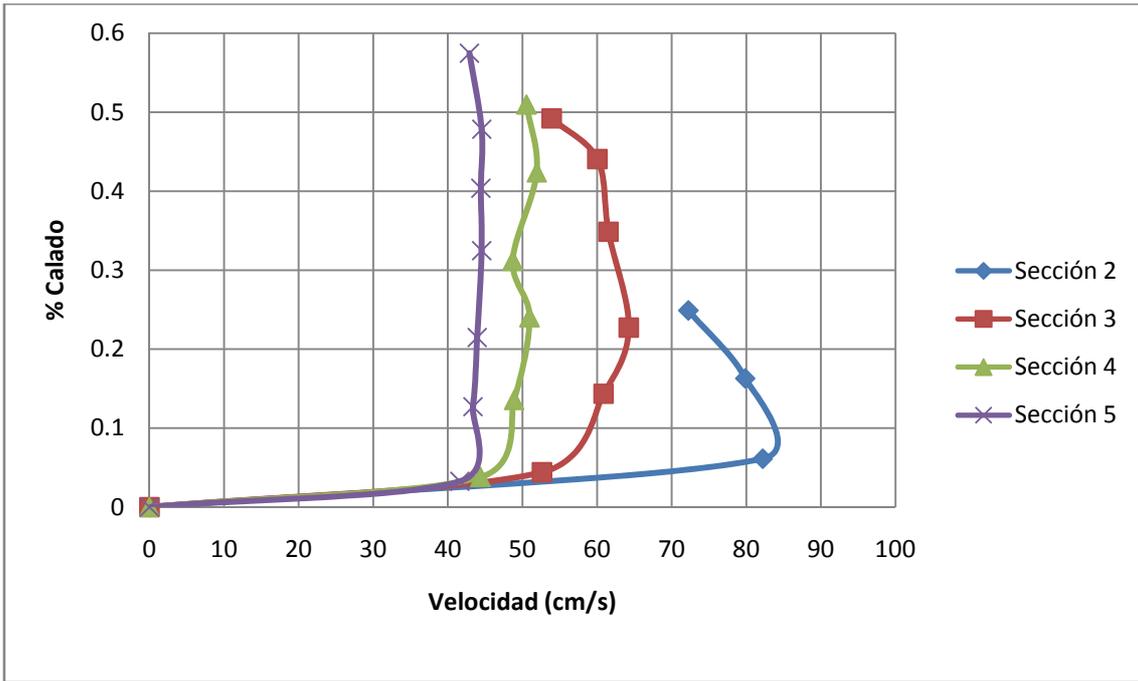


Figura A.I. 17. Perfiles de velocidad para resalto a 14 cm y $Q= 12.25 \text{ m}^3/\text{h}$.

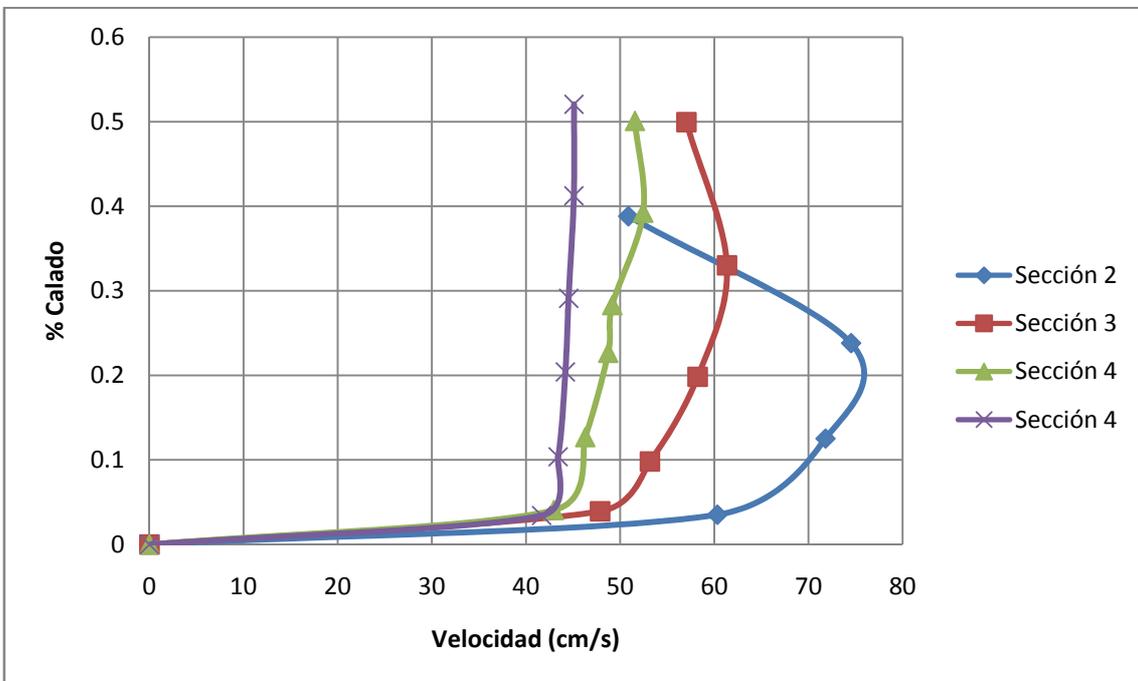


Figura A.I. 18. Perfiles de velocidad para resalto a 28 cm y $Q= 12.25 \text{ m}^3/\text{h}$.

ANEXO II

**RESULTADOS DEL FILTRADO A PARTIR
DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO**

El Anejo II contiene los datos de velocidad una vez filtrados digitalmente. La información se muestra tabulada en función del caudal y el desplazamiento. Para cada punto medido se muestra la velocidad, la distancia desde el fondo del canal al volumen de control y el número de filtrados realizados.

A continuación se explica la nomenclatura de los puntos:

Las dos primeras cifras corresponden al caudal de trabajo tomado del caudalímetro en m^3/h .

La tercera cifra hace referencia al desplazamiento siendo:

- 1 para resaltos al pie.
- 2 para resaltos a 14 cm.
- 3 para resaltos a 28 cm.

La cuarta cifra corresponde a la sección dentro del resalto y fuera del mismo en la que han sido medidos los puntos.

La letra final corresponde al orden de muestreo en cada sección respecto de la solera. Sea "a" el punto más cercano a la solera del canal para cada una de las secciones.

Datos Filtrados del resalto al pie con $Q = 4 \text{ (m}^3/\text{h)}$				
Archivo	$U_x(\text{cm/s})$	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 3				
0413a	52.48	0.32	4.75	4
0413b	55.16	0.82	12.17	4
0413c	51.69	1.31	19.44	3
Sección 4				
0414a	31.42	0.37	5.46	4
0414b	35.02	0.75	11.07	3
0414c	36.73	1.55	22.88	3
Sección 5				
0415a	24.08	0.27	3.74	0
0415b	24.67	0.73	10.12	0
0415c	24.44	1.71	2.72	1

Datos Filtrados del resalto a 14 cm con $Q = 4 \text{ (m}^3/\text{h)}$				
Archivo	$U_x(\text{cm/s})$	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 3				
0423a	32.05	0.34	5.43	4
0423b	38.10	0.79	12.62	2
0423c	38.58	1.20	19.17	2
Sección 4				
0424a	23.06	0.28	4.17	1
0424b	27.62	0.91	13.55	2
0424c	29.43	1.47	21.89	3
Sección 5				
0425a	23.97	0.30	4.26	2
0425b	24.90	0.80	11.36	2
0425c	24.92	1.70	24.15	2

Datos Filtrados del resalto a 28 cm con Q =4 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 3				
0433a	25.20	0.33	5.03	1
0433b	30.53	1.25	19.05	4
Sección 4				
0434a	22.57	0.33	4.88	2
0434b	26.76	1.16	17.16	3
0434c	27.24	1.50	22.19	4
Sección 5				
0435a	24.12	0.39	5.69	1
0435b	25.20	1.16	16.93	1
0435c	24.56	1.71	24.96	3

Datos Filtrados del resalto al pie Q = 5 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 3				
0513a	53.62	0.37	5.10	1
0513b	52.42	0.97	13.36	2
0513c	52.18	1.39	19.15	1
Sección 4				
0514a	34.98	0.35	4.59	3
0514b	38.80	1.04	13.65	4
0514c	39.20	1.65	21.65	4
0514d	41.97	2.41	31.63	4
Sección 5				
0515a	25.93	0.35	4.58	0
0515b	27.84	0.78	10.02	0
0515c	28.53	1.57	20.52	0
0515d	28.40	2.50	32.68	0

Datos Filtrados del resalto a 14 cm con $Q=5$ (m ³ /h)				
Archivo	U_x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 3				
0523a	28.62	0.36	5.22	3
0523b	34.30	0.85	12.34	4
0523c	39.52	1.58	22.93	2
Sección 4				
0524a	25.29	0.36	4.86	3
0524b	28.00	0.9	12.16	2
0524c	32.56	1.62	21.89	3
0524d	35.87	2.20	29.73	2
Sección 5				
0525a	26.29	0.36	4.69	0
0525b	27.79	0.80	10.42	0
0525c	28.37	1.59	20.70	0
0525d	28.10	2.57	33.46	3

Datos Filtrados del resalto a 28 cm con Q =5 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
0532a	42.87	0.76	10.97	4
Sección 3				
0533a	30.67	0.543	7.37	3
0533b	39.65	1.31	17.82	3
0533c	44.43	2.23	30.34	4
Sección 4				
0534a	23.11	0.34	4.52	2
0534b	24.93	1.42	18.87	4
0534c	30.42	2.26	30.04	3
Sección 5				
0535a	27.19	0.48	6.19	0
0535b	28.35	1.28	16.49	0
0535c	28.30	1.88	24.23	0
0535d	27.93	2.56	32.99	1

Datos Filtrados del resalto al pie Q =6 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
0612a	60.18	0.34	4.61	1
0612b	58.69	0.80	10.85	2
0612c	53.70	1.47	19.95	2
0612d	45.82	2.04	27.68	3
0612e	38.07	2.51	34.06	4
Sección 3				
0613a	36.96	0.39	4.87	3
0613b	42.64	0.9	11.24	3
0613c	44.19	1.46	18.23	3
0613d	42.91	2.07	25.84	4
0613e	42.47	2.82	35.21	4
Sección 4				
0614a	30.41	0.35	4.25	2
0614b	34.93	0.89	10.81	4
0614c	37.05	1.68	20.41	4
0614d	37.81	2.38	28.92	4
0614e	37.71	3.03	36.82	2
Sección 5				
0615a	27.16	0.37	4.37	1
0615b	30.02	1.11	13.12	0
0615c	30.53	1.84	21.75	0
0615d	30.71	2.32	27.42	0
0615e	30.26	3.05	36.05	0

Datos Filtrados del resalto a 14 cm con Q =6 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
0622a	39.69	0.5	7.12	3
0622b	41.46	1.12	15.95	3
0622c	42.99	1.96	27.92	4
Sección 3				
0623a	27.54	0.41	5.30	4
0623b	33.89	1.00	12.92	4
0623c	36.96	1.78	23.00	4
0623d	38.82	2.40	31.01	4
0623e	37.17	3.04	39.28	3
Sección 4				
0624a	25.62	0.48	5.80	2
0624b	28.36	1.13	13.66	4
0624c	30.87	1.89	22.85	4
0624d	31.93	2.40	29.02	4
0624e	33.26	3.06	37.00	4
Sección 5				
0625a	28.51	0.5	6.00	0
0625b	29.85	1.07	12.81	0
0625c	29.81	1.87	22.40	1
0625d	30.45	2.62	31.37	0
0625e	29.97	3.25	38.92	1

Datos Filtrados del resalto a 28 cm con Q=6 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
0632a	56.51	0.47	6.33	4
0632b	60.43	1.50	2.02	2
Sección 3				
0633a	27.75	0.45	5.53	4
0633b	42.13	1.42	17.44	2
0633c	42.14	2.34	28.75	3
0633d	44.75	2.89	35.50	3
Sección 4				
0634a	25.22	0.28	33.65	3
0634b	27.55	1.13	13.58	3
0634c	29.09	2.01	24.16	4
0634d	32.55	2.95	35.46	4
Sección 5				
0635a	28.89	0.45	5.40	1
0635b	30.31	1.21	14.54	0
0635c	30.58	1.91	22.96	0
0635d	30.88	2.39	28.73	0
0635e	30.63	3.06	36.78	1

Datos Filtrados del resalto al pie Q= 8 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 3				
0813a	38.79	0.39	4.33	3
0813b	44.70	1.20	13.33	4
0813c	43.53	1.94	21.56	4
0813d	41.66	2.67	29.67	4
0813e	36.94	3.25	36.11	2
0813f	32.82	4.05	0.45	4
Sección 4				
0814a	30.69	0.44	4.72	1
0814b	35.14	1.24	13.29	4
0814c	37.72	1.91	20.47	1
0814d	39.69	2.52	27.01	4
0814e	39.75	3.25	34.83	1
0814f	40.97	3.85	41.26	0
0814g	40.03	4.39	47.05	4
Sección 5				
0815a	33.11	0.38	3.95	0
0815b	34.07	1.21	12.56	0
0815c	34.39	1.84	19.10	1
0815d	34.73	2.61	27.10	0
0815e	34.57	3.41	35.41	1
0815f	34.75	4.04	41.95	1
0815g	33.93	4.51	46.83	1

Datos Filtrados del resalto a 14 cm con Q =8 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
0822a	41.32	0.51	6.63	4
0822b	47.42	1.20	15.60	4
0822c	38.53	2.21	28.74	4
0822d	37.15	2.97	38.62	4
Sección 3				
0823a	31.80	0.44	4.98	3
0823b	45.53	1.44	16.31	3
0823c	48.77	2.28	25.82	4
0823d	50.13	3.04	34.43	2
0823e	41.67	4.01	45.41	3
Sección 4				
0824a	31.62	0.36	3.80	3
0824b	35.44	1.00	10.55	4
0824c	37.05	1.92	20.53	4
0824d	40.97	2.89	30.49	4
0824e	40.80	3.88	40.93	3
0824f	39.23	4.48	47.26	3
Sección 5				
0825a	33.23	0.57	6.01	0
0825b	34.60	1.31	13.89	1
0825c	34.85	2.33	24.71	0
0825d	35.04	3.21	34.04	1
0825e	35.01	4.16	43.88	1

Datos Filtrados del resalto a 28 cm con Q=8 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
0832a	73.50	0.55	7.06	4
Sección 3				
0833a	30.64	0.32	3.80	3
0833b	42.53	1.13	13.40	2
0833c	52.42	2.13	25.27	2
0833d	51.33	3.14	37.25	2
Sección 4				
0834a	30.08	0.35	3.92	2
0834b	33.45	1.28	14.32	4
0834c	35.02	2.07	23.15	3
0834d	41.81	2.98	33.33	2
0834e	42.06	3.74	41.83	3
Sección 5				
0835a	31.95	0.32	3.58	0
0835b	33.79	1.16	12.98	0
0835c	34.47	2.08	23.27	1
0835d	35.19	3.33	37.25	0
0835e	35.27	3.97	44.41	1

Datos Filtrados del resalto al pie Q=10 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
1012a	66.28	0.43	5.33	2
1012b	56.97	0.70	8.68	2
1012c	48.44	1.52	18.86	3
Sección				
1013a	59.33	0.41	4.56	1
1013b	65.07	1.17	13.00	2
1013c	63.38	2.06	22.89	3
1013d	56.36	3.03	33.67	2
1013e	48.49	4.00	44.44	2
Sección 4				
1014a	43.27	0.36	3.86	3
1014b	48.79	1.25	13.39	3
1014c	51.88	2.01	21.54	4
1014d	51.13	3.19	34.30	2
1014e	53.03	4.09	43.52	3
1014f	52.46	4.90	52.52	4
Sección 5				
1015a	35.92	0.36	3.74	1
1015b	37.85	1.13	11.73	0
1015c	38.37	2.03	21.08	1
1015d	37.85	2.98	30.94	0
1015e	39.34	3.88	40.29	1
1015f	38.81	5.16	53.58	1

Datos Filtrados del resalto a 14 cm con Q =10 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
1022a	-	0.49	5.28	4
1022b	60.47	1.45	15.63	4
1022c	30.13	2.44	26.29	4
Sección 3				
1023a	43.85	0.39	3.93	2
1023b	59.11	1.27	12.10	2
1023c	64.41	2.18	21.98	2
1023d	58.88	2.90	29.23	2
1023e	51.24	3.91	39.42	2
1023f	48.89	4.69	47.28	2
Sección 4				
1024a	34.62	0.45	4.35	1
1024b	44.10	1.37	13.24	3
1024c	46.58	2.34	22.61	3
1024d	46.84	3.17	30.63	1
1024e	47.68	3.82	36.91	1
1024f	45.11	5.10	49.28	4
Sección 5				
1025a	37.06	0.4	3.86	0
1025b	38.82	1.37	13.24	1
1025c	39.12	2.28	22.03	1
1025d	39.45	3.28	31.69	0
1025e	39.60	4.06	39.23	0
1025f	39.35	4.90	47.34	0
1025g	37.85	5.53	53.43	4

Datos Filtrados del resalto a 28 cm con Q=10 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
1032a	69.20	0.37	4.46	1
1032b	16.32	1.18	14.23	4
Sección 3				
103a	37.39	0.31	3.21	1
1033b	47.22	1.24	12.85	2
1033c	54.21	2.09	21.66	1
1033d	53.29	3.24	33.58	1
1033e	49.99	4.25	44.04	3
Sección 4				
1034a	37.34	0.41	4.01	1
1034b	38.87	1.17	11.45	2
1034c	42.11	2.15	21.04	2
1034d	44.24	3.40	33.27	2
1034e	52.75	4.63	45.30	2
Sección 5				
1035a	36.94	0.35	3.38	0
1035b	38.30	1.1	10.65	0
1035c	39.01	2.36	22.85	1
1035d	39.53	3.34	32.33	0
1035e	39.72	4.13	39.98	0
1035f	39.76	5.11	49.47	0

Datos Filtrados del resalto al pie Q=12,25 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
1212a	92.09	0.34	3.80	1
1212b	78.73	1.15	12.86	4
1212c	43.04	2.46	27.52	4
Sección 3				
1213a	67.66	0.41	4.21	2
1213b	72.81	1.12	11.50	2
1213c	72.60	2.04	20.94	2
1213d	62.17	3.20	32.85	1
1213e	55.03	4.41	45.27	1
1213f	42.13	5.49	56.36	1
Sección 4				
1214a	51.61	0.38	3.65	1
1214b	55.17	1.06	10.92	1
1214c	57.93	2.16	20.77	2
1214d	54.75	3.22	30.96	0
1214e	57.17	4.19	40.29	2
1214f	51.61	5.70	54.80	3
1214g	47.38	6.36	61.15	1
Sección 5				
1215a	41.39	0.39	3.70	0
1215b	43.06	1.22	11.57	0
1215c	43.89	2.05	19.45	0
1215d	45.05	3.28	31.12	0
1215e	45.23	4.33	41.08	0
1215f	44.95	5.41	51.33	1
1215g	44.16	6.30	59.77	1

Datos Filtrados del resalto a 14 cm con Q =12,25 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
1222a	82.20	0.59	6.12	4
1222b	79.85	1.57	16.29	3
1222c	72.25	2.40	24.89	4
Sección 3				
1223a	52.61	0.48	4.42	3
1223b	60.86	1.56	14.35	3
1223c	64.24	2.47	22.72	4
1223d	61.52	3.79	34.87	2
1223e	60.03	4.79	44.07	2
1223f	53.90	5.35	49.22	2
Sección 4				
1224a	44.37	0.43	3.81	1
1224b	48.87	1.53	13.56	1
1224c	50.95	2.71	24.02	2
1224d	48.70	3.52	31.21	3
1224e	51.91	4.78	42.38	4
1224f	50.54	5.75	50.98	3
Sección 5				
1225a	41.60	0.38	3.26	0
1225b	43.36	1.48	12.71	0
1225c	43.93	2.50	21.48	0
1225d	44.52	3.78	32.47	0
1225e	44.42	4.70	41.67	0
1225f	44.53	5.57	49.38	1
1225g	42.88	6.69	57.47	2

Datos Filtrados del resalto a 28 cm con Q =12,25 (m ³ /h)				
Archivo	U _x (cm/s)	Distancia al límite (cm/s)	% calado	Filtros
Sección 2				
1232a	60.32	0.34	3.52	1
1232b	71.80	1.21	12.52	1
1232c	74.52	2.30	23.81	4
1232d	50.87	3.75	38.82	4
Sección 3				
1233a	47.86	0.42	3.93	3
1233b	53.15	1.05	9.82	2
1233c	58.22	2.12	19.83	4
1233d	61.34	3.53	33.02	1
1233e	57.03	5.34	49.95	1
Sección 4				
1234a	42.95	0.46	4.06	1
1234b	46.28	1.44	12.70	3
1234c	48.72	2.57	22.66	3
1234d	49.16	3.21	28.30	2
1234e	52.44	4.45	39.24	3
1234f	51.56	5.68	50.09	4
Sección 5				
1235a	41.65	0.39	3.43	2
1235b	43.40	1.18	10.38	2
1235c	44.17	2.32	20.40	0
1235d	44.52	3.31	29.11	0
1235e	45.07	4.69	41.25	0
1235f	45.08	5.92	52.07	2

ANEXO III

**CARACTERÍSTICAS DE LOS RESALTOS
HIDRÁULICOS**

En este anexo se muestran los resultados del muestreo limnimétrico para cada caudal y en función del desplazamiento.

y_1 = calado al inicio del resalto.

y_2 = calado al final del resalto.

b = ancho del canal (8 cm)

L_j = longitud del resalto hidráulico.

v_1 = velocidad al inicio del resalto. $V_1 = \frac{Q}{Y_1 * b}$

v_2 = velocidad al final del resalto. $V_2 = \frac{Q}{Y_2 * b}$

R_h = radio hidráulico. $R_h = \frac{Y_1 * b}{2Y_1 + b}$

F_1 = Froude al inicio del resalto. $F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * Y_1}}$

Re = numero de Reynolds al inicio del resalto. $Re = \frac{R_h * V_1}{\mu}$

H = nivel de la lámina aguas arriba del aliviadero.

Muestreo 1										
Q caudalímetro (m ³ /h)	Desplazamiento 0 cm					Muestreo 1				
	Q Real (m ³ /s)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)	L _j (cm)	V ₁ (cm/s)	V ₂ (cm/s)	R _e	F ₁	H (cm)	
2.5	0.001042	0.84	5.6	30	1.53	0.23	10633	5.34	18.3	
4	0.001490	1.13	6.775	35.25	1.63	0.27	14348	4.89	19.0	
5	0.001789	1.25	7.625	38	1.77	0.29	16831	5.05	19.3	
6	0.002088	1.68	8.23	50	1.53	0.31	18156	3.78	19.75	
7	0.002387	1.79	8.79	50	1.65	0.34	20358	3.93	20.1	
8	0.002686	2.04	9.33	54	1.63	0.36	21961	3.63	20.5	
9	0.002985	2.25	9.77	56	1.64	0.38	23585	3.49	20.7	
10	0.003283	2.35	10.4	60	1.73	0.39	25538	3.59	21.1	
11	0.003583	2.67	11.14	65	1.66	0.40	26527	3.24	21.5	
12.25	0.003956	2.80	11.28	70.5	1.74	0.43	28731	3.33	22.1	

Q caudalímetro (m ³ /h)	Desplazamiento 0 cm						Muestreo 2					
	Q Real (m ³ /s)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)	L _j (cm)	V ₁ (cm/s)	V ₂ (cm/s)	R _e	F ₁	H (cm)			
2.5	0.001042	0.90	5.63	30.00	1.43	0.23	10503	4.81	18.20			
4	0.001490	1.01	7.11	35.25	1.82	0.26	14692	5.79	19.00			
5	0.001789	1.22	7.82	38.00	1.81	0.28	16928	5.23	19.30			
6	0.002088	1.59	8.32	50.00	1.62	0.31	18448	4.11	19.75			
7	0.002387	1.77	9.09	50.00	1.66	0.32	20429	4.00	20.10			
8	0.002686	2.06	9.51	54.00	1.61	0.35	21889	3.58	20.50			
9	0.002985	2.26	10.01	56.00	1.63	0.37	23547	3.46	20.70			
10	0.003283	2.68	10.58	60.00	1.51	0.38	24276	2.95	21.10			
11	0.003583	2.75	11.08	65.00	1.61	0.40	26213	3.10	21.50			
12.25	0.003956	2.84	11.70	70.50	1.72	0.42	28563	3.26	22.10			

Muestreo 1										
Desplazamiento 14 cm										
Q caudalímetro (m^3/h)	Q Real (m^3/s)	y_1 (cm)	y_2 (cm)	L_j (cm)	V_1 (cm/s)	V_2 (cm/s)	R_e	F_1	H (cm)	
2.5	0.001042	0.85	5.26	26.50	1.51	0.24	10611	5.24	18.30	
4	0.001490	1.13	6.59	34.50	1.63	0.28	14348	4.89	19.00	
5	0.001789	1.35	7.24	36.00	1.64	0.31	16517	4.50	19.30	
6	0.002088	1.68	8.10	47.00	1.53	0.32	18'56	3.78	19.75	
7	0.002387	1.77	8.63	48.50	1.66	0.34	20429	4.00	20.10	
8	0.002686	2.05	9.21	50.00	1.62	0.36	21925	3.61	20.50	
9	0.002985	2.26	9.58	54.50	1.63	0.38	23547	3.46	20.70	
10	0.003283	2.39	10.19	55.00	1.70	0.40	25378	3.50	21.10	
11	0.003583	2.56	10.56	60.00	1.73	0.42	26972	3.45	21.50	
12.25	0.003956	2.79	11.30	69.00	1.75	0.43	28774	3.35	22.10	

		Desplazamiento 14 cm					Muestreo 2				
Q caudalímetro (m^3/h)	Q Real (m^3/s)	y_1 (cm)	y_2 (cm)	L_1 (cm)	V_1 (cm/s)	V_2 (cm/s)	R_e	F_1	H (cm)		
2.5	0.001042	0.88	5.36	26.50	1.46	0.24	10546	4.98	18.20		
4	0.001490	1.08	7.00	34.50	1.70	0.26	14489	5.23	19.00		
5	0.001789	1.26	7.57	36.00	1.75	0.29	16799	4.99	19.30		
6	0.002088	1.53	8.35	47.00	1.69	0.31	18648	4.35	19.75		
7	0.002387	1.79	8.93	48.50	1.65	0.33	20358	3.93	20.10		
8	0.002686	1.92	9.40	50.00	1.73	0.35	22406	3.98	20.50		
9	0.002985	2.27	9.91	54.50	1.62	0.37	23509	3.44	20.70		
10	0.003283	2.51	10.36	55.00	1.62	0.39	24910	3.26	21.10		
11	0.003583	2.55	10.95	60.00	1.73	0.40	27013	3.47	21.50		
12.25	0.003956	2.75	11.57	69.00	1.78	0.42	28944	3.42	22.10		

Muestreo 1										
Desplazamiento 28 cm										
Q caudalímetro (m^3/h)	Q Real (m^3/s)	y_1 (cm)	y_2 (cm)	L_j (cm)	V_1 (cm/s)	V_2 (cm/s)	R_e	F_1	H (cm)	
2.5	0.001042	0.85	5.57	21.50	1.51	0.23	10611	5.24	18.30	
4	0.001490	1.12	6.44	30.00	1.64	0.29	14376	4.96	19.00	
5	0.001789	1.29	7.54	38.00	1.71	0.29	16704	4.81	19.30	
6	0.002088	1.69	7.83	45.00	1.53	0.33	18124	3.75	19.75	
7	0.002387	1.81	8.46	41.00	1.63	0.35	20288	3.86	20.10	
8	0.002686	2.06	8.97	45.00	1.61	0.37	21889	3.58	20.50	
9	0.002985	2.29	9.40	51.50	1.61	0.39	23435	3.40	20.70	
10	0.003283	2.41	10.05	53.00	1.68	0.40	25299	3.46	21.10	
11	0.003583	2.61	10.42	59.00	1.69	0.42	26768	3.35	21.50	
12.25	0.003956	2.73	11.50	66.00	1.79	0.42	29030	3.46	22.10	

Muestreo 2									
Desplazamiento 28 cm									
Q caudalímetro (m ³ /h)	Q Real (m ³ /s)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)	L _j (cm)	V ₁ (cm/s)	V ₂ (cm/s)	R _e	F ₁	H (cm)
2.5	0.001042	0.85	5.20	21.50	1.51	0.25	10611	5.24	18.20
4	0.001490	1.17	6.74	30.00	1.57	0.27	14237	4.64	19.00
5	0.001789	1.29	7.54	38.00	1.71	0.29	16704	4.81	19.30
6	0.002088	1.50	8.23	45.00	1.72	0.31	18750	4.48	19.75
7	0.002387	1.77	8.66	41.00	1.66	0.34	20429	4.00	20.10
8	0.002686	1.90	9.28	45.00	1.75	0.36	22482	4.04	20.50
9	0.002985	2.25	9.86	51.50	1.64	0.37	23585	3.49	20.70
10	0.003283	2.47	10.18	53.00	1.64	0.40	25064	3.33	21.10
11	0.003583	2.65	10.80	59.00	1.67	0.41	26607	3.27	21.50
12.25	0.003956	2.85	11.31	66.00	1.71	0.43	28522	3.24	22.10

Muestreo 1									
Desplazamiento 56 cm									
Q caudalímetro (m^3/h)	Q Real (m^3/s)	y_1 (cm)	y_2 (cm)	L_1 (cm)	V_1 (cm/s)	V_2 (cm/s)	R_e	F_1	H (cm)
2.5	0.001042	0.94	5.17	20.00	1.37	0.25	10418	4.51	18.30
4	0.001490	1.14	6.44	28.00	1.61	0.29	14320	4.83	19.00
5	0.001789	1.37	7.19	36.00	1.61	0.31	16455	4.40	19.30
6	0.002088	1.68	7.83	40.00	1.53	0.33	18156	3.78	19.75
7	0.002387	1.78	8.46	38.00	1.66	0.35	20393	3.96	20.10
8	0.002686	2.09	8.97	43.50	1.59	0.37	21781	3.50	20.50
9	0.002985	2.20	9.40	49.50	1.68	0.39	23775	3.61	20.70
10	0.003283	2.37	10.05	48.00	1.71	0.40	25457	3.55	21.10
11	0.003583	2.55	10.42	50.00	1.73	0.42	27013	3.47	21.50
12.25	0.003956	2.70	11.50	60.00	1.81	0.42	29160	3.52	22.10

Q caudalímetro (m ³ /h)	Desplazamiento 56 cm							Muestreo 2				
	Q Real (m ³ /s)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)	L _j (cm)	V ₁ (cm/s)	V ₂ (cm/s)	R _e	F ₁	H (cm)			
2.5	0.001042	0.92	4.93	20.00	1.40	0.26	10460	4.66	18.20			
4	0.001490	1.19	6.52	28.00	1.55	0.28	14182	4.53	19.00			
5	0.001789	1.36	7.36	36.00	1.62	0.30	16486	4.45	19.30			
6	0.002088	1.65	7.89	40.00	1.56	0.33	18252	3.88	19.75			
7	0.002387	1.77	8.50	38.00	1.66	0.35	20429	4.00	20.10			
8	0.002686	2.11	9.06	43.50	1.57	0.37	21709	3.45	20.50			
9	0.002985	2.26	9.67	49.50	1.63	0.38	23547	3.46	20.70			
10	0.003283	2.50	10.08	48.00	1.62	0.40	24948	3.27	21.10			
11	0.003583	2.71	10.55	50.00	1.63	0.42	26369	3.17	21.50			
12.25	0.003956	2.80	11.19	60.00	1.74	0.44	28731	3.33	22.10			

BIBLIOGRAFÍA

- **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.

E.T.S.I. de Caminos, C. y P. de Valencia UPV.

- **Carrillo, J. M. (2004)**. “Determinación Experimental de distribuciones de velocidades e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos”. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.

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

- **Castillo-E, L.G. (2008)**. “Validation of instantaneous velocities measurements with ADV equipment in turbulent high two-phase flows”. The Eight International Conference on Hydro-Science and Engineering (ICHE-2008). Nagoya, Japan, September, 8-12 (Aceptado para publicación).

- **French H. R. (1988)**. “Hidráulica de canales abiertos”. McGraw-Hill.

- **Hager, W. H. (1992)**. “Energy dissipators and hydraulic jump”. Water Science and Technology Library. Ed. Kluwer Academic Publishers.

- **Harleman, D. R. F. (1958)**. “Discussion of Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump”. Proc. ASCE, Hy., 6, Nov.

- **Leutheusser, H. J. y Kartha, V. C., (1972)**. “Effects of Inflow Condition on Hydraulic Jump”. Proc. ASCE, Hy., Aug.

- **Márquez Mulero, A. (2005)**. “Adaptación de un canal de laboratorio, medidas de velocidades instantáneas y filtrado de datos en algunos tipos de resaltos hidráulicos”. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniero Técnico de Obras Públicas, especialidad en Hidrología. Universidad Politécnica de Cartagena.

- **Márquez, MC. (2006)**. “Caracterización paramétrica de resaltos hidráulicos libres y sumergidos a partir de medidas de velocidades instantáneas con equipo Doppler”.

Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.

- **Naudascher, E. (2002)**. “Hidráulica de canales. Diseño de estructuras”. Ed. Limusa.
- **Rajaratnam, N. (1965)**. “The Hydraulic Jump as a Wall Jet”. Proc. ASCE, Hy., Sept.
- **Ranga Raju, K. G. (1998)**. “Flow Through Open Channels” Ed. Tata McGraw-Hill.
- **Silvester, R. (1964)**. “Hydraulic Jump in All Shapes on Horizontal Channels”. ASCE. Journal of the Hydraulic Division, vol. 90, no. Hy. 1, January, pp. 23-55.
- **Sontek ADV Field (2001)**. “Acoustic Doppler Velocimeter”. Technical Documentation.
- **Ven Te Chow (1998)** “Hidráulica de canales abiertos” Ed. McGraw-Hill.
- **Wilson, E. H. y Turner, A. A., (1972)**. “Boundary Layer Effects on Hydraulic Jump Location”. Proc. ASCE, Hy., July.