

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE DISIPACIÓN DE
ENERGÍA, DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES Y
RESISTENCIA AL FLUJO DE UNA RÁPIDA CON FONDO
ESCALONADO CON RELACIÓN ALTURA (h)-
LONGITUD DE GRADA (l) DE $h/l = 0.10$.**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JUAN CARLOS ESPINOSA GARCÍA

JUAN CARLOS MERA TOBAR

DIRECTOR: PROF. ING. CIRO G. MENÉNDEZ

Quito, Octubre 2007

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Carlos Espinosa García y Juan Carlos Mera Tobar, bajo mi supervisión.

Prof. Ing. Ciro Menéndez
DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Juan Carlos Espinosa García y Juan Carlos Mera Tobar, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y que se ha investigado en todas las referencias bibliográficas que se mencionan en este proyecto de titulación.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Juan Carlos Espinosa García

Juan Carlos Mera Tobar

Agradecimiento

A Dios por darme la vida y por cuidarme siempre, por darme cada día la oportunidad de ser una mejor persona, y por darme una gran familia.

A mi Mamá, Beatriz; por todos sus sacrificios y por toda la dedicación para que sus hijos sean mejores seres humanos y buenos profesionales, por todos los valores que nos ha inculcado, por su amor y buen ánimo, pero sobre todo por enseñarnos a ser sinceros y responsables de nuestros actos.

A mi Papá, Fausto; por darme el respaldo necesario para concluir mis estudios.

A mis Hermanos David y Hernán por que siempre nos hemos apoyado y nunca nos hemos dejado vencer por la adversidad.

A mis Abuelitos Alberto y Beatriz por todos sus buenos consejos y su demostración de amor y unidad.

A mis Tíos Carlos y Fernando y a mi Tía Susana por su ilimitado apoyo, sus acertados consejos y su infaltable empuje para poder llegar ahora a la meta.

A mi novia María Fernanda, gracias mi amor por tu comprensión, tu apoyo incondicional, tu alegría, tu sencillez y tu generosidad, este es el principio para cumplir todos nuestros objetivos.

A mis buenas amigas Alexandra, Verónica y Cristina por toda la ayuda brindada incondicionalmente a lo largo de la carrera y por todos los buenos momentos que pasamos juntos.

Gracias Juan Carlos M. por compartir esta experiencia, por ser como un hermano y por trabajar juntos para cumplir una meta más en la vida.

Como olvidarme de los Buenos Muchachos de la Barricada, a todos un agradecimiento especial por compartir buenos momentos dentro y fuera de la universidad, gracias por el apoyo desmedido, por escuchar y por saber dar un buen consejo. Gracias Santiago, Alex, Samir, Carlos, Jorge J., Pablo, Andrés, Gustavo, Jorge C. y todos los que faltan.

Un agradecimiento especial al Prof. Ing. Ciro Menéndez por que sin su ayuda y sin su dirección este trabajo no seria una realidad de calidad.

De la misma manera un agradecimiento especial a Don Marcelo Ángulo por su desinteresada colaboración en la primera etapa de este proyecto.

Juan Carlos Espinosa G.

Agradecimiento

A Dios por permitirme alcanzar una nueva meta en mi vida, a mis padres por el gran sacrificio que significó para ellos el cumplir este sueño, a mis hermanos por su aliento y apoyo incondicional, a mi esposa por luchar hombro a hombro a mi lado, a mi familia por su constante preocupación, a Juan Carlos compañero de trabajo y un hermano más, al Ing. Ciro Menéndez por su apoyo y toda la colaboración prestada durante este trabajo, a los señores profesores miembros del tribunal calificador por su contribución y cordial acogida, a la Facultad de Ingeniería Civil por abrirme sus puertas, al “señor” Montúfar por las bases y principios inculcados y a todos los “muchachos” por todos esos gratos momentos que hemos compartido como hermanos.

Juan Carlos Mera T.

Dedicatoria

*A mi Mamá Beatriz
A mis Hermanos Hernán y David*

Juan Carlos Espinosa G.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a los verdaderos forjadores de este sueño, mis padres, porque las distancias se reducen cuando el amor y la unión familiar son tan fuertes. A Ramiro y Paúl, mis amigos y hermanos, porque la distancia no logró, ni logrará separarnos. A Maribel, por ser mi apoyo cuando me encontré solo, mi voz de aliento cuando las circunstancias eran adversas y principalmente porque la amo. A Nicole, la luz de mi vida, mi nueva razón de luchar, a quién le dedico este y todos mis futuros logros.

Juan Carlos Mera T.

RESUMEN

Este estudio previo a la obtención del título de Ingeniero Civil fue realizado para analizar las características del flujo sobre rápidas con fondo escalonado libre y con umbrales colocados al extremo de cada grada y para determinar la disipación total de energía en el extremo aguas abajo de las estructuras, así como la distribución de presiones sobre los escalones y las relaciones de resistencia al flujo existentes. Para las mediciones se utilizaron dos modelos hidráulicos con relaciones de altura (h) / longitud (l) = 0.10, con $h = 0.0625$ m, para rápida con seis gradas en posición horizontal e inclinada el 4% y con umbrales y con $h = 0.03125$ m, para rápida con 12 escalones en posición horizontal e inclinada el 4%. Hacia aguas arriba del inicio de la rápida se dispuso de un tramo de 1.0 m de longitud y 0.15 m de ancho para el flujo de aproximación a las gradas, y una transición en curva con perfil elíptico de relación 1:2 para unir el ancho del canal de 1.0 m con el ancho del canal del modelo de 0.15 m. Hacia el extremo inferior de la rápida, se dispuso de un tramo recto de canal de sección rectangular de 0,15 m. y 1.00 m. de longitud. Para la realización de los ensayos, se usó un canal de laboratorio de 25 m de largo, 0.80 m de alto y 1.0 m. de ancho. Durante las pruebas realizadas para un rango de caudales desde 5.72 l/s hasta 55.77 l/s (Litros/segundo), se observaron los flujos escalón a escalón, en transición y rasante y se midieron parámetros hidráulicos como: velocidad del flujo, calados de agua y cargas piezométricas a lo largo del las rápidas con fondo escalonado. Después del procesamiento de datos, los resultados obtenidos fueron analizados a partir de la ecuación de Bernoulli y comparados con las ecuaciones analíticas dadas para el régimen de flujo rasante por Chanson. Como conclusión, la disipación máxima de energía obtenida para flujo rasante es de 50% para la rápida con umbrales y de 41.2% para las rápidas libres, siendo evidente la influencia del umbral además del caudal circulante. Las cargas piezométricas medidas no presentaron tendencias al fenómeno de cavitación. Por último para el coeficiente de Manning, los valores adoptados para las rápidas analizadas varían entre 0.02 y 0.028.

ABSTRACT

This study, prior obtaining the degree as a civil engineer, was carried out you analyze the characteristics of the flow on rapids with free stepped bottom and thresholds placed to the end of each step to determine the total dissipation of energy in the downstream water end of the stepped chutes, as well as the distribution of the pressures on the steps and the relationships of resistance to the flow. For the measures, two hydraulic models were used in relation of height (h), length (l) = 0.10, with h = 0.0625 m., to a rapid whit six steps in horizontal and inclined to 4% and with thresholds and with h = 0.03125 m. for a rapid with twelve steps in horizontal and inclined to 4%. To upstream water of the start of rapid, a section of 1.0 m. long and 0.15 m. wide was disposed for the flow of the approximation to the steps and a transition in contour line with elliptic outline in relation 1:2 to join the width of the channel of 1.0 m. with the width of the channel of the model of 0.15 m. To the lower end of the rapid, a straight section of the channel of rectangular section of 0.15 m. and 1.0 m. long was disposed. For the completion of the tests, a laboratory channel of 25 m. long, 0.80 m high and 1.0 m. wide was used. During the tests carried out for a range of flow from 5.72 l/s to 55.77 l/s (liters / second), we observed the nappe flow regimen, in transition and skimming flows and we measured hydraulic parameters as flow speed, water depth and piezometric charges to the length of the rapids with stepped bottom. After the data process, the obtained results were analyzed from the equation of Bernoulli and compared with the analytic equations given for the skimming flow regimen by Chanson. As a conclusion, the top dissipation of energy obtained for skimming flow is 50% for a rapid with threshold and 41.2% for the free rapids, so it is evident the influence of the threshold as well as the circulating flow. The piezometric charges did not present a tendency to the cavitation phenomenon. Finally, for the coefficient of Manning, the measures adopted for the analyzed rapids vary between 0.02 and 0.028.

CONTENIDO

		PÁGINA
CAPITULO 1		1
1	ANTECEDENTES	1
1.1	RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.2	OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	5
1.2.1	OBJETIVO GENERAL	5
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3	INFRAESTRUCTURA DISPONIBLE PARA LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES	6
1.3.1	MAQUINAS Y HERRAMIENTAS	6
1.3.2	SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE FLUJOS	7
1.3.3	CANAL HIDRODINÁMICO	8
1.3.4	EQUIPOS DE MEDICIÓN	9
CAPITULO 2		7
2	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE FLUJOS EN RÁPIDAS ESCALONADAS DE RELACIÓN $H/L = 0.10$ CON SEIS GRADAS	10
2.1	ESTRUCTURA DE LOS REGÍMENES DE FLUJO GRADA A GRADA, RASANTE Y EN TRANSICIÓN	10
2.1.1	CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO	10
2.1.2	FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN (NAPPE FLOW)	11
2.1.3	FLUJO EN TRANSICIÓN.	13
2.1.4	FLUJO RASANTE (SKIMMING FLOW)	15
2.2	BREVE DESCRIPCIÓN DE ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA.	18
2.3	BREVE DESCRIPCIÓN DE ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES	21
2.4	ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE AIREACIÓN.	24
2.5	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL CANAL ESCALONADO CON RELACIÓN ALTURA (H) - LONGITUD DE GRADA (L), $H/L = 0.10$ Y SEIS GRADAS	25
2.5.1	MODELACIÓN FÍSICA DEL PROTOTIPO	25
2.5.1.1	INTRODUCCIÓN	25
2.5.1.2	ANÁLISIS DIMENSIONAL	27
2.5.1.2.1	INTRODUCCIÓN	27
2.5.1.2.2	SIMILITUD DINÁMICA	27
2.5.1.3	ANÁLISIS DIMENSIONAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA CON RELACIÓN $H/L = 0.10$	28
2.5.1.4	DESARROLLO DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL	29
2.5.1.5	RESTRICCIONES QUE DEBEN CONSIDERARSE EN EL ANÁLISIS DEL FLUJO EN CANALES CON FONDO ESCALONADO	30
2.5.2	PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	32
2.5.3	DISEÑO	33

	PÁGINA	
2.5.4	CONSTRUCCIÓN	39
2.5.4.1.	MATERIALES	39
2.5.4.2	EQUIPO DE MANO	40
2.5.4.3	MAQUINARIA	40
2.5.4.4	PROCEDIMIENTO	41
2.5.5	MONTAJE	43
2.5.5.1	PROCEDIMIENTO	43
2.6	PLAN DE PRUEBAS PARA RÁPIDA ESCALONADA CON GRADA HORIZONTAL PARA LA RELACIÓN ALTURA (H) / LONGITUD (L) $H/L = 0.10$	44
2.6.1	CAUDALES A SER ENSAYADOS	44
2.6.2	DETERMINACIÓN DE CALADOS Y PERFILES DE FLUJO	45
2.6.3	MEDICIONES DE VELOCIDAD	47
2.6.4	MEDICIONES DE PRESIÓN	48
2.7	METODOLOGÍA DEL PROCESO EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO PARA DIFERENTES RÉGIMENES DE FLUJO	50
2.7.1	DETERMINACIÓN DE LÍMITES PARA LOS TIPOS DE FLUJOS QUE SE PRESENTAN EN LA RÁPIDA ESCALONADA DE RELACIÓN $H/L = 0.10$	50
2.7.1.1	LÍMITE INFERIOR DE LA ALTURA DEL ESCALÓN PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN	50
2.7.1.2	LÍMITE INFERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO EN TRANSICIÓN	52
2.7.1.3	LÍMITE SUPERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO EN TRANSICIÓN	53
2.7.1.4	LÍMITE SUPERIOR DE LA ALTURA DEL ESCALÓN PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO RASANTE	54
2.7.1.5	LÍMITE INFERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DE FLUJO RASANTE	54
2.8	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	55
2.8.1	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO GRADA A GRADA.	57
2.8.1.1	PERFIL DE FLUJO	57
2.8.1.2	VELOCIDADES MEDIDAS CON EL MICROMOLINETE. (TABLA 2.8.2.a)	59
2.8.1.3	VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO (H)	60
2.8.1.4	CARGAS PIEZOMÉTRICAS PROMEDIO.	61
2.8.1.5	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.	62
2.8.1.6	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN 2.2.4 PARA FLUJO GRADA A GRADA	65
2.8.2	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO RASANTE	66
2.8.2.1	PERFIL DE FLUJO	66
2.8.2.2	VELOCIDADES MEDIDAS CON EL MICROMOLINETE	68
2.8.2.3	VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO	69
2.8.2.4	CARGAS DE PRESIÓN	70
2.8.2.5	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.	71
2.8.2.6	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN 2.2.5	73
2.8.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DATOS PROCESADOS.	74

2.8.3.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA.	74
2.8.3.2	PERFIL DE FLUJO.	74
2.8.3.3	DISIPACIÓN DE ENERGÍA.	76
2.8.3.4	DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES	79
2.8.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE	83
2.8.2.1	PERFIL DE FLUJO.	83
2.8.2.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA.	85
2.8.2.3	DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.	87
2.9	OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE DARCY - WEISBACH Y DE RUGOSIDAD DE MANNING	91
2.9.1	PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN	91
2.9.2	PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE DE MANNING	93
2.9.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN Y DE MANNING	96
2.9.3.1	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	96
2.9.3.2	COEFICIENTE DE MANNING	97
2.10.	CONCLUSIONES	98
2.10.1	FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN - CONCLUSIONES	98
2.10.2	FLUJO RASANTE - CONCLUSIONES	99
2.11	RESULTADOS EXPERIMENTALES CON GRADA INCLINADA EL 4%, MODELO CON SEIS GRADAS	102
2.11.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES EN UNA RÁPIDA ESCALONADA PARA $H/L = 0.10$ CON GRADAS INCLINADAS EL 4 %.	102
2.11.1.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA.	102
2.11.1.1.1	PERFIL DE FLUJO	102
2.11.1.1.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA	103
2.11.1.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE	104
2.11.1.2.1	PERFIL DE FLUJO.	104
2.11.1.2.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA.	105
2.11.1.2.3	DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.	106
2.11.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN Y MANNING	110
2.11.2.1	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	110
2.11.2.2	COEFICIENTE DE MANNING	111
2.11.3	CONCLUSIONES	112
2.11.3.1	FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN - CONCLUSIONES	112
2.11.3.2	FLUJO RASANTE - CONCLUSIONES	112
	CAPITULO 3	115
3.1	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	115
3.1.1	PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS ESCALONADAS $H/L = 0.1$, DOCE ESCALONES	115

	PÁGINA	
3.1.1.1	DISEÑO.	115
3.1.1.2	CONSTRUCCIÓN	117
3.1.1.2.1	PROCEDIMIENTO	117
3.1.1.3	MONTAJE	119
3.1.1.3.1	PROCEDIMIENTO	119
3.2	PLAN DE PRUEBAS DEL PROCESO EXPERIMENTAL	121
3.2.1	PLAN DE PRUEBAS PARA RÁPIDA ESCALONADA CON GRADA HORIZONTAL PARA LA RELACIÓN ALTURA (H) / LONGITUD (L) $H/L = 0.10$	121
3.2.1.1	CAUDALES A SER ENSAYADOS	121
3.2.1.2	DETERMINACIÓN DE CALADOS Y PERFILES DE FLUJO	122
3.2.1.3	MEDICIONES DE VELOCIDAD.	124
3.2.1.4	MEDICIONES DE CARGAS PIEZOMÉTRICAS	125
3.3	METODOLOGÍA DEL PROCESO EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO PARA DIFERENTES RÉGIMENES	127
3.3.1	DETERMINACIÓN DE LÍMITES PARA LOS TIPOS DE FLUJOS QUE SE PRESENTAN EN LA RÁPIDA ESCALONADA DE RELACIÓN $H/L = 0.10$	127
3.3.2	LÍMITE INFERIOR DE LA ALTURA DEL ESCALÓN PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN	127
3.3.3	LÍMITE INFERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO EN TRANSICIÓN	129
3.3.4	LÍMITE SUPERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO EN TRANSICIÓN	130
3.3.5	LÍMITE SUPERIOR DE LA ALTURA DEL ESCALÓN PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO RASANTE	131
3.3.6	LÍMITE INFERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DE FLUJO RASANTE	132
3.4	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	133
3.4.1	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	133
3.4.1.1	PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA FLUJO GRADA A GRADA	134
3.4.1.1.1	PERFIL DE FLUJO.	134
3.4.1.1.2	VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO	136
3.4.1.1.3	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI	138
3.4.1.1.4	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN 2.2.3 INDICADA EN EL CAPITULO 2	141
3.4.1.2	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO RASANTE	142
3.4.1.2.1	PERFIL DE FLUJO	142
3.4.1.2.2	VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO	144
3.4.1.2.3	CARGAS PIEZOMÉTRICAS.	145
3.4.1.2.4	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.	145
3.4.1.2.5	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA APLICANDO LA ECUACIÓN 2.2.5 INDICADA EN EL CAPITULO 2	147
3.4.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DATOS PROCESADOS.	148
3.4.2.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA.	148
3.4.2.1.1	PERFIL DE FLUJO.	148

	PÁGINA	
3.4.2.1.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA.	150
3.4.2.1.3	DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES	152
3.4.2.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE	157
3.4.2.2.1	PERFIL DE FLUJO.	157
3.4.2.2.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA.	159
3.4.2.2.3	DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.	160
3.5	OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE DARCY - WEISBACH Y DE RUGOSIDAD DE MANNING	165
3.5.1	PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN	165
3.5.2	PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE DE MANNING	166
3.5.2.1	EJEMPLO DE CALCULO PARA CAUDAL PROTOTIPO $Q_P = 8.05 \text{ M}^3/\text{S}$	167
3.5.2.1.1	COEFICIENTE DE MANNING TOTAL (PARA TODO EL MODELO)	167
3.5.2.1.2	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	167
3.5.2.1.3	COEFICIENTE DE MANNING	168
3.6	CONCLUSIONES	170
3.6.1	FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN - CONCLUSIONES	170
3.6.2	FLUJO RASANTE - CONCLUSIONES	171
3.7	RESULTADOS EXPERIMENTALES CON GRADA INCLINADA EL 4% DOCE GRADAS	173
3.7.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS EN UNA RÁPIDA ESCALONADA PARA $H/L = 0.10$ CON GRADAS INCLINADAS EL 4%	173
3.7.1.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE	173
3.7.1.1.1	PERFIL DE FLUJO	173
3.7.1.1.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA	174
3.7.1.1.3	DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.	175
3.7.1.1.4	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	181
3.7.1.1.5	COEFICIENTE DE MANNING	182
3.7.1.3	FLUJO RASANTE - CONCLUSIONES	184
CAPITULO 4		186
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES DE FLUJOS EN RÁPIDAS ESCALONADAS CON UMBRALES COLOCADOS EN EL BORDE DE LA GRADA PARA LA RELACIÓN $H/L = 0.10$ Y SEIS GRADAS	186
4.1	INTRODUCCIÓN	186
4.2	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL	187
4.2.1	REGÍMENES DE FLUJO	187
4.2.2	FLUJO UNIFORME	189
4.2.3	RESISTENCIA AL FLUJO	189
4.2.4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	191
4.3	PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS ESCALONADAS CON UMBRALES UBICADOS EN EL EXTREMO DE LA CARA HORIZONTAL	192

	PÁGINA	
4.3.1	DISEÑO.	192
4.3.2	CONSTRUCCIÓN	194
4.3.2.1	PROCEDIMIENTO	195
4.3.3	MONTAJE	195
4.3.3.1	PROCEDIMIENTO	195
4.4	PLAN DE PRUEBAS PARA RÁPIDA ESCALONADA CON GRADA HORIZONTAL PARA LA RELACIÓN ALTURA (H) / LONGITUD (L) $H/L = 0.10$, CON UMBRALES UBICADOS EN EL EXTREMO DE LA CARA HORIZONTAL	196
4.4.1	CAUDALES A SER ENSAYADOS	196
4.4.2	DETERMINACIÓN DE CALADOS Y PERFILES DE FLUJO	197
4.4.3	MEDICIONES DE CARGAS PIEZOMÉTRICAS	198
4.5	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA GRADA HORIZONTAL CON UMBRAL	200
4.5.1	PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA FLUJO GRADA A GRADA	200
4.5.1.1	PERFIL DE FLUJO.	201
4.5.1.2	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN 4.2.4 INDICADA EN EL CAPITULO 4	203
4.5.1.3	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI	204
4.5.2	PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA FLUJO RASANTE	208
4.5.2.1	PERFIL DE FLUJO.	208
4.5.2.2	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN 4.2.5 INDICADA EN EL CAPITULO 4	210
4.5.2.3	CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI	211
4.5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO GRADA A GRADA	214
4.5.3.1	PERFIL DE FLUJO	214
4.5.3.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA	216
4.5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE	218
4.5.4.1	PERFIL DE FLUJO	218
4.5.4.2	DISIPACIÓN DE ENERGÍA	220
4.6	CONCLUSIONES	222
4.6.1	RÉGIMEN EN FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN - CONCLUSIONES	222
4.6.2	RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE - CONCLUSIONES	224
CAPITULO 5		226
5	ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA SEIS Y DOCE GRADAS	226
5.1	RELACIONES DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA	226
5.1.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA	226
5.1.2	COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO RASANTE	228
5.2	RELACIONES DE RESISTENCIA AL FLUJO	230

5.2.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN PARA RÉGIMEN DE FLUJO RASANTE	230
5.2.2	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE MANNING PARA RÉGIMEN DE FLUJO RASANTE	232
5.3	RELACIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES	233
CAPITULO 6		239
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	239
6.1	CONCLUSIONES	239
6.2	RECOMENDACIONES	246
CAPITULO 7		247
7	ANEXOS	247
7.1	PROCESAMIENTO DE DATOS	247
7.1.1	RÁPIDA ESCALONADA LIBRE, CANAL HORIZONTAL Y SEIS ESCALONES	247
7.1.2	RÁPIDA ESCALONADA LIBRE, CANAL INCLINADO Y SEIS ESCALONES	247
7.1.3	RÁPIDA ESCALONADA LIBRE, CANAL HORIZONTAL Y DOCE ESCALONES	247
7.1.4	RÁPIDA ESCALONADA LIBRE, CANAL INCLINADO Y DOCE ESCALONES	247
7.1.5	RÁPIDA ESCALONADA CON UMBRALES, CANAL HORIZONTAL Y SEIS ESCALONES	247
7.1.6	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTE ESTUDIO	247
CAPITULO 8		248
8	BIBLIOGRAFÍA	248
8.1	REFERENCIAS	249
ANEXOS: PROCESAMIENTO DE DATOS, FOTOGRAFÍAS Y VIDEOS ARCHIVO DIGITAL EN CD ADJUNTO		

CAPITULO 1.

1. ANTECEDENTES

El Programa de Saneamiento Ambiental de la EMAAP-Q, tiene como objetivos entre otros, disminuir el riesgo de ocurrencia de inundaciones y aluviones originada en las laderas del Centro Histórico de Quito. Para ello requiere realizar diseños de obras de alcantarillado, entre las cuales una de especial interés para vencer las fuertes pendientes y controlar las velocidades de flujo es el colector con fondo escalonado.

Los colectores con fondos escalonados son estructuras que se han venido utilizando en los sistemas de alcantarillado de Quito, tienen pendientes longitudinales entre 10 y 15 %, y para tales pendientes la bibliografía existente sobre resultados de estudios experimentales en canales con fondos escalonados reporta muy poca información técnica respecto a los criterios de diseño y a las características hidráulicas del comportamiento del flujo que transita por estas estructuras, por lo que se hace necesario estudiar su efectividad en relación con los perfiles y patrones de flujo, coeficientes de rugosidad, disipación de energía y distribución de presiones.

La Escuela Politécnica Nacional (EPN), tiene como misión: generar, asimilar y adaptar, transmitir y difundir, aplicar, transferir y gestionar el conocimiento científico y tecnológico, para contribuir al desarrollo sostenido y sustentable de nuestro país, como resultado de una dinámica interacción con los actores de la sociedad ecuatoriana y la comunidad internacional.

En esta línea de acción y relacionado con investigaciones en rápidas o canales escalonados, el Laboratorio de Investigaciones Hidráulica del Centro de Investigaciones y Estudio en Recursos Hídricos CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional, utilizando un canal de 25 m de largo, de 1m de ancho y 0.80 m de altura y con una pendiente longitudinal que varía hasta un 4%, ha realizado ensayos en laboratorio, previos al propuesto para este estudio, con relaciones altura de grada (h) y longitud de grada (l) de rápidas escalonadas (h/l) de 0.5 y 0.4, variando la altura de las gradas, con y sin tabiques longitudinales en los escalones. En estos experimentos, para caudales de hasta 170 l/s, se ha determinado disipaciones de energía al pie de la rápida o canal, que varían entre el 50 y 80 %, dependiendo del caudal y del número de gradas, y se ha determinado carga de presiones tanto en la cara vertical como horizontal de la grada que no afectan a las estructuras. (REF. 1)

Con base en estas experiencias logradas a través de proyectos de titulación de estudiantes de la carrera de ingeniería Civil de la EPN, el CIERHI, planteó en su oportunidad al Programa de Saneamiento Ambiental PSA de la Empresa de Agua Potable y Alcantarillado de Quito EMAAP-Q, la posibilidad de realizar ensayos experimentales en un modelo físico a una escala determinada, utilizando el canal hidrodinámico indicado, sobre el cual se realizará el montaje de una rápida escalonada con relación $h/l = 0.10$, a objeto de conocer las características del flujo en la rápida y su grado de disipación de energía; planteamiento que fuera aceptado tanto por el Departamento Técnico del PSA como por sus directivos, y luego concretado mediante la suscripción de un Convenio de Cooperación Interinstitucional entre la EMAAP-Q y la EPN que tuvo lugar el 2 de enero de 2007.

Para la realización de los estudios experimentales, se planteó tomar como prototipo una de las rápidas escalonadas diseñadas dentro del Plan Maestro de Alcantarillado del Centro Histórico de Quito, de altura de grada $h = 0.50$ m, longitud $l = 5.0$ m, ancho de grada de 1.20 m, caudal máximo Q de $10\text{m}^3/\text{s}$, por lo que para efectos de diseño de la estructura a ser experimentada se propuso una escala de longitudes 1: 8 y la ley de similitud de Froude, dadas las

limitaciones en la altura de la sección transversal del canal hidrodinámico que es de apenas de 0.80 m.

Por otro lado, una vez suscrito el Convenio, y en concordancia con la cláusula segunda, previo a la realización de la construcción de las estructuras que conforman el modelo físico y de los estudios de investigación, mediante comunicación CIERHI-012007 de fecha 10 de enero de 2007, se propuso al PSA dos fases de experimentación, y el plan respectivo de investigación, el mismo que una vez analizado y discutido conjuntamente entre el PSA y el CIERHI, este fue aprobado por la Dirección Técnica del PSA.

Una vez cumplido con los términos contractuales (cláusula segunda y cuarta literal a) tanto por la Escuela Politécnica Nacional como por la EMAAP-Q, para la ejecución del convenio, éste tuvo como fecha de iniciación el 23 de febrero de 2007.

1.1 RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo al plan de análisis aprobado por el PSA para la fase 1 de estudio, el modelo tuvo una longitud total de desarrollo de 6.83 m de largo y de 0.15 m de ancho, con una altura total o desnivel de la rápida de 0.375 m, limitando la rápida a 6 gradas, cada una de ellas de $h = 0.0625\text{m}$ y $l = 0.625\text{m}$. Hacia aguas arriba del inicio de la rápida se dispuso de un tramo de 1.0 m de longitud y 0.15 m de ancho para el flujo de aproximación a las gradas, y una transición en curva con perfil elíptico de relación 1:2 para unir el ancho del canal hidrodinámico de 1.0 m con el ancho del canal del modelo de 0.15 m. Hacia el extremo inferior de la rápida, luego de la última grada, se dispuso de un tramo recto de canal de sección rectangular de 0,15 m. y 1.00 m. de longitud.

La fase 2 del estudio experimental, el modelo tuvo la misma longitud de desarrollo, es decir en total 6.83 m de largo con iguales configuraciones geométricas para el flujo de aproximación a las gradas, y para la restitución de los flujos al canal. El ancho de la rápida fue de 0.15 m, y la relación $h/l = 0.10$; sin embargo, se duplicó el número de gradas reduciendo su altura $h = 0.03125$

m y su longitud $l = 0.3125$ m. El tramo final de canal para la restitución de los caudales será también de 1.0 m incluyendo la última huella.

En cuanto al plan de pruebas en cada fase, para el rango de caudales a ensayarse, previamente se determinó el límite superior de flujo grada a grada (nappe flow), los límites superior e inferior de régimen de flujo en transición, y el límite inferior de flujo rasante (skimming flow), para las condiciones de $h/l = 0.10$, y para las dos alternativas.

Para cada caudal de ensayo se registró: perfiles de flujo, calados en las gradas, velocidades, cargas de presión en los puntos seleccionados de las gradas, y sobre el piso del canal luego del extremo inferior de la rápida. Con estos datos se determinó la carga de energía residual en el extremo aguas abajo, y por consiguiente el porcentaje de carga de energía disipada. Además para cada ensayo, se observará las características del perfil de flujo y sus efectos en la disipación de energía, distribución de presiones medias, en la mezcla agua aire que se genera. Todas las pruebas fueron también registradas con fotografías digitales y en vídeos.

Como complemento a los ensayos de la dos alternativas, con huellas horizontales, luego de concluido el proceso de medición en cada variante, se procedió a incrementar la pendiente del canal hidrodinámico y por consiguiente la pendiente de las huellas, a objeto de observar la tendencia del patrón del flujo a lo largo de la rápida y su efecto en la disipación de energía. Los resultados de esta variante experimental se realizó para caudales de 20 %, 50%, 80%, 100% del caudal máximo ($10\text{m}^3/\text{s}$), es decir, para $2\text{ m}^3/\text{s}$, $5\text{ m}^3/\text{s}$, $8\text{ m}^3/\text{s}$, $10\text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar experimentalmente el grado de disipación de energía, las características y variaciones del perfil de flujo y de las cargas piezométricas y los coeficientes de fricción de Manning y Darcy-Weisbach de una estructura real con la ayuda de un modelo a escala de la misma, mediante comparación de datos analíticos y experimentales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensayos experimentales en un modelo físico a una escala determinada, utilizando el canal hidrodinámico indicado, sobre el cual se realizará el montaje de una rápida escalonada con relación $h/l = 0.10$, a objeto de conocer las características del flujo en la rápida, su grado de disipación de energía, distribución de presiones y las relaciones de resistencia al flujo.
- Utilizar como prototipo una de las rápidas escalonadas diseñadas dentro del Plan Maestro de Alcantarillado del Centro Histórico de Quito, de altura de grada $h = 0.50$ m, longitud $l = 5.0$ m, ancho de grada de 1.20 m, caudal máximo Q de $10\text{m}^3/\text{s}$.
- Optimizar la geometría del fondo escalonado para lograr la mayor disipación de energía.
- Facilitar un texto de consulta que permita a estudiantes y profesionales acceder a datos y resultados aplicables al diseño eficiente de disipadores de energía para canales hidráulicos y sistemas de alcantarillado.
- Cooperar con el Programa de Saneamiento Ambiental de la EMAAP-Q, en el diseño de disipadores de energía con fondo escalonado para las obras de rehabilitación del Sistema de Alcantarillado del Centro Histórico de Quito.

- Investigar la efectividad de este tipo de estructuras en relación con los perfiles y patrones de flujo, coeficientes de rugosidad, disipación de energía, distribución de presiones, que a la postre servirán como bases técnicas para el diseño de colectores.

1.3. INFRAESTRUCTURA DISPONIBLE PARA LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.

1.3.1 MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS.

- Sierra circular.
- Sierra de cinta.
- Caladora



Fotografía 1.1

- Martillo
- Caladora de mano
- Formón
- Escuadra
- Pistola para silicón.



Fotografía 1.2

1.3.2 SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE FLUJOS.

El sistema de recirculación de flujo está compuesto por una cámara de succión con un volumen de almacenamiento de 260 m³, de los cuales 160 m³ son usados para la recirculación, cuatro bombas de impulsión para un caudal máximo de 200 l/s (Fotografía 1.3), un tanque de carga, un sistema tubería central formada por tres conducciones de 300 mm de diámetro (Fotografía 1.4), un tanque de carga para el canal hidrodinámico (Fotografía 1.5) que contiene un vertedero triangular estandarizado de 90 grados que permite medir los caudales que van a circular en cada ensayo (Fotografía 1.6), canal hidrodinámico, compuerta de descarga, tanques de descarga (Fotografía 1.7), canal de recirculación de flujos de 87 metros de longitud, 1.50 metros de ancho y 1.50 metros de altura.

El flujo se mantiene en el reservorio e inicia su recorrido al encender por lo menos una de las cuatro bombas mencionadas, mediante la impulsión llega al tanque de carga para ser distribuido por medio de la tubería central hacia el tanque del canal, siendo regulado por una válvula colocada al pie de dicho tanque, llega hasta el vertedero, recorre el canal hidrodinámico, cruza la compuerta y es descargado por medio de tres tanques colocados en el extremo del canal para finalizar su recorrido en el canal de recirculación que lo lleva hasta el reservorio para ser nuevamente impulsado hacia el canal hidrodinámico.



Fotografía 1.3



Fotografía 1.4



Fotografía 1.5



Fotografía 1.6



Fotografía 1.7

1.3.3 CANAL HIDRODINÁMICO.

El canal tiene 25 metros de longitud, 1 metro de ancho, 0.80 metros de altura y es de pendiente variable.

Las paredes laterales del canal están elaboradas en vidrio templado de 10 mm de espesor unidos a la estructura metálica de dicho canal, que permite visualizar el comportamiento del flujo, el material constituyente del piso es acero inoxidable de 6 mm de espesor, con perforaciones de 1/8" para tomas piezométricas, además de soportes roscados de 6 mm de diámetro que permite la colocación de estructuras hidráulicas.

El sistema de elevación permite modificar la pendiente del canal entre 0% y 4%.

El funcionamiento del canal está controlado mediante el software instalado en una computadora localizada en la oficina del laboratorio. Este sistema operativo controla la inclinación del canal (baja cargado de agua y sube únicamente cuando el canal se ha vaciado completamente) y la apertura de la compuerta de descarga. (Fotografía 1.8)



Fotografía 1.8

1.3.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN.

- Limnímetro.
- Micromolinete.
- Piezómetros.
- Cinta



Fotografía 1.9

CAPITULO 2.

2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE FLUJOS EN RÁPIDAS ESCALONADAS DE RELACION $h/l = 0.10$ CON SEIS GRADAS

2.1 ESTRUCTURA DE LOS REGÍMENES DE FLUJO GRADA A GRADA (NAPPE FLOW), FLUJO RASANTE (SKIMMING FLOW) Y FLUJO EN TRANSICIÓN.

2.1.1 RESUMEN DEL ANÁLISIS DE FLUJO SOBRE CANALES CON FONDOS ESCALONADOS

Las rápidas escalonadas son estructuras hidráulicas que tienen como propósito principal evacuar flujos y disipar energía simultáneamente, son aplicables en canales de riego, sistemas de alcantarillado de aguas lluvia, agua servida, o sistemas mixtos, en estructuras de gaviones, etc.; el porcentaje de disipación de energía a lo largo de la estructura obedece a la geometría del escalón (relación h/l), del caudal unitario circulante, del número de gradas, de los coeficientes de rugosidad, de la pendiente de la estructura, etc. **(REF. 1)**

Basados en estudios efectuados por Sorensen (1985), Peyras, Royet y Degoutte (1991), se determina que el régimen de flujo sobre una rápida escalonada se divide en dos tipos: para caudales bajos, flujo escalón a escalón y para caudales altos, flujo rasante.

Experimentalmente, Elviro y Mateos (1995), Chanson (1996), Ohtsu y Yasuda (1997) y Matos (1999), concluyeron la presencia de un flujo intermedio entre el flujo escalón a escalón y el flujo rasante, el mismo que tiene características propias y es llamado Flujo en Transición.

2.1.2 FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN (NAPPE FLOW)

La característica principal del flujo escalón a escalón está dada por un proceso continuo de caídas libres del chorro de agua, de una grada a otra. Según estudios realizados por Essery y Horner (1978), en este régimen se presentan dos tipos de flujo, basados en la forma en que el chorro golpea al escalón siguiente:

- Flujo escalón a escalón aislado (Isolated nappe flow): producido cuando el total del flujo en cascada del escalón superior golpea al escalón inferior (Figura 2.1.1), dando como resultado de este proceso la formación de un resalto hidráulico en la huella de cada grada, el mismo que puede ser completa o parcialmente desarrollado dependiendo directamente de la longitud y la altura del escalón.

El flujo con resalto hidráulico completamente desarrollado solo ocurre para escalones con umbrales en el extremo y para caudales unitarios de hasta 1 [m³/s/m].

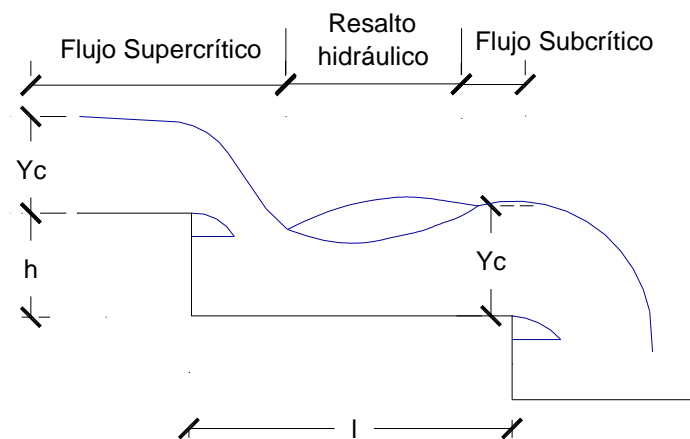


Figura 2.1.1

- Flujo escalón a escalón parcial (Partial nappe flow): cuya característica es que solo una fracción del chorro choca con el escalón inferior (Figura 2.1.2)

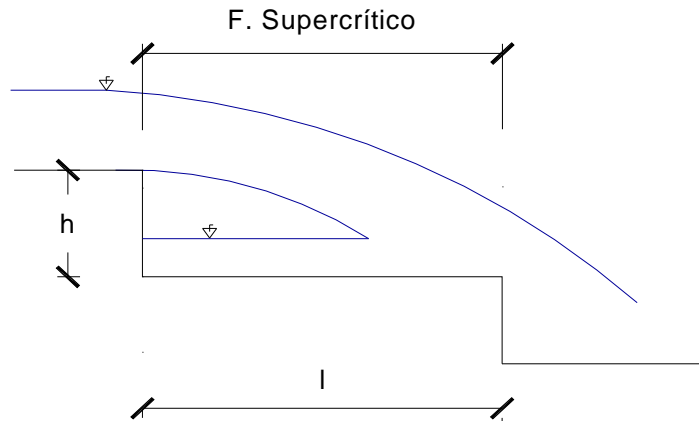


Figura 2.1.2

- El flujo escalón a escalón parcial siempre es supercrítico.

Chanson (1994) propone las siguientes condiciones para la ocurrencia de flujo escalón a escalón aislado con un resalto hidráulico completamente desarrollado en un escalón de altura h y longitud l :

$$\frac{Y_c}{h} \leq 0.0916 \left(\frac{h}{l} \right)^{-1.276} \quad \text{Para el intervalo:} \quad 0.2 \leq \frac{h}{l} \leq 0.6 \quad (2.1.1)$$

Donde, Y_c : calado crítico.

Para esta deducción Chanson considera que el resalto hidráulico se forma inmediatamente aguas abajo del área de impacto.

El límite inferior para la formación del flujo escalón a escalón es determinado por la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{h}{Y_c} \right) = 0.57 (\operatorname{tg} \theta)^3 + 1.3 \quad \text{En el intervalo:} \quad 0.1 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 1.43 \quad (2.1.2)$$

Donde, θ : ángulo de inclinación de la rápida escalonada en grados.

Los resultados experimentales de Ohtsu y Yasuda (1999) dieron como resultado que el límite superior para la formación del flujo escalón a escalón es determinado por la ecuación siguiente:

$$\frac{Y_c}{h} = \frac{\left(1.4 - \frac{h}{l}\right)^{0.26}}{1.4} \quad (2.1.3)$$

2.1.3. FLUJO EN TRANSICIÓN.

Cuando circulan caudales bajos a través de una rápida escalonada los flujos se comportan como lámina continua en caída libre, es decir, el flujo grada a grada o un régimen de flujo en chorros (Horner 1969).

Para caudales altos y considerando una geometría apropiada de la rápida escalonada, es decir de las dimensiones de las gradas, el flujo forma un fondo falso o lámina continua que une el borde de cada grada y se desliza sobre éste, es decir, se obtiene el régimen de flujo rasante, en el espacio libre que queda bajo esta lámina, el espacio entre la huella y la contra huella, se observa una fuerte recirculación de flujo bajo la corriente principal denominada Cavidad con Aire.

Chanson (1996) y Chamani y Rajaratnam (1999) establecieron las condiciones de la transición de flujos de grada a grada a flujo rasante, estos investigadores usaron el término “inicio de flujo rasante” (Onset of skimming flow) para denominar este fenómeno. Pocos han sido los investigadores que discutieron las condiciones de flujo transitorio entre el régimen de escalón a escalón y rasante. Los primeros en definir al Régimen de Flujo en Transición como concepto fueron Elviro y Mateos (1995), Ohtsu y Yasuda, aunque no discutieron sobre las propiedades específicas del flujo.

En el año 2004, Chanson y Luke Toombes, realizan investigaciones en dos estructuras con rápidas escalonadas en las cuales varían la pendiente de 3.4° a 22° y además la altura de las gradas con el fin de proporcionar bases para el estudio del flujo en transición.

Al incrementar el caudal circulante sobre las estructuras escalonadas se forma un flujo intermedio entre el flujo escalón a escalón y el flujo rasante, este flujo se caracteriza por formar grandes salpicaduras que llegan a superar la altura del escalón y fuertes fluctuaciones hidrodinámicas en el perfil del flujo lo que provoca una imagen desordenada, desapareciendo la superficie lisa, la sucesión de caídas libres grada a grada y presentándose cavidades de aire en ciertos escalones de la rápida (Figura 2.1.3).

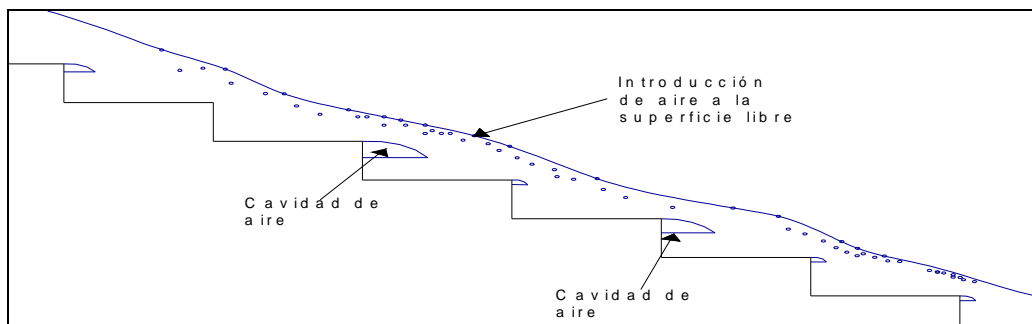


Figura 2.1.3

Según Chanson y Toombes (2004), los límites en los cuales se presentaría un flujo en transición se determinan utilizando las siguientes ecuaciones:

Límite inferior para la formación del flujo en transición:

$$\frac{Y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \frac{h}{l} \quad \text{Para:} \quad 0 < \frac{h}{l} < 1.7 \quad (2.1.4)$$

Límite superior para la formación del flujo en transición:

$$\frac{Y_c}{h} < \frac{0.9821}{\left(\frac{h}{l} + 0.388\right)^{0.384}} \quad \text{Para:} \quad 0 < \frac{h}{l} < 1.5 \quad (2.1.5)$$

2.1.4 FLUJO RASANTE (SKIMMING FLOW)

En este tipo de flujo la alta concentración de aire que fluye hacia abajo de la rápida provoca una inmersión total de los escalones, el cual ocurre cuando el aire en las cavidades de la caída del chorro desaparece en todos los escalones de la rápida, con una lámina superior prácticamente constante que circula sobre un fondo falso formado por los vértices de cada grada, creando celdas casi triangulares entre este fondo falso con la huella y contrahuella de cada escalón en las que el agua permanece atrapada, produciéndose un intercambio de momento entre éstas dos fases lo que produce el movimiento circular continuo del agua atrapada dando como origen a los denominados vórtices de recirculación (Figura 2.1.4). La fricción en el fondo falso provee suficiente energía a los vórtices atrapados para continuar rotando. El fondo falso es una superficie virtual y no es un plano que exactamente contiene los bordes de las gradas, por lo que el flujo puede golpear o levantarse sobre ellos. **(REF. 2)**

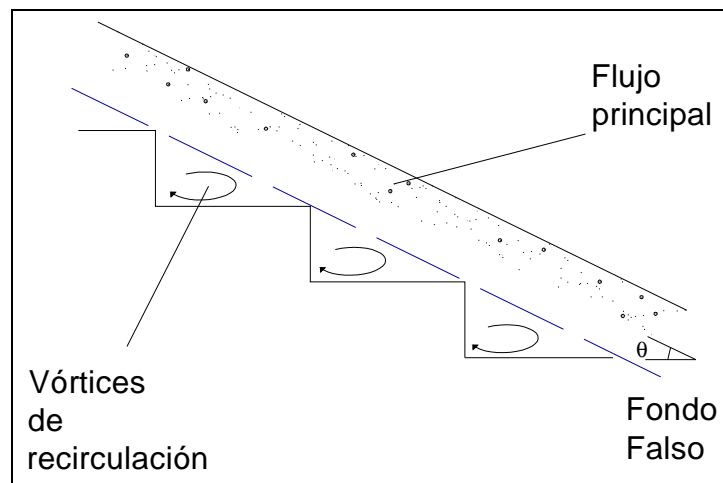


Figura 2.1.4

Chanson (1994), planteó que el flujo rasante inicia cuando existe una total inmersión de los escalones; o sea, cuando la altura de agua en la cavidad

delimitada por las aristas de los escalones y el chorro superior, igual a la altura del propio escalón. Posteriormente Chamani y Rajaratnam (1999), instituyeron un nuevo criterio según el cual el flujo rasante iniciaría cuando la pendiente de la lámina de agua que abandona el escalón superior es igual a la de la rápida escalonada.

El constante movimiento de los vórtices de recirculación produce una disipación de energía adicional en cada escalón.

Se puede observar diversas regiones a lo largo de un régimen de flujo rasante sobre una rápida escalonada: al inicio del flujo no se aprecia entrada de aire, revelándose una superficie libre, suave y cristalina. Cuando el espesor de dicha capa coincide con el calado del flujo, se define el punto de inicio de entrada de aire en la rápida (Figura 2.1.5).

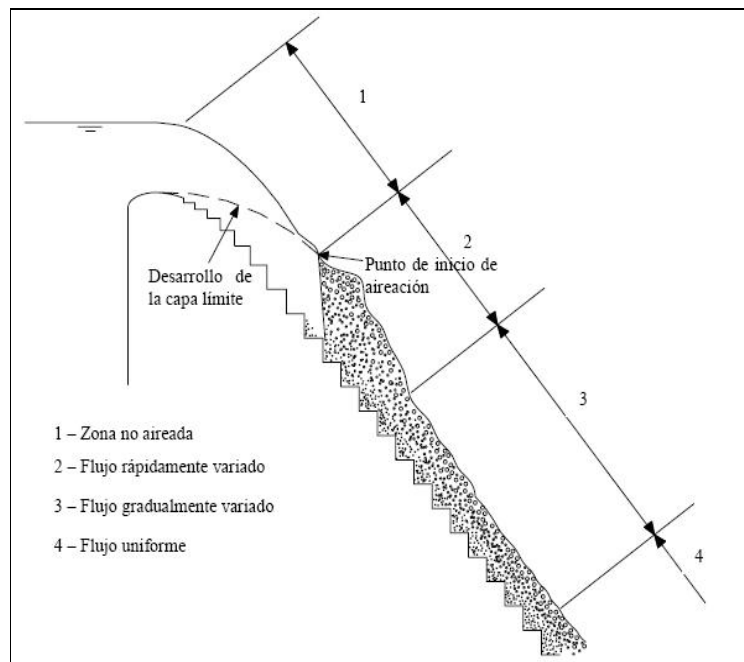


Figura 2.1.5

Aguas abajo del punto de inicio de aireación, se forma un flujo rápidamente variado (Figura 2.1.5). Mediciones de concentración de aire comprobaron que la ondulación de la superficie libre hace que las trayectorias de las líneas de

corriente presenten una fuerte curvatura en esta zona, siendo inicialmente convexas, lo que favorece una intensa aireación del flujo y posteriormente cóncavas, sobresaliendo el movimiento ascensional de las burbujas de aire, hecho que provoca una disminución localizada en la concentración media del aire Mateos (1999). Inmediatamente aguas abajo, se encuentra una zona de flujo gradualmente variado. Suficientemente aguas abajo, el flujo para un caudal dado alcanza el equilibrio entre las fuerzas de fricción y gravedad. En este instante los valores de calado, velocidad y concentración de aire se mantienen constantes a lo largo de la rápida.

Límite inferior para la formación del flujo rasante:

Según Chanson (1994):

$$\frac{Y_c}{h} > 1.057 - 0.465 \frac{h}{l} \quad (2.1.6)$$

Según Ohtsu y Yasuda (1999):

$$\frac{Y_c}{h} = 0.862 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.165} \quad (2.1.7)$$

Límite superior de la altura de escalón para la formación de flujo rasante:

$$\frac{h}{y_c} = 1.16 \cdot (\tan \theta)^{0.165} \quad (2.1.8)$$

Para $0.1 \leq \tan \theta \leq 1.43$

2.2 BREVE DESCRIPCIÓN DE ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN RÁPIDAS CON FONDO ESCALONADO

Con la investigación y el desarrollo de estos sistemas estructurales escalonados se persigue disipar el mayor porcentaje de energía posible

considerando siempre la eficiencia de la estructura y la seguridad del sitio de instalación y sus alrededores.

Los estudios de Poggi (1949, 1956), dirigieron los primeros estudios sobre éstas estructuras basados en el régimen de flujo grada a grada, desde el inicio de los años ochenta las investigaciones sobre la estructura del flujo y los efectos en la disipación de energía en rápidas escalonadas han ido incrementándose.

Las investigaciones continuaron en 1978 con Essery y Horner (1978) quienes realizaron un estudio más detallado del diseño de rápidas escalonadas.

Rajaratnam (1990), y Christodoulou (1993), realizaron experimentos y observaciones de la circulación del flujo en canales escalonados guiados al estudio de la disipación de energía.

Un método para la estimación de la pérdida de energía para un régimen de flujo grada a grada fue propuesto por Chamani (1994). En el mismo año, Chanson, presentó la ecuación para determinar el grado de disipación de energía tanto para el régimen de flujo grada a grada como para el flujo rasante, ya sean controlados o no por compuertas. Más tarde, Ohtsu y Yasuda (1995), demostraron que la disipación relativa de energía depende del número de gradas, la inclinación de la pendiente, el tipo de flujo, la altura del vertedero y el tirante crítico.

El grado de disipación de energía para el régimen de flujo grada a grada puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta h}{H_{m\acute{a}x}} = 1 - \frac{H_{res}}{H_{m\acute{a}x}} \quad (2.2.1)$$

$$\frac{\Delta h}{H_{m\acute{a}x}} = 1 - \frac{Y_1 + \frac{1}{2} \frac{Y_c^3}{Y_1^2}}{H_{dam} + 1.5Y_c} \quad (2.2.2)$$

$$\frac{\Delta h}{H_{m\acute{a}x}} = 1 - \frac{\lambda + \frac{1}{2}\lambda^{-2}}{\frac{H_{dam}}{Y_c} + \frac{3}{2}} \quad (2.2.3)$$

Donde:

$H_{m\acute{a}x}$: Carga máxima disponible.

H_{res} : Energía residual agua abajo.

H_{dam} : Altura del vertedor.

Y_1 : Profundidad de agua considerando flujo uniforme.

λ : Parámetro adimensional que está en función de la relación entre la profundidad de agua Y_1 y la profundidad crítica Y_c

White (1943) definió el parámetro λ usando consideraciones teóricas en la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\frac{3}{2\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h}{Y_c} + \frac{3}{2}}} \quad (2.2.4)$$

Chanson (1994), considerando flujo uniforme, determinó la ecuación para calcular el grado de energía disipada en función del factor de fricción (f) para flujo rasante:

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \text{Sen} \theta}\right)^{\frac{1}{3}} \text{Cos} \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \text{Sen} \theta}\right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{H_{\text{dam}}}{Y_c} + \frac{3}{2}} \quad (2.2.5)$$

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot Y_p \cdot \text{Sen} \theta}{v^2} \quad (2.2.6)$$

Donde:

Y_p : profundidad del agua medida perpendicular al flujo

θ : Inclinación de la pendiente de la rápida escalonada.

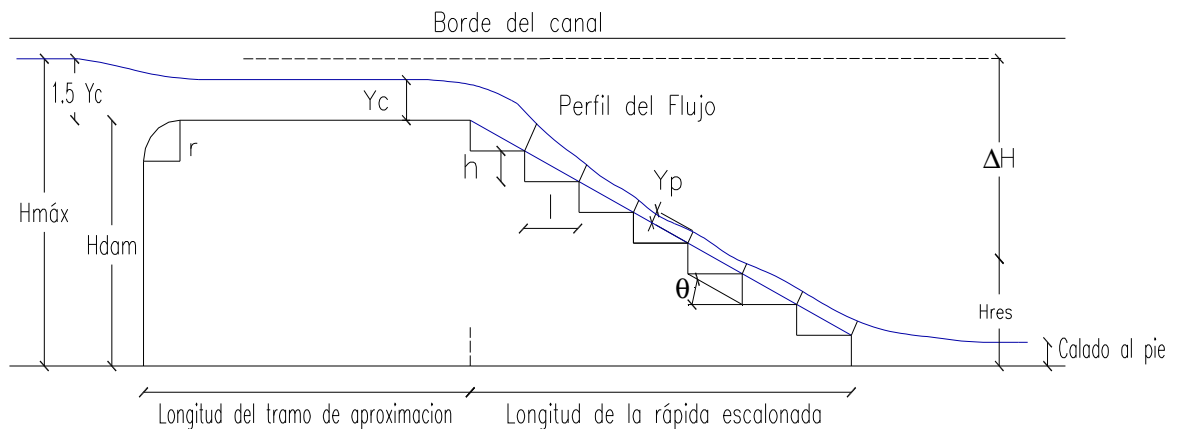


Figura 2.2.1

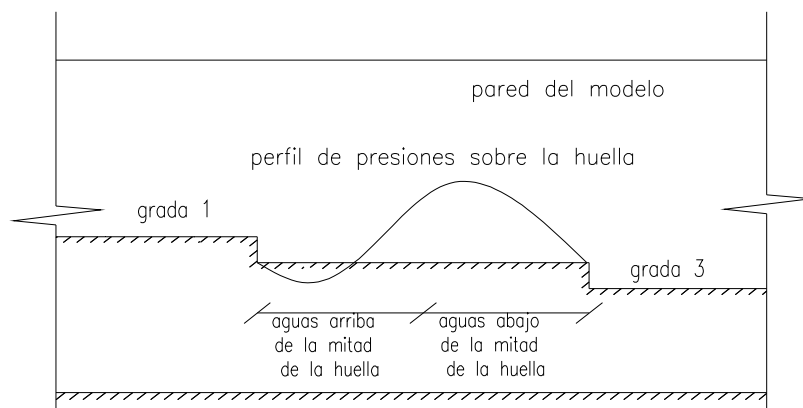
El factor f de resistencia al flujo de Darcy-Weisbach, depende directamente de las características y condiciones del flujo, así como de la inclinación de la rápida por lo que no puede tener un valor constante.

2.3 BREVE DESCRIPCIÓN DE ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

Uno de los parámetros fundamentales que el diseño de rápidas escalonadas debe contemplar es la distribución de presiones que se presenta en la estructura, esto con el fin de garantizar, a lo largo de su vida útil, un óptimo desarrollo y durabilidad.

Frizell (1991) y Elviro (1992) distinguieron en sus estudios dos regiones en la huella de un escalón: la primera aguas arriba de la mitad de la huella donde las presiones pueden ser negativas debido a que el flujo tiende a separarse de las aristas de la grada y posteriormente, en la segunda mitad de la grada el flujo golpea directamente produciendo una presión adicional por impacto. (Figura 2.3.1)

Los datos obtenidos en la contrahuella del mismo escalón indican un comportamiento de las presiones medias opuesto al obtenido en la huella, por lo tanto en el extremo más cercano al borde superior del escalón se presentan presiones medias negativas y en la zona adyacente a la huella existe un impacto del fluido que se encuentra rotando en el vórtice dando como resultado presiones medias positivas, siendo éstas menores a las presiones producidas por impacto en el extremo aguas abajo de las huella del escalón. (Figura 2.3.2).



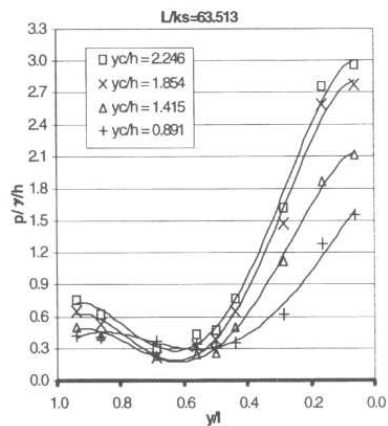


Figura 2.3.1

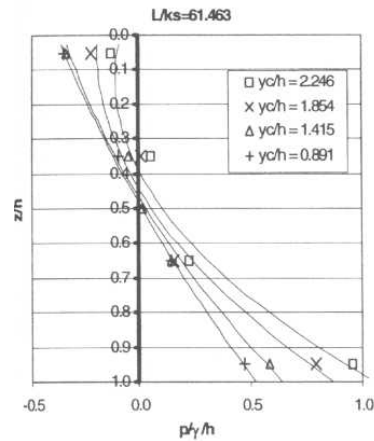


Figura 2.3.2

Las presiones sobre las contrahuellas de cada escalón son afectadas directamente por la separación de la capa límite y la zona de recirculación en la cavidad del escalón.

Al analizar el carácter ondulante de las presiones en condiciones de régimen rasante, los autores Sánchez-Juny (2001), aprecian una coincidencia de fase de esta onda estacionaria para caudales menores, mientras que una onda distinta para caudales mayores.

El comportamiento de las presiones máximas y mínimas revela una mayor variabilidad de las presiones en la zona cercana a la contrahuella, siendo directamente proporcional al caudal, tal como debe corresponder a una zona de separación del flujo del contorno.

Las fluctuaciones de presión serán menores en el prototipo que en el modelo debido a fenómenos de escala relacionados con la aireación del flujo, esto fue demostrado por Mateos (1992),

En el perfil de presiones sobre la huella de un escalón, en flujo rasante, siendo "x" la ubicación de la toma piezométrica sobre la huella medida desde su respectiva contrahuella y "l" la longitud total de la huella, se distinguen tres zonas:

- ▶ La zona de máximas cargas de presión, en la cual dicha presión esta condicionada por el impacto del chorro rasante y ocurre en el intervalo entre $0 < x/l < 0.2$
- ▶ Para la relación x/l en el intervalo entre $0.2 < x/l < 0.7$, la presión se encuentra gobernada por el vórtice atrapado entre el flujo rasante y las aristas del escalón, con una similitud entre los valores de las cargas de presión.
- ▶ Zona de separación del flujo recirculante existente, provocando un vórtice en sentido contrario, lo que provoca una subida local de las presiones en el intervalo entre $0.7 < x/l < 1.0$

Mientras no exista inmersión de los escalones, para el flujo en transición, en el perfil de presiones sobre la huella de un escalón se aprecia dos zonas:

- ▶ En el intervalo entre $0 < x/l < 0.2$, zona de impacto del chorro donde se dan las máximas presiones sobre el escalón.
- ▶ En el intervalo entre $0.2 < x/l < 1.0$, donde la presión se encuentra regida por la presencia del colchón de agua verificándose una cierta semejanza sobre las presiones medias y las alturas de agua medidas en el interior de la cavidad (casi hidrostático). Las fluctuaciones de carga de presión disminuyen al acercarse a la contrahuella, reduciéndose la influencia de la turbulencia provocada por el impacto del chorro en la huella.

Cuando la superficie de separación entre el flujo principal y el flujo secundario (vórtice) tiene tendencia a separarse del vértice de un escalón, los vórtices tienden a ocupar el espacio que es liberado, produciendo caídas de presión que pueden llegar a ser negativas, pero sin alcanzar valores absolutos tan altos que puedan ocasionar problemas de cavitación.

2.4 ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE AIREACIÓN.

Cualquiera que sea el tipo de flujo que circula por una rápida escalonada siempre existirá la presencia de aire, sea como una cavidad en la contra huella (flujo escalón a escalón), o como consecuencia del aumento de la Turbulencia que incrementa la concentración de aire en el flujo (transición y rasante).

La superficie de contacto entre el agua y el aire aumenta o se distorsiona por la presencia de burbujas lo que facilita el intercambio de gases entre ambos medios. Este fenómeno debe ser considerado para el caso de agua residual o servida ya que libera gases orgánicos volátiles disueltos en el agua y permite su oxigenación.

El perfil de concentración de aire para flujos rasantes ha sido estudiado por varios investigadores: Chamani y Rajaratnam (1999); Boes y Hager (2003); Chanson (2001); Ohtsu (2000 y 2004). Pero una conclusión general para efectos de escala en canales escalonados no ha sido obtenida.

En el flujo a lo largo de un rápida con fondo escalonado, se puede observar, en un primer tramo, que la vena líquida es continua y transparente, sin mucha posibilidad de intercambio de oxígeno, esto se mantiene hasta llegar a una sección en la que aparece un efecto llamado “Agua blanca”, esto es, una combinación de agua y aire, debida al ascenso de la capa límite de turbulencia que se desarrolla desde la cresta del vertedor, hacia la superficie libre del flujo. A partir de esta sección existe una zona de transición, donde la concentración de aire en el flujo va en aumento para luego llegar a un estado de equilibrio.

En el proceso de aireación, el flujo en transición aguas arriba es liso y transparente. En los primeros escalones, la superficie libre es ondulada siguiendo la geometría de la rápida, se observa un poco de aireación (cavidades) en la unión de la huella y contra huella (parte baja). Aguas abajo de las primeras cavidades de aire se forman salpicaduras considerables. Para

valores bajos de caudales existen algunas cavidades de aire, alternando su forma en cada grada.

A continuación de la Cavidad de aire en la contra huella existe un tramo de flujo aireado, una notable fracción de este tramo coincide con el chorro de impacto y con el punto de estancamiento mientras el flujo continúa salpicando aguas abajo. (Figura 2.4.1).

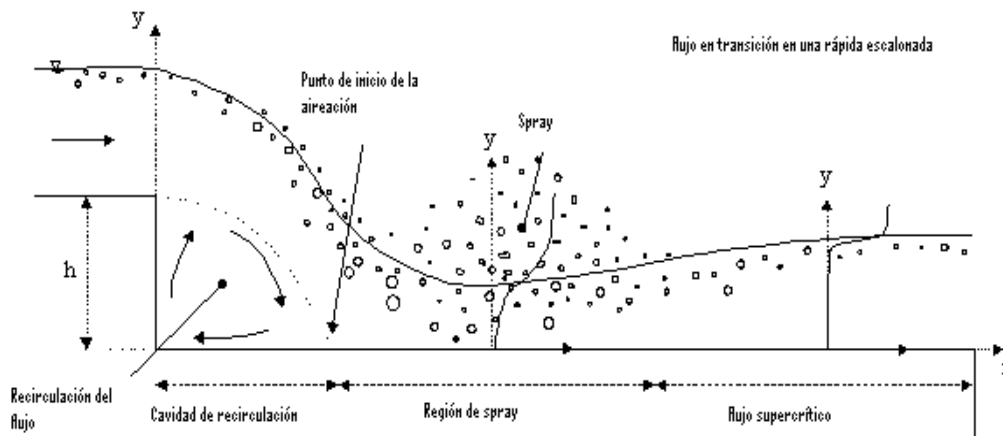


Figura 2.4.1

2.5 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL CANAL CON FONDO ESCALONADO CON RELACIÓN ALTURA (h) - LONGITUD DE GRADA (l), $h/l = 0,10$ Y SEIS GRADAS.

2.5.1 MODELACIÓN FÍSICA DEL PROTOTIPO

2.5.1.1 INTRODUCCIÓN

El modelo físico que se representará a escala es una rápida con fondo escalonado con una relación de altura (h) – longitud (l) $h/l=0.10$, en la cual tanto las condiciones de frontera (fondo del canal, paredes laterales, etc.), como las condiciones de flujo aguas arriba y el campo de flujo debe escalarse de forma apropiada.

Los modelos físicos hidráulicos se usan por lo común durante las etapas de diseño para optimizar una estructura y asegurar una operación apropiada de la misma. En aplicaciones de ingeniería civil, el modelo físico hidráulico es en general una representación a escala reducida del prototipo. **(REF. 3)**

En todo modelo físico, se busca lograr que las condiciones de flujo sean similares a las del prototipo. Existen en general tres tipos de similitud:

- La similitud geométrica implica que las relaciones de las longitudes características del prototipo con respecto al modelo son iguales.
- La similitud cinemática implica que las relaciones de las velocidades características del prototipo con respecto al modelo son las mismas.
- La similitud dinámica implica que las relaciones de las fuerzas del prototipo con respecto a las del modelo son las iguales. **(REF. 3)**

En los Modelos Hidráulicos normalmente se trabaja aplicando la Similitud Dinámica, que esencialmente permite establecer sistemas “Mecánicamente Semejantes” y que exige un proceso de Investigación para establecer una adecuada Síntesis de Resultados. En este contexto, el Análisis Dimensional, que es un proceso matemático, es la herramienta adecuada de trabajo, ya que valiéndose de un proceso ordenado nos permite establecer relaciones, ecuaciones y hasta leyes establecidas en la investigación de laboratorio, las que obviamente pueden ser comprobadas en el mismo a través de su desarrollo práctico. **(REF. 4)**

2.5.1.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL

2.5.1.2.1 INTRODUCCIÓN

El análisis dimensional es un proceso mediante el cual se examinan las dimensiones de los fenómenos físicos y de las ecuaciones asociadas, para tener una nueva visión de sus soluciones. A partir de este análisis surge la

importancia que tiene el uso de distintos parámetros adimensionales, presentándose las siguientes ventajas:

1. Reducir el número de variables
2. Dar una guía de cómo realizar experiencias en modelos a escala.

El estudio del análisis dimensional, debe hacerse en el campo del Análisis Matemático, como mecanismo para el planteamiento del análisis de los fenómenos hidráulicos a ser simulados en modelos físicos, de tal forma que las variables que intervienen en estos fenómenos, que generalmente son magnitudes físicas, puedan ser manejadas con lógica matemática a partir de un riguroso planteamiento de investigación que nos guíe hacia la correcta síntesis de la misma. **(REF. 4)**

2.5.1.2.2 SIMILITUD DINÁMICA

Los análisis experimentales se desarrollan utilizando modelos geoméricamente similares, en los cuales la verdadera similitud dinámica se alcanza solo si cada parámetro adimensional tiene el mismo valor tanto en el modelo como en el prototipo.

Los efectos de escala existirán cuando uno o más de los parámetros adimensionales tengan diferentes valores en el modelo y en el prototipo, por lo tanto los efectos de escala se definen como las distorsiones introducidas por diferentes fuerzas (viscosidad, tensión superficial) adicionales a las que predominan (por ejemplo, la gravedad en flujos a superficie libre).

En flujos de superficie libre, el efecto gravitacional es dominante. Si se utiliza el mismo fluido (por ejemplo, agua) tanto en el modelo como en el prototipo, es imposible mantener al mismo tiempo los números de Froude y Reynolds en el modelo y a escala total. **(REF. 3)**

2.5.1.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL DE LA RÁPIDA CON FONDO ESCALONADA CON RELACIÓN $h/l = 0.10$

El flujo sobre una rápida con fondo escalonado tiene como fuerza principal a la gravedad y por lo tanto está caracterizado por el número de Froude. Adicionalmente se debe considerar que la disipación de energía producida por la rápida depende del efecto viscoso por lo que el análisis debe ser también caracterizado por el número de Reynolds. Además el desarrollo de la turbulencia, caracterizada por otro número de Reynolds, influye en el proceso de aireación de este flujo. El número de Weber, que nos muestra el efecto de la tensión superficial con respecto a la inercia, para este tipo de flujo determinaría el comportamiento de la superficie de contacto aire-agua, la forma y tamaño de las burbujas y la velocidad de ascenso de dichas burbujas de aire en la masa de agua. **(REF. 6)**

Para el flujo en un canal abierto (flujo de una sola fase y con un solo componente), el número de Froude juega un papel muy importante en las ecuaciones apropiadas para el flujo. Para flujos en canales abiertos de dos fases (por ejemplo, flujos de hielo-agua) o dos componentes (por ejemplo, flujos de aire-agua) el número de Froude puede no ser significativo. **(REF. 3)**

En este contexto, las relaciones de escala entre el prototipo y el modelo para los diferentes criterios de similitud se resumen en la tabla 2.5.3.1:

Magnitud Física	Similitud de Froude	Similitud de Weber	Similitud de Reynolds
Longitud	$L_r = L_p / L_m$	$L_r = L_p / L_m$	$L_r = L_p / L_m$
Superficie	$A_r = L_r^2$	$A_r = L_r^2$	$A_r = L_r^2$
Velocidad	$V_r = L_r^{1/2}$	$V_r = L_r^{-1/2}$	$V_r = L_r$
Tiempo	$t_r = L_r^{-1/2}$	$t_r = L_r^{3/2}$	$t_r = 1$
Caudal	$Q_r = L_r^{5/2}$	$Q_r = L_r^{3/2}$	$Q_r = L_r$
Aceleración	$a_r = 1$	$a_r = L_r^{-2}$	$a_r = 1$
Presión	$(P / \gamma)_r = L_r$	$(P / \gamma)_r = L_r$	$(P / \gamma)_r = L_r$

Tabla 2.5.3.1. Valores de las Escalas según diferentes criterios de Similitud. **(REF. 7)**

donde los subíndices p y m se refieren a los parámetros del prototipo (escala total) y del modelo respectivamente, y el subíndice r indica la relación de cantidades prototipo a modelo.

2.5.1.4 DESARROLLO DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL:

2.5.1.5

El fenómeno de flujo está definido por la conformación geométrica del contorno, por los parámetros característicos del flujo y por las propiedades físicas del agua y el aire. La Figura No. 2.5.3.1 nos muestra la geometría base del estudio, la forma de los escalones y su dimensionamiento.

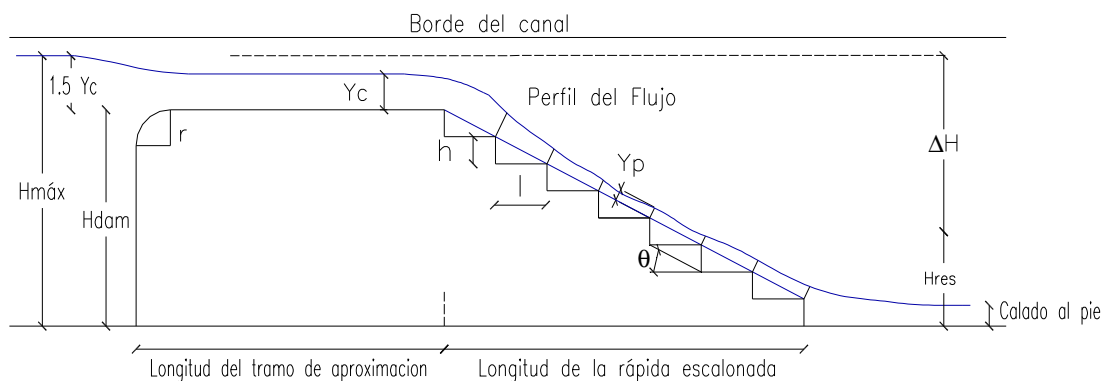


Figura 2.5.3.1.

Las magnitudes seleccionadas para la rápida escalonada con relación $h/l = 0.10$ se detallan a continuación, teniendo en cuenta las características de las magnitudes geométricas, cinemáticas y dinámicas:

	Cantidad	Símbolo	Dimensiones
Geométricas	Ancho efectivo del canal	B	L
	Ancho contraído de la estructura	b	L
	Altura del vertedor	Hdam	L
	Calado crítico	Yc	L
	Altura del escalón	h	L
	Longitud del escalón	l	L
	Numero de escalones	No	
	Carga de presión (Presión/Peso específico)	p	L
	Ubicación del piezómetro en el eje x	X	L
	Inclinación o pendiente	α	
Cinemáticas	Velocidad	V	LT^{-1}
	Caudal	Q	L^3T^{-1}
	Gravedad	g	LT^{-2}

Dinámicas	Presión	ΔP	$ML^{-1} T^{-2}$
	Peso específico	γ	$ML^{-2} T^{-2}$
	Modulo Elástico de compresión	K	$ML^{-1} T^{-2}$
	Viscosidad Dinámica	μ	$ML^{-1} T^{-1}$
	Tensión superficial	σ	$M T^{-2}$
	Densidad	ρ	ML^{-3}

Tabla 2.5.3.2.

2.5.1.5 RESTRICCIONES QUE DEBEN CONSIDERARSE EN EL ANÁLISIS DEL FLUJO EN CANALES CON FONDO ESCALONADO

- El número de Reynolds (Re) puede tener una influencia relativamente despreciable cuando el flujo es turbulento, o sea $Re > 10^5$, por lo tanto el modelo debe presentar rugosidad en su diseño para cumplir con este criterio. En este caso la macrorugosidad presente en el fondo del modelo, producido por los escalones, genera un flujo turbulento totalmente desarrollado y en consecuencia se descarta el Re.
- El número de Weber se lo puede descartar, pues este es importante cuando las fuerzas de tensión superficial son dominantes, lo que sucede cuando el calado es menor a 3 cm; pero en este modelo el efecto de la tensión superficial sobre las paredes es mínimo dado que el calado a lo largo de toda la rápida es en su gran mayoría superior a dichos 3 cm (ver anexos), con muy pocas excepciones que pueden ser despreciadas ya que en prototipo (escala aumentada 1:8) los calados superarán por mucho al límite mínimo mencionado .
- El número de Mach o Cauchy se considera importante cuando las velocidades son mayores o iguales a la velocidad del sonido en el agua. Este fenómeno puede ser observado, por ejemplo, cuando se produce Golpe de Ariete y no se presenta para ninguno de los casos analizados en este estudio.
- La introducción de aire en el agua no es posible antes de que se inicie el proceso de autoaireación, por lo tanto no es posible una variación de la concentración de aire en el flujo de aproximación.
- En este estudio los efectos de la aireación serán menospreciados ya que en el laboratorio no se observó un perfil de flujo lo suficientemente inestable que permita el excesivo ingreso de aire y además porque no se cuenta con el instrumental necesario para medir la concentración de aire en el agua, variable esencial para el análisis de los efectos de la aireación.

En consecuencia se tiene la siguiente forma para la relación adimensional que define a la disipación de energía y a la carga de presión, que son los parámetros fundamentales de este estudio, ya que a partir de sus relaciones se pretende obtener resultados que permitan optimizar el diseño, la construcción y el manejo de rápidas con fondo escalonado:

$$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}}, p/h = f [\text{Fr}, \gamma c/h, x/l, \text{No}, \alpha]$$

En general todo fenómeno de disipación de energía debe simularse mediante el criterio de similitud de Reynolds. Pero mantener los criterios de similitud de Froude y Reynolds al mismo tiempo no es posible. La simulación apropiada del efecto viscoso en la construcción y manejo del modelo bajo el criterio de similitud de Froude, exige que el flujo en el mismo, en todos los casos, sea turbulento totalmente desarrollado además de que el factor adimensional de fricción “f” en la relación de Darcy-Weisbach sea igual en prototipo y modelo $f_p = f_m$, de este modo a pesar de que se tenga $Re_m < Re_p$, se logra la representación apropiada del patrón de flujo y de la pérdida porcentual de energía. **(REF. 7)**

Para que el número de Weber sea significativo la velocidad en el modelo debe ser superior a la del prototipo, según las escalas representadas en la Tabla 2.5.3.1. Tomando en cuenta el criterio de similitud de Froude la escala del parámetro adimensional de Weber se reduce a $We_r = V_r^2 L_r = L_r^2$. Por lo tanto, al aplicar la similitud de Froude se subestima la cantidad de aire que ingresa a la masa de agua, puesto que $We_{\text{efec. m.}} < We_{\text{efect. p.}}$.

La valoración por separado de la influencia relativa de la viscosidad y de la tensión superficial en el modelo físico es normalmente imposible, ya que son efectos que se compensan entre sí. Mientras la tensión superficial en el modelo influye en el grado de curvatura de la superficie libre del agua, la viscosidad relativamente mayor en el modelo hace que esta incidencia sea menor. **(REF.7)**

Para la presión atmosférica constante la gravedad determina la presión piezométrica, y por consiguiente, las propiedades del flujo. Por lo tanto en cualquier situación del flujo cuando los efectos gravitacionales sean significativos, se debe considerar el número adimensional apropiado, es decir

el número de Froude, lo que significa que la similitud modelo-prototipo se lleva a cabo con la similitud relacionada con dicho número, es decir el Fr es el mismo en el modelo y en el prototipo. Además se debe garantizar, la semejanza geométrica así como la reproducción del patrón de flujo.

2.5.2 PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE.

Dadas las necesidades del Programa de Saneamiento Ambiental de la EMAAP-Q de diseñar un modelo óptimo de disipación de energía para el sistema de alcantarillado del centro histórico de Quito, se procedió al diseño, construcción, y montaje de una rápida escalonada con una relación $h/l = 0.10$ predeterminada por el PSA a partir de la construcción de colectores con rápidas diseñadas con dicha relación, en el canal hidrodinámico del Centro de Investigaciones y Estudio en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional con el fin de determinar las características del flujo en dicha rápida.

2.5.3 DISEÑO.

Teniendo en cuenta las limitaciones en la altura de la sección transversal del canal hidrodinámico que es de 0.80 [m], así como el caudal máximo de $Q = 10\text{m}^3/\text{s}$ a ser ensayado en el modelo, y las características geométricas de una de las rápidas escalonada del plan maestro de alcantarillado del Centro Histórico de Quito: ancho $b=1.20\text{m}$, altura de grada $h=0.50\text{ m}$, longitud de grada $l= 5\text{m}$; se determinó una escala de longitudes 1:8 con relación al prototipo indicado, dimensionando el modelo experimental bajo la ley de similitud de Froude.

El modelo tiene una longitud total de desarrollo de 6.125 [m] de largo y 0.15 [m] de ancho, con una altura total o desnivel de la rápida de 0.375 m, limitando el modelo a seis gradas, cada una de $h=0.0625\text{ [m]}$ y $l=0.625\text{ [m]}$. (Figura 2.5.1)

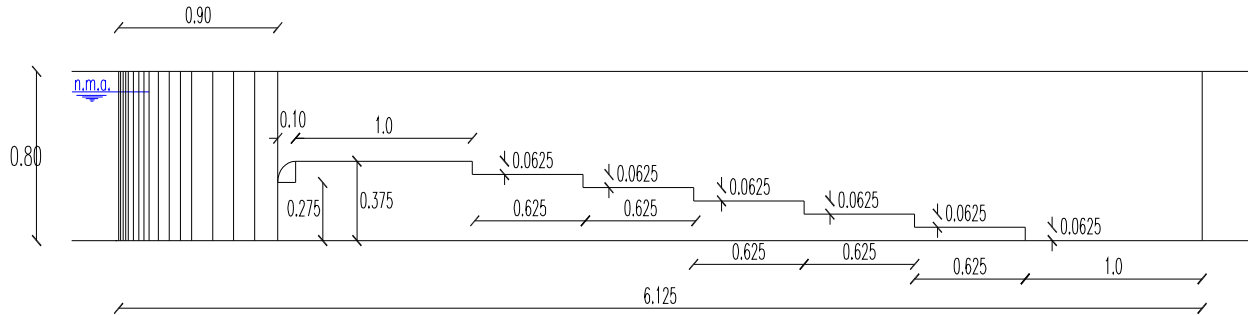


Figura 2.5.1

Al inicio de la rápida se dispondrá de un tramo de 1.00 [m] de longitud y 0.15 [m] de ancho para lograr un flujo de aproximación sin ondas cruzadas hacia las gradas, el mismo que inicia con una curva de 10 [cm] de radio que lo une con el vertedor y una transición en curva que responde a dos ecuaciones, para unir el canal hidrodinámico de 1 [m] de ancho con el del canal del modelo de 0.15 [m]. (Figura 2.5.2)

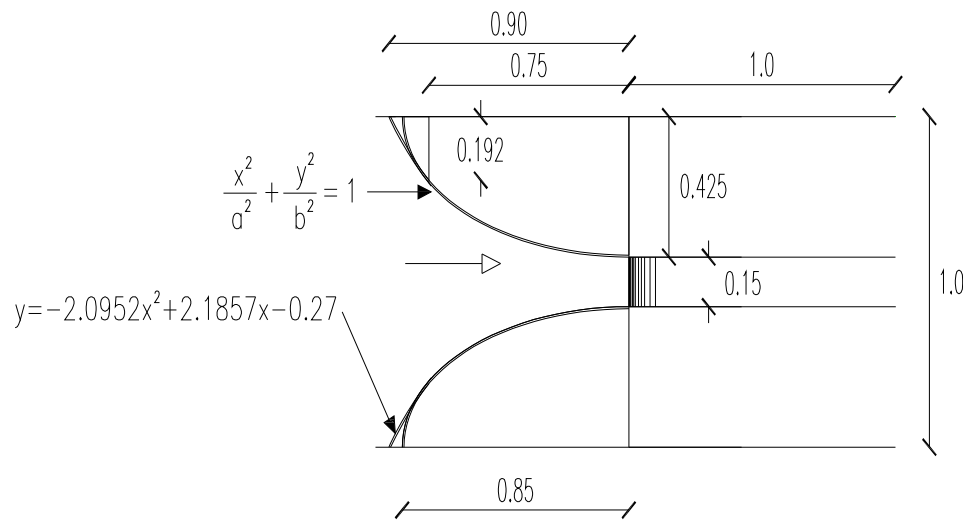


Figura 2.5.2

La primera curva con perfil de un cuarto de elipse de relación 1:2 que tiene de longitud del eje mayor 0.85 [m] y del eje menor 0.425 [m], correspondiente a la ecuación (2.5.1) hasta el valor del eje mayor de 0.75 [m].

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2.5.1)$$

Ecuación de la elipse		
Semieje mayor	a (m)	0.85
Semieje menor	b (m)	0.425

Coordenadas de la 1ª curva	
0 [m] < x 0.75 [m]	
y [m]	x [m]
0.425	0
0.424	0.05
0.422	0.1
0.418	0.15
0.413	0.2
0.406	0.25
0.398	0.3
0.387	0.35
0.375	0.4
0.361	0.45
0.344	0.5
0.324	0.55
0.301	0.6
0.274	0.65
0.241	0.7
0.200	0.75
0.144	0.8
0.000	0.85

Tabla 2.5.1 Coordenadas de la curva que responde a la ecuación 3.1

A partir del valor 0.75 [m] del eje mayor de la elipse se traza la segunda curva, correspondiente a la ecuación (2.5.2), para evitar el desprendimiento del flujo en las paredes de la transición. (Figura 2.5.3)

$$y = -2.0952 x^2 + 2.1857 x - 0.27 \quad (2.5.2)$$

Ecuación tramo final	
0,75 [m] ≤ X ≤ 0,9 [m]	
x	y
0.75	0.19
0.775	0.166
0.8	0.139
0.825	0.106
0.85	0.073
0.875	0.039
0.9	0

Tabla 2.5.2 Coordenadas de la curva que responde a la ecuación 2.5.2

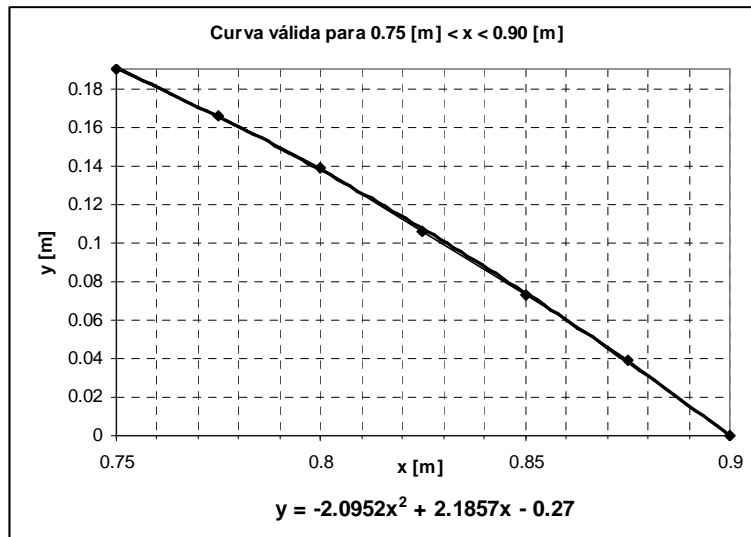


Figura 2.5.3

El tramo final del modelo para la restitución de los caudales será de 1 [m] incluyendo la última huella, (Figura 2.5.4)

Los niveles de agua serán controlados por la compuerta del canal hidrodinámico.

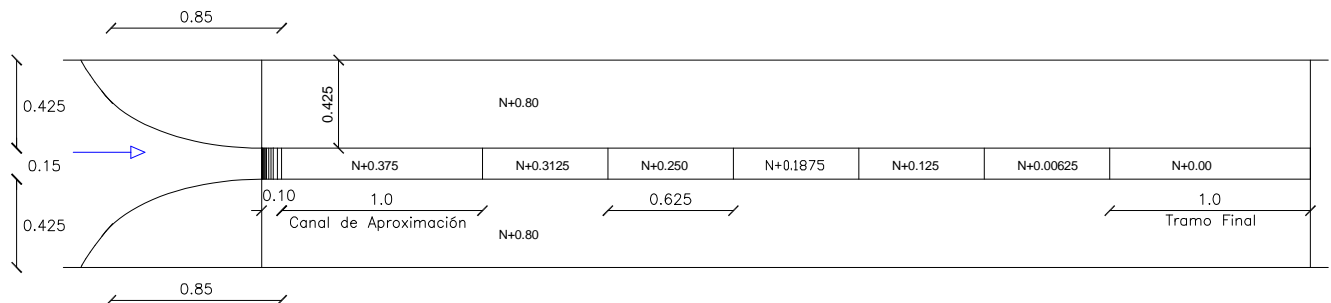


Figura 2.5.4

La altura del vertedor es 0.375 [m] la que fue definida considerando el caudal máximo del modelo que produce una energía mínima de 0.36 [m]. Teniendo en cuenta que la altura del canal hidrodinámico es de 0.80 [m] y a partir de los datos anteriores, la altura de seguridad para el modelo es 0.065 [m]. (Figura 2.5.5)

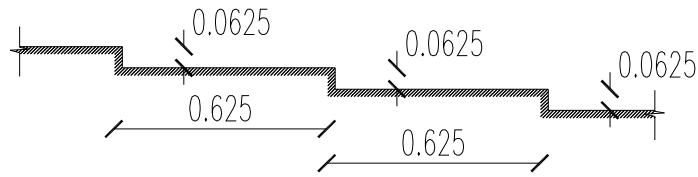


Figura 2.5.6.

El caudal máximo del prototipo (Q_p) es de $10 \text{ [m}^3/\text{s]}$, a partir del cual se obtiene el caudal máximo del modelo (Q_m) con la siguiente ecuación:

$$Q_m = \frac{Q_p}{L^{2.5}} \quad (2.5.5)$$

$$Q_m = \frac{10}{8^{2.5}}$$

$$Q_m = 0.055 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$Q_m = 55 \text{ [lt/s]}$$

El ancho de canal prototipo (b_p) es:

$$b_p = 1.20 \text{ [m]}$$

Entonces el ancho de canal del modelo (b_m) se calcula con:

$$b_m = \frac{b_p}{L} \quad (2.5.6)$$

$$b_m = \frac{1.20}{8}$$

$$b_m = 0.15 \text{ [m]}$$

En base al caudal del modelo se obtiene el caudal unitario (q):

$$q = \frac{Qm}{bm} \quad (2.5.7)$$

Donde Qm debe estar en [m³/s].

$$q = \frac{0.055}{0.15}$$

$$q = 0.3667 \text{ [m}^3\text{/s/m]}$$

La ecuación para determinar el calado crítico (yc) es la siguiente:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2.5.8)$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{0.3667^2}{9.81}}$$

$$y_c = 0.24 \text{ [m]}$$

Por lo tanto la energía mínima que determina el calado del remanso del flujo antes de acercarse al umbral del canal de aproximación de la rápida, se lo calcula de la siguiente manera:

$$E_{mín} = 1.5 y_c \quad (2.5.9)$$

$$E_{mín} = 1.5 \quad (2.5.10)$$

$$E_{mín} = 0.36 \text{ [m]}$$

Entonces la altura de seguridad (hs) es:

$$h_s = h_{\text{canal}} - E_{mín} - h_{\text{vertedor}} \quad (2.5.11)$$

$$h_s = 0.80 - 0.36 - 0.375$$

$$h_s = 0.065 \text{ [m]}$$

2.5.4 CONSTRUCCIÓN

Una vez determinadas las dimensiones del modelo en la etapa de diseño, se procede a su construcción. Figura 2.5.7

2.5.4.1 MATERIALES

- Planchas de triplex tipo "C" de 18 mm.
- Planchas de triplex tipo "C" de 4 mm.
- Tornillos para madera cabeza plana de ranura 5 x $\frac{3}{4}$
- Planchas de acrílico de 2,40 m x 1,50 m x 6 mm.
- Tablones de laurel.
- Clavos de 1 $\frac{1}{2}$ plgd., sin cabeza.
- Pega blanca.
- Pintura de caucho color azul eléctrico.
- Pintura esmalte color azul eléctrico.
- Silicón transparente ABRO 1200.
- Lija FANDELLI N° 80.
- Lija NORTON N° 60.
- Pernos de acero inoxidable 5/16 x 1 $\frac{1}{4}$ de rosca fina (con rosca en todo el perno).
- Manguera sanitaria transparente de 5/32 mm. (diámetro interior).
- Tubos de cristal de 12 mm (1,20 m de largo).

2.5.4.2 EQUIPO DE MANO.

- Lápiz, reglas y flexómetro.
- Martillo
- Formón
- Cepillo de mano
- Nivel de mano de 50 [cm]
- Sierra para hierro diente fino
- Pistola para silicón.
- Escuadra

- Brocha.

2.5.4.3 MAQUINARIA.

- Sierra circular
- Caladora eléctrica.
- Cepillo de mesa.
- Sierra de cinta.

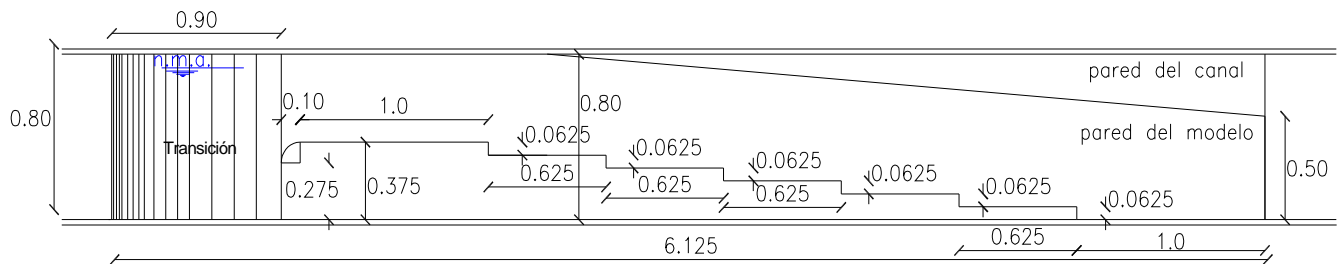


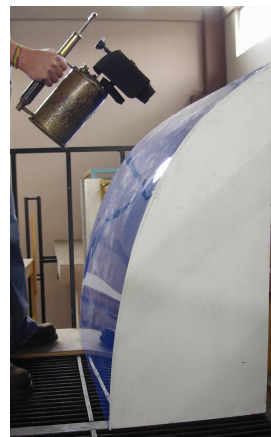
Figura 2.5.7

2.5.4.4 PROCEDIMIENTO

- Trazar y cortar las planchas triplex de 18 [mm] y 4 [mm], las planchas de acrílico y los tablonés, según las dimensiones establecidas. (paredes, huellas, contrahuellas, accesos, bases y vertedor). (Figura 2.5.8)



Fotografía 2.5.8



Fotografía 2.5.9

- Construir la estructura de soporte para las transiciones curvas con las bases de triplex y los tablonés.

- Recubrir el tramo curvo de la estructura de soporte, con la ayuda de un soplete a gasolina, adaptando la lámina de acrílico a la forma requerida. (Figura 2.5.9)
- Elaborar la curva de 10 [cm] de radio en una pieza maciza de madera con la sierra de cinta. (Figura 2.5.10)
- Trazar los escalones en las paredes de acrílico y de madera cortadas previamente y pegar las guías para colocar las huellas y contrahuellas. (Figura 2.5.11)



Fotografía 2.5.10



Fotografía 2.5.11

- Fijar las paredes en una base de triplex asegurándolas con travesaños de madera. (Figura 2.5.12)



Fotografía 2.5.12

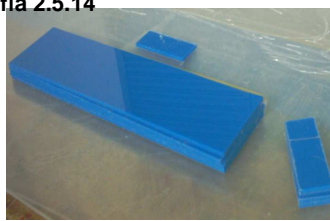


Fotografía 2.5.13

- Pintar las secciones de madera para disminuir los efectos del agua sobre ellas, aplicando pintura esmalte sobre una base de pintura de caucho. (Figura 2.5.13)
- Perforar las huellas y contrahuellas para ubicar los piezómetros en los puntos de análisis (segundo y cuarto escalón) y las bases para fijar el anal. (Figura 2.5.14)



Fotografía 2.5.14



2.5.5 MONTAJE.

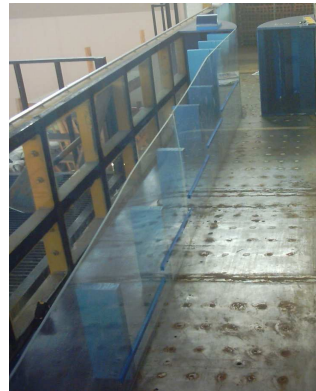
Construidos los elementos antes mencionados se procede al montaje del modelo en el canal hidrodinámico.

2.5.5.1 PROCEDIMIENTO

- Asegurar con pernos las estructuras de transición curvas en los orificios predeterminados en la base del canal, dispuestos a lo largo del canal a una distancia de 1.20 metros y a lo ancho a una distancia de 0.225 metros. (Figura 2.5.15)



Fotografía 2.5.15



Fotografía 2.5.16

- Fijar con pernos las estructuras laterales que conforman las paredes del modelo tomando en cuenta la perpendicularidad con la base del canal, utilizando el nivel de mano. (Figura 2.5.16)
- Colocar el vertedor unido a la curva de 10 [cm] de radio fijándolas con silicón a la estructura de transición. (Figura 2.5.17)



Fotografía 2.5.17

- Pasar las mangueras a través de los orificios piezométricos del fondo del canal y empatar con los orificios en huellas y contrahuellas.
- Unir el otro extremo de las mangueras a los tubos de vidrio, colocados previamente en un tablero, los mismos que servirán para la medición de las presiones en las pruebas posteriores.
- Fijar las huellas y contrahuellas a las guías de las paredes del modelo con acrílico líquido y silicón. (Figura 2.5.18)



Fotografía 2.5.18



Fotografía 2.5.19

- Impermeabilizar las uniones de los elementos entre si y el modelo en conjunto con las paredes y base del canal hidrodinámico. (Figura 2.5.19)

2.6 PLAN DE PRUEBAS PARA RÁPIDA ESCALONADA CON GRADA HORIZONTAL PARA LA RELACIÓN ALTURA (h) / LONGITUD (l), $h/l = 0.10$

En el proceso de diseño se expuso sobre el máximo caudal que puede circular por el canal hidrodinámico para evitar problemas de desbordamiento, constituyéndose este en el principal limitante de los ensayos a realizarse.

2.6.1 CAUDALES A SER ENSAYADOS

Rápida con 6 escalones

$$h = 0.0625 \text{ m}, l = 0.625 \text{ m y } h/l = 0.10$$

El rango de caudales a ser ensayados para el canal hidrodinámico en posición horizontal se presenta en la Tabla 2.6.1:

Qprototipo [m ³ /s]	Qmodelo [m ³ /s]
1	0.0055
2	0.011
3	0.0166
4	0.0221
5	0.0276
6	0.0331
7	0.0387
8	0.0442
9	0.0497
10	0.0552

Tabla 2.6.1.

El rango de caudales a ser ensayados para el canal hidrodinámico con una pendiente del 4% (Inclinación de la rápida = 14%) se presenta en la Tabla 2.6.2:

Qprototipo [m ³ /s]	Qmodelo [m ³ /s]
2	0.011
5	0.0276
8	0.0442
10	0.0552

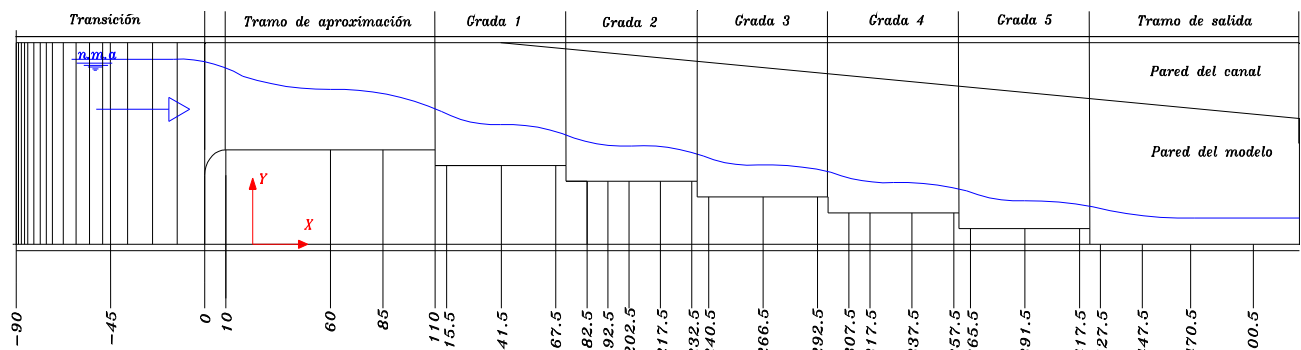
Tabla 2.6.2.

2.6.2 DETERMINACIÓN DE CALADOS Y PERFILES DE FLUJO

El instrumento utilizado para este propósito será el limnómetro mecánico de 0.1 milímetros de precisión, con el cual se procederá a tomar datos de la altura de agua, a partir de la estructura de transición y a lo largo de toda la rápida, tomando como cero del eje "x" al umbral del tramo de aproximación, para cada caudal.

Las medidas a lo largo del eje “x” serán tomadas perpendicularmente a la corriente de flujo y generalmente tres en cada grada, cuando éstas no tengan tomas de piezómetros, e iguales al número de piezómetros ubicados sobre la grada, cuando éstos los tengan. Las secciones de medición de las profundidades del flujo o calados se indican en la figuras 2.6.1 y 2.6.2 Esta disposición podría variar según la necesidad de datos que se presente para un eficiente gráfico del perfil de flujo del caudal analizado.

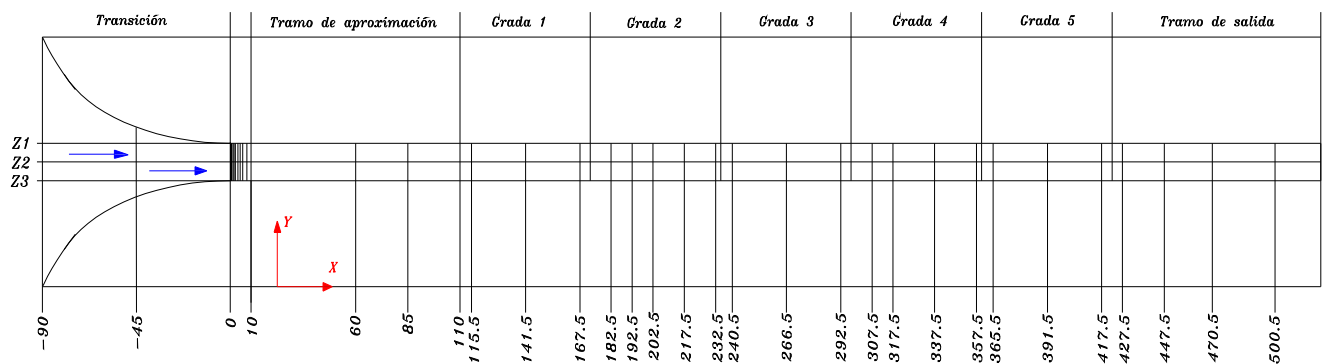
En el eje “z” (sentido perpendicular al flujo), se tomarán tres mediciones de calados en el centro y en puntos cercano a las paredes del canal, con el fin de obtener un calado medio. (Figura 2.6.2).



(Unidad de longitud: cm.)

VISTA EN CORTE

Figura 2.6.1



(Unidad de longitud: cm.)

VISTA EN PLANTA

Figura 2.6.2

Para los calados en flujo rasante, donde la lámina de agua tiene una pendiente prácticamente paralela al de la rápida escalonada a lo largo del eje "x", se deben medir los calados utilizando un soporte inclinado de acuerdo a dicha pendiente, lo

que permitirá hacer mediciones perpendiculares al flujo. Dichas mediciones se realizarán sobre los bordes de cada grada.(Figura 2.6.3).

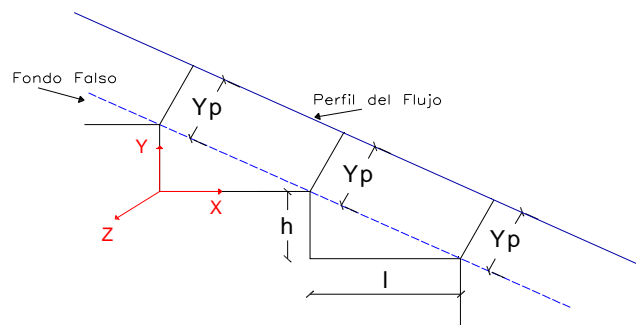


Figura 2.6.3

2.6.3 MEDICIONES DE VELOCIDAD.

Las velocidades puntuales en las secciones transversales al flujo serán tomadas con ayuda del micromolinete en las secciones definidas previamente a lo largo del modelo, donde el calado sea lo suficientemente alto para este proceso, tratando siempre de mantener una posición paralela al flujo de la hélice del micromolinete. Las velocidades son registradas directamente en el equipo y presentadas en m/s.

Por otro lado, se procederá al cálculo de las velocidades medidas en la misma sección hidráulica donde estos fueron medidos, a objeto de comparar los valores obtenidos por ambos métodos.

En cada sección establecida previamente en el sentido longitudinal (eje "x") (Figura 2.6.1 y 2.6.2), los registros de velocidad serán tomados en el punto medio de la sección transversal (eje "z") y a 0.2 y 0.8 de la altura de agua

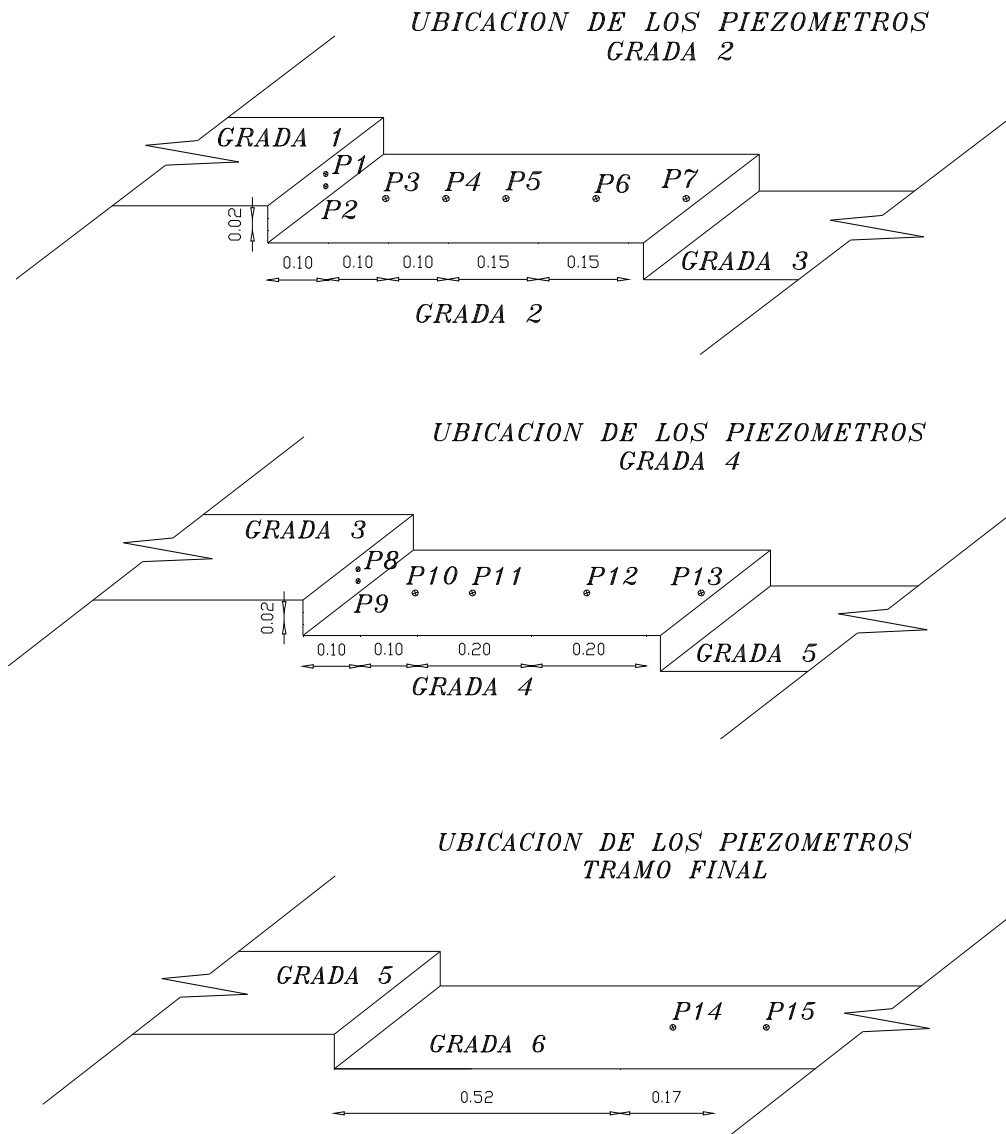


Figura 2.6.5

Sobre la contrahuella del mismo escalón se instalarán dos tomas piezométricas a cada tercio de la altura y en la mitad del ancho de la grada. Figuras 2.6.5

Se ubicarán además dos tomas piezométricas aguas abajo del extremo de la rápida, la primera en el sitio donde se puede desprender el flujo del fondo del canal y la segunda donde es flujo tienda a estabilizarse y su distribución sea hidrostática.

En total el conjunto de datos de las cargas de presión será de quince mediciones por caudal cada una de su respectivo tubo piezométrico, con lo se obtendrá la distribución del valor medio de presión que actúa sobre la toma piezométrica para cada caudal y de los valores máximos y mínimos que se presentan sobre los escalones.

2.7 METODOLOGÍA APLICADA EN EL PROCESO EXPERIMENTAL PARA DIFERENTES REGIMENES DE FLUJO.

Los límites superior e inferior para cada régimen de flujo para esta rápida escalonada serán calculados con las fórmulas descritas al inicio de este capítulo y para los parámetros de diseño del prototipo que son Altura del escalón $(h) = 0.50$ [m], Longitud del escalón $(l) = 5$ [m], Caudales de prototipo (Q_p) , cuyos valores se encuentran expresados a continuación:

2.7.1 DETERMINACIÓN DE LÍMITES PARA LOS TIPOS DE FLUJOS QUE SE PRESENTAN EN LA RÁPIDA ESCALONADA DE RELACIÓN $h/l = 0.10$

2.7.1.1. LÍMITE INFERIOR DE LA ALTURA DEL ESCALÓN PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN

Aplicando la ecuación (2.1.2), detallada en este capítulo, tenemos:

$$\left(\frac{h}{0.414}\right) = 0.57(0.1)^3 + 1.3 = 1.301$$

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{1}{1.2}\right)^2}{9.81}}$$

A partir de:

$$Y_c = 0.414 \text{ [m]}$$

Donde Y_c es el calado crítico determinado para el caudal mínimo de diseño que es de 1 [m³/s] y el ancho del canal de 1.20 [m]

Entonces: $h_{\text{mín}} = 1.301 * 0.414$

$$h_{\text{mín}} = 0.538 \text{ [m]}$$

Lo que quiere decir que para la formación del régimen escalón a escalón, la altura de la grada debería ser mayor a 0.538 [m], pero en el prototipo la altura es de 0.50 [m], por lo que teóricamente este tipo de flujo no ocurrirá en esta rápida, sino para caudales menores.

Utilizando la misma ecuación 2.1.2, calculamos el valor del caudal límite superior hasta el cual teóricamente, para un $h = 0,50$ m. se obtendrá flujo grada a grada, es decir:

$$\left(\frac{0.50}{Y_c} \right) = 1.301$$

De donde:

$$Y_c = \frac{0.50}{1.301} = 0.3843$$

$$Q = q \times 1.20$$

$$Q = \sqrt{(Y_c^3 * 9.81)} \times 1.20 = \sqrt{(0.3843^3 * 9.81)} \times 1.20$$

$$Q = 0.90 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Este valor nos demuestra teóricamente que con la altura de la grada $h=0.50$ m, el flujo grada a grada se obtendría para caudales menores a $0.90 \text{ m}^3\text{/s}$.

2.7.1.2. LÍMITE INFERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACION DEL FLUJO

EN TRANSICION

Utilizando la Ecuación (2.1.4), detallada al inicio de este capítulo, tenemos:

$$\frac{Y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \cdot 0.1$$

$$\frac{Y_c}{h} > 0.9359$$

Donde:

$$h = \text{altura de la grada del Prototipo} = 0.0625 \cdot 8$$

Entonces:

$$Y_c > 0.9359 \cdot 0.5 > 0.468 \text{ m.}$$

Por otro lado:

$$Q = q \cdot 1.2$$

$$Q = \sqrt{0.468^3 \cdot 9.81} \cdot 1.2$$

$$Q > 1.20 \text{ m}^3/\text{s}$$

Es decir, que de acuerdo a la ecuación 2.1.4, se obtendrá regímenes de flujo en transición a partir de un caudal $Q > 1,20 \text{ m}^3/\text{s}$, para $h = 0,50 \text{ m}$. en prototipo.

2.7.1.3. LÍMITE SUPERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACION DEL FLUJO

EN TRANSICIÓN

Utilizando la Ecuación (2.1.5), detallada al inicio de este capítulo, tenemos:

$$\frac{Y_c}{h} < \frac{0.9821}{(0.1 + 0.388)^{0.384}}$$

$$\frac{Y_c}{h} < 1.294$$

Donde:

h = altura de la grada del Prototipo = $0.0625 \cdot 8$

Entonces:

$$Y_c > 1.294 \cdot 0.5 > 0.674 \text{ m.}$$

Por otro lado:

$$Q = q \cdot 1.2$$

$$Q = \sqrt{0.674^3 \cdot 9.81} \cdot 1.2$$

$$Q < 1.96 \text{ m}^3/\text{s} \approx 2 \text{ m}^3/\text{s}$$

De los dos resultados de caudales límites inferior y superior para el flujo en transición se desprende que para $h/l = 0.10$ y $h = 0,50$ m. se tendría flujo con régimen en transición para caudales $1.20 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 2 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que se podrá comprobar a su respectiva escala durante el proceso experimental.

2.7.1.4. LÍMITE SUPERIOR DE LA ALTURA DEL ESCALÓN PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO RASANTE

Aplicando la ecuación (2.1.8), detallada al inicio de este capítulo, se tiene:

$$\frac{h}{1.92} = 1.16 \cdot (0.10)^{0.165} = 0.793$$

A partir de:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{10}{1.2}\right)^2}{9.81}}$$

$$Y_c = 1.92 \text{ [m]}$$

Donde Y_c es el calado crítico determinado para el caudal máximo de diseño que es de 10 [m³/s] y el ancho del canal de 1.20 [m]

$$h_{\text{máx}} = 1.92 \times 0.793 = 1.52 \text{ [m]}$$

Como la altura del escalón es menor que 1.52 m, es decir $h = 0,50$ m, entonces para el caudal de 10 [m³/s] teóricamente se va a tener flujo rasante, y para caudales inferiores a este hasta 2 m³/s como lo indicado en el cálculo del numeral anterior (límite superior del flujo con régimen en transición).

2.7.1.5. LÍMITE INFERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DE FLUJO

RASANTE

Utilizando la Ecuación (2.1.6), detallada en este capítulo, se tiene:

$$\frac{Y_c}{h} > 1.057 - 0.465 \cdot 0.1 > 1.0105$$

$$\frac{Y_c}{h} > 1.0105$$

Donde:

$$h = \text{altura de la grada del Prototipo} = 0.0625 \cdot 8$$

Entonces:

$$Y_c > 1.0105 \cdot 0.5$$

$$Y_c > 0.50525$$

Por otro lado:

$$Q = q * 1.2$$

$$Q = \sqrt{0.50525^3 * 9.81} * 1.2$$

$$Q = 1.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tipo de Flujo	Caudales [m ³ /s]
Grada a Grada	Q < 0.9
Transición	1.2 < Q < 2
Rasante	Q > 1.35

Tabla 2.7.1. Tipos de regímenes de flujo par h/l = 0,10, h = 0,50 m. y b = 1,20 m.

2.8 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez obtenidos los datos de laboratorio y luego de observaciones durante el proceso experimental de las características y patrones de flujo sobre la rápida escalonada, para efectos de cálculo de la carga de energía disipada del flujo con las ecuaciones: 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5, y 2.2.6, se agrupa los regímenes de flujo observados, en dos tipos: Flujo Grada a Grada para los caudales de 1m³/s a 4m³/s y Flujo Rasante desde 5 m³/s hasta 10 m³/s. En la bibliografía existente sobre disipación de energía con régimen de flujo en transición, no se dispone de ecuaciones analíticas o experimentales.

Lo indicado concuerda en parte con los rangos de caudales calculados e indicados en la tabla 2.7.1, para lograr los distintos regímenes de flujo en el canal escalonado, objeto del presente estudio; sin embargo, al agrupar los flujos ensayados en regímenes grada a grada y rasante, se dejó de lado el régimen en transición que se observó con sus características de flujo caótico para caudales entre 2 y 4 m³/s contrastado con lo calculado, que es entre 1,2 y 2 m³/s. La razón de estos valores de caudales menores a los observados para el régimen en transición y de grada a grada se debe a que las ecuaciones para determinar estos límites corresponden a valores de h/l ≥ 0.10; es decir, que nos encontramos en el límite inferior de la aplicación de las fórmulas.

En los gráficos de Porcentaje de disipación de energía y de Factor de fricción “f” se incluirá la grafica de la línea de tendencia de estos valores con el objetivo de extrapolar los resultados en caso de ser necesario, se aplicaran las condiciones estadísticas limites para su aplicación y su grafico será obtenido directamente con la ayuda del programa Excel. Cabe señalar que este proceso será utilizado a lo largo de todo este estudio para cada uno de los modelos analizados.

El valor de R^2 indicado en los gráficos donde se muestran líneas de tendencia es un parámetro que indica el valor y la calidad de los datos obtenidos en laboratorio, cuando el valor de $R^2 \approx 1$ significa que la línea de tendencia pasa sobre ellos o cubre todo su espacio de variación, mientras que si el valor de $R^2 \approx 0.6$ o menor los resultados de esa grafica podrían proporcionar datos dudosos o de poco valor.

Con esta aclaración se muestran a continuación ejemplos para cada caso de flujo, en los cuales se determinara: velocidades, perfiles de flujo, distribución de cargas de presión y disipación de energía al final de la estructura.

2.8.1 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO GRADA A GRADA.

Como ya se ha indicado y justificado, para efectos del procesamiento de datos y determinar perfiles de flujo, velocidades y porcentaje de disipación de energía a lo largo de la rápida escalonada, se agrupan los cuatro primeros caudales ensayados como flujo grada a grada, incorporando los caudales que en la práctica corresponden al flujo en transición, que son aquellos entre $1 \leq Q \leq 4$ m³/s.

A continuación se desarrolla un ejemplo de cálculo para $Q = 2$ m³/s, cuyo procedimiento para determinar velocidades y disipación de energía es similar para los caudales 1, 3 y 4 m³/s.

2.8.1.1 PERFIL DE FLUJO

El Perfil de Flujo se obtiene con la ayuda del Limnómetro, deslizándolo a lo largo del modelo y tomando medidas transversales del flujo en ambos extremos y en el centro (Figura 2.8.1). Los datos obtenidos para este caudal pueden ser observados en la Tabla 2.8.1.a

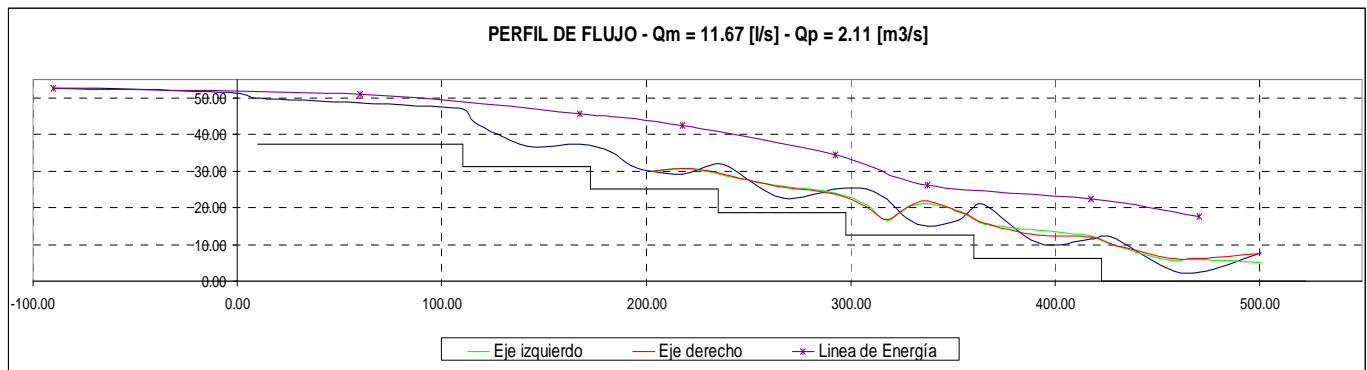


FIGURA 2.8.1. Perfil de Flujo para $Q_m = 11.67$ [l/s] - $Q_p = 2.11$ [m³/s]

Elemento	Nº	x [cm]	y fondo [cm]	y(izq) [cm]	y(cent) [cm]	y(der) [cm]	h [cm]	h [m]
			promedio	z 1	z 2	z 3	carga	carga
Transición	1	-90.00	1.94		54.45		52.51	0.525
	2	-45.00	1.94		54.38		52.44	0.524
	3	0.00	1.94		53.18		51.24	0.512
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	39.86		51.74		11.88	0.119
Canal de aprox. (1.0 m)	5	85.00	39.74		50.5		10.76	0.108
	6	110.00	39.74		49		9.26	0.093
Grada 1	7	115.50	33.38		45.55		12.17	0.122
	8	141.50	33.38		38.73		5.35	0.053
	9	167.50	33.38		39.42		6.04	0.060
Grada 2	10	182.50	27.04		37.15		10.11	0.101
	11	192.50	27.04		33.43		6.39	0.064
	12	202.50	27.04	31.87	31.87	31.87	4.83	0.048
	13	217.50	27.04	32.53	31.06	32.53	5.00	0.050
	14	232.50	27.04	31.54	33.84	31.77	5.34	0.053
Grada 3	15	240.50	20.79	30.56	33.24	30.9	10.78	0.108
	16	266.50	20.79	27.9	24.66	27.6	5.93	0.059
	17	292.50	20.79	26.05	27.1	25.69	5.49	0.055
Grada 4	18	307.50	14.68	22.66	27.17	22.26	9.35	0.094
	19	317.50	14.68	18.47	24.24	18.89	5.85	0.059
	20	327.50	14.68	21.93	18.9	21.93	6.24	0.062
	21	337.50	14.68	23	15.25	23.79	6.00	0.060
	22	352.50	14.68	21.06	16.5	20.97	4.83	0.048
	23	357.50	14.68	19.89	20.76	20.14	5.58	0.056
Grada 5	24	365.50	8.49	17.47	22.8	17.58	10.79	0.108
	25	391.50	8.49	15.86	12.4	14.4	5.73	0.057

	26	417.50	8.49	14.16	13.48	13.84	5.34	0.053
Tramo salida (1.0 m)	27	427.50	1.83	12.1	13.87	11.96	10.81	0.108
	28	453.50	1.83	7.75	5.74	8.3	5.43	0.054
	29	470.50	1.83	7.9	4.44	7.95	4.93	0.049
	30	500.50	1.83	7.04	9.81	9.37	6.91	0.069

Tabla 2.8.1.a. Calados medidos y promedio en las secciones transversales a lo largo de la rápida

Donde:

y (izq), y (cent), y (der),: Calados medidos sobre una sección transversal del flujo (eje z de la figura 2.6.2)

h: Calado promedio en una sección transversal de la rápida menos la altura del fondo (Carga de Agua)

$$h = \frac{\sum_{i=1}^3 h_i}{3} - y_{fondo} \quad (2.8.1)$$

Para efectos de cálculo se tomará como ejemplo los valores obtenidos para $x = 217.5$ cm. La totalidad de los cálculos se encuentra en el Anexo 1.a.

$$y \text{ (izq)} = 0.3253 \text{ m}$$

$$y \text{ (cent)} = 0.3106 \text{ m}$$

$$y \text{ (der)} = 0.3253 \text{ m}$$

$$y \text{ fondo} = 0.2704 \text{ m}$$

Entonces: $h = (0.325+0.3106+0.3253)/3 - 0.2704$

$$h = 0.05 \text{ m}$$

2.8.1.2 VELOCIDADES MEDIDAS CON EL MICROMOLINETE. (Tabla 2.8.2.a)

Elemento	Nº	x [cm]	V [m/s]
			micromolinete $0.4 \times h$
Transición	1	-90.00	
	2	-45.00	
	3	0.00	
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	
Tramo aprox. (1.0 m)	5	85.00	0.694
	6	110.00	
Grada 1	7	115.50	
	8	141.50	
	9	167.50	1.659
Grada 2	10	182.50	
	11	192.50	
	12	202.50	
	13	217.50	1.984
	14	232.50	
Grada 3	15	240.50	

	16	266.50	
	17	292.50	1.870
Grada 4	18	307.50	
	19	317.50	
	20	327.50	
	21	337.50	2.094
	22	352.50	
	23	357.50	
Grada 5	24	365.50	
	25	391.50	
	26	417.50	2.033
Tramo salida (1.0 m)	27	427.50	
	28	453.50	
	29	470.50	1.854
	30	500.50	2.085

Tabla 2.8.2.a. Velocidades medias medidas en las secciones transversales a lo largo de la rápida

Para el mismo punto sobre el eje longitudinal $x = 217.5$ cm, el valor de la velocidad medida con el micromolinete es:

$$V \text{ (m/s)} = 1.984$$

Las velocidades medidas para los restantes caudales se encuentran detalladas en el Anexo 1.a.

2.8.1.3 VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO (h):

x [cm]	y fondo [cm]	yr(izq) [cm]	yr(cent) [cm]	yr(der) [cm]	h [cm]	h [m]	A [m ²]	V [m/s]
	promedio	z 1	z 2	z 3	carga	carga		
-90.00	1.94		54.45		52.51	0.525		
-45.00	1.94		54.38		52.44	0.524		
0.00	1.94		53.18		51.24	0.512		
10.00	39.86		51.74		11.88	0.119		
85.00	39.74		50.5		10.76	0.108	0.016	0.723
110.00	39.74		49		9.26	0.093		
115.50	33.38		45.55		12.17	0.122		
141.50	33.38		38.73		5.35	0.053		
167.50	33.38		39.42		6.04	0.060	0.009	1.288
182.50	27.04		37.15		10.11	0.101		
192.50	27.04		33.43		6.39	0.064		
202.50	27.04	31.87	31.87	31.87	4.83	0.048		
217.50	27.04	32.53	31.06	32.53	5.00	0.050	0.008	1.556
232.50	27.04	31.54	33.84	31.77	5.34	0.053		
240.50	20.79	30.56	33.24	30.9	10.78	0.108		
266.50	20.79	27.9	24.66	27.6	5.93	0.059		
292.50	20.79	26.05	27.1	25.69	5.49	0.055	0.008	1.417

307.50	14.68	22.66	27.17	22.26	9.35	0.094		
317.50	14.68	18.47	24.24	18.89	5.85	0.059		
327.50	14.68	21.93	18.9	21.93	6.24	0.062		
337.50	14.68	23	15.25	23.79	6.00	0.060	0.009	1.297
352.50	14.68	21.06	16.5	20.97	4.83	0.048		
357.50	14.68	19.89	20.76	20.14	5.58	0.056		
365.50	8.49	17.47	22.8	17.58	10.79	0.108		
391.50	8.49	15.86	12.4	14.4	5.73	0.057		
417.50	8.49	14.16	13.48	13.84	5.34	0.053	0.008	1.458
427.50	1.83	12.1	13.87	11.96	10.81	0.108		
453.50	1.83	7.75	5.74	8.3	5.43	0.054		
470.50	1.83	7.9	4.44	7.95	4.93	0.049	0.007	1.577
500.50	1.83	7.04	9.81	9.37	6.91	0.069	0.010	1.126

Tabla 2.8.3.a. Velocidades medias calculadas utilizando el calado promedio en las secciones transversales a lo largo de la rápida

Para determinar la velocidad se aplican las siguientes fórmulas:

$$\text{Velocidad media: } V = \frac{Q}{A} \quad [m/s] \quad \text{y} \quad \text{Área hidráulica: } A = h \cdot B \quad [m^2]$$

Como ejemplo de cálculo se utilizarán los valores del punto $x = 217.5$ cm, que es el mismo que ha sido analizado en los cálculos anteriores. Los cálculos para todos los valores de “x” y para todos los caudales se encuentran en el Anexo 1.a.

$$x = 217.5 \text{ cm}$$

$$Q_m = 0.011671 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$B = 0.15 \text{ m (ancho del canal modelo)}$$

$$h = 0.05 \text{ m (calado)}$$

Entonces:

$$A = 0.05 \cdot 0.15 = 0.0075 \quad [m^2]$$

$$V = \frac{0.011671}{0.0075} \quad [m/s]; \quad V = 1.556 \quad [m/s]$$

2.8.1.4 CARGAS PIEZOMÉTRICAS PROMEDIO.

Las cargas piezométricas en las gradas 2 y 4 para el $Q_p = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, son:

		Carga Piezométrica			
		Modelo		Prototipo	
		[cm]	[m]	[m]	
Grada 2	Cara Vertical	P1	2.50	0.025	0.200

Figura 2.8.2

Elemento	Nº	x [cm]	h [m]	A [m ²]	V [m/s]	z [m]	V ² /2g [m]	Energía Remanente [m]	
			carga						
Transición	1	-90.00	0.525	0.525	0.022	0	2.52E-05		0.525
	2	-45.00	0.524						
	3	0.00	0.512						
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	0.119						
Canal aprox. (1.0 m)	5	85.00	0.108	0.016	0.723	0.375	0.0267	E0	0.509
	6	110.00	0.093						
Grada 1	7	115.50	0.122						
	8	141.50	0.053						
	9	167.50	0.060	0.009	1.288	0.313	0.085	E1	0.457
Grada 2	10	182.50	0.101						
	11	192.50	0.064						
	12	202.50	0.048						
	13	217.50	0.050	0.008	1.556	0.25	0.123	E2	0.423
Grada 3	14	232.50	0.053						
	15	240.50	0.108						
	16	266.50	0.059						
Grada 4	17	292.50	0.055	0.008	1.417	0.188	0.102	E3	0.345
	18	307.50	0.094						
	19	317.50	0.059						
	20	327.50	0.062						
Grada 5	21	337.50	0.066	0.010	1.185	0.125	0.072	E4	0.262
	22	352.50	0.055						
	23	357.50	0.056						
Tramo salida (1.0 m)	24	365.50	0.108						
	25	391.50	0.057						
	26	417.50	0.053	0.008	1.458	0.063	0.108	E5	0.224
Tramo salida (1.0 m)	27	427.50	0.108						
	28	453.50	0.054						
	29	470.50	0.049	0.007	1.577	0	0.127	E6	0.176
	30	500.50	0.069						

Tabla 2.8.5.a. Cargas de agua, posición, velocidad y energía calculada (Anexo 1.a)

Sección (0), localizado en el punto x = 85 [cm], sobre el canal de aproximación:

$$E_o = z_o + h_o + \frac{V_o^2}{2g} \quad (2.8.2)$$

Donde:

E_o = carga Energética en la sección (0)

$\frac{V_o^2}{2g}$ = Carga de velocidad en la sección (0)

$$\frac{V_0^2}{2g} = \frac{0.723^2}{2 \cdot 9.81}$$

$$\frac{V_0^2}{2g} = 0.0267$$

ho = carga de agua

$$h_o = 0.108 \text{ [m]}$$

Z_0 = Carga de posición en la sección (0)

$$Z_o = 0.375 \text{ [m]}$$

Reemplazando:

$$E_o = 0.375 + 0.108 + 0.0267$$

$$E_o = 0.509$$

Sección (6), aguas abajo del pie de la rápida.

$$E_6 = z_6 + h_6 + \frac{V_6^2}{2g} \quad (2.8.3)$$

Donde:

h6 = carga de agua en la sección (6)

$$h_6 = 0.049$$

$\frac{V_6^2}{2g}$ = Carga de velocidad en la sección (6)

$$\frac{V_6^2}{2g} = 0.127$$

Z_6 = Carga de posición en la sección (6)

$$Z_{61} = 0 \rightarrow \text{tramo final}$$

Reemplazando:

$$E_6 = 0.049 + 0.127$$

$$E_6 = 0.176 \text{ m}$$

Entonces el porcentaje de energía disipada es:

$$\Delta E = \left(\frac{E_0 - E_1}{E_0} \right) \cdot 100\% \quad (2.8.4)$$

$$\Delta E = \left(\frac{0.509 - 0.176}{0.509} \right)$$

$$\Delta E = 65.42\%$$

En la tabla 2.8.5.a se indican además los valores de la carga energética remanente en cada grada tomando las secciones hidráulicas en las abscisas "x" indicadas, donde se observó que el flujo tiene líneas de corriente paralelas al fondo.

2.8.1.6 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN 2.2.4 PARA FLUJO GRADA A GRADA

Donde:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\frac{3}{2 \cdot \sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h_{\text{escalón}}}{y_c} + \frac{3}{2}}}$$

$$h_{\text{escalón}} = 0.0625$$

$$Y_c = 0.085 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$\lambda = 0.55$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} = 1 - \frac{\lambda + \frac{1}{2} \cdot \lambda^{-2}}{\frac{h_{\text{vertedor}}}{y_c} + \frac{3}{2}}$$

Donde:

$$h_{\text{vertedor}} = 0.375$$

$$Y_c = 0.085 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{max}}} = 0.6298$$

$$\Delta E[\%] = \frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} \times 100$$

$$\Delta E[\%] = 62.98$$

2.8.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO RASANTE

El procedimiento de cálculo, se realizará para un caudal prototipo de 7 [m³/s], el cual se aplicará de manera similar a los ensayos realizados para los caudales en régimen rasante, indicados anteriormente, en la rápida escalonada de $h/l = 0.10$

2.8.2.1 PERFIL DE FLUJO

El perfil de flujo será determinado obteniendo el calado de agua promedio a partir de las mediciones realizadas con el limnómetro. (Anexo 1.a)

Elemento	Nº	x [cm]	y fondo [cm]	y(izq) [cm]	y(cent) [cm]	y(der) [cm]	h [cm]	h [m]
			promedio	z 1	z 2	z 3	carga	carga
Transición	1	-90.00	1.94		71.4		69.46	0.695
	2	-45.00	1.94		70.97		69.03	0.690
	3	0.00	1.94		68.3		66.36	0.664
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	39.86		66.50		26.64	0.266
Tramo aproximación (1.0 m)	5	60.00	39.74		59.30		19.56	0.196
	6	85.00	39.74		58.05		18.31	0.183
	7	110.00	39.74		56.27		16.53	0.165
Grada 1	8	115.50	33.38		55.49		22.11	0.221
	9	141.50	33.38		49.99		16.61	0.166

	10	167.50	33.38		47.48		14.10	0.141
Grada 2	11	182.50	27.04		45.86		18.82	0.188
	12	192.50	27.04		43.84		16.80	0.168
	13	202.50	27.04		41.99		14.95	0.149
	14	217.50	27.04		40.59		13.55	0.136
	15	232.50	27.04		39.68		12.64	0.126
Grada 3	16	240.50	20.79	38.93	38.93	38.93	18.14	0.181
	17	266.50	20.79	34.34	35.22	34.1	13.76	0.138
	18	292.50	20.79	33.72	31.86	33.71	12.31	0.123
Grada 4	19	307.50	14.68	32.16	30.7	31.75	16.86	0.169
	20	317.50	14.68	31.88	30.78	32.26	16.96	0.170
	21	337.50	14.68	26.9	27.5	27.17	12.51	0.125
	22	357.50	14.68	26.86	24.5	26.7	11.34	0.113
Grada 5	23	365.50	8.49	25.7	23.76	26.14	16.71	0.167
	24	391.50	8.49	20.58	21.7	20.37	12.39	0.124
	25	417.50	8.49	20	19.46	19.95	11.31	0.113
Tramo salida (1.0 m)	26	427.50	1.83	19.45	17.74	19.2	16.97	0.170
	27	447.50	1.83	15.06	15.9	14.43	13.30	0.133
	28	470.50	1.83	13.24	12.5	13.23	11.16	0.112
	29	500.50	1.83	13.3	13.3	13.5	11.54	0.115

Tabla 2.8.1.b Calados medidos y promedio en las secciones transversales a lo largo de la rápida

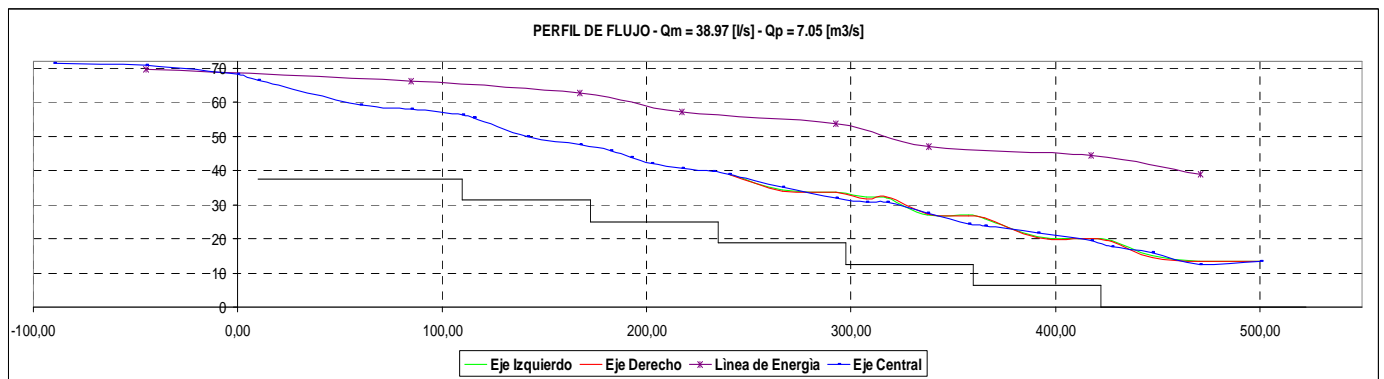


FIGURA 2.8.3. Perfil de Flujo para $Q_m = 38.7$ [l/s] - $Q_p = 7.05$ [m³/s] (Anexo 1.a)

Donde:

Y_{izq} , Y_{cent} , Y_{der} : calados medidos en cada sección transversal del flujo (eje "z").

h = Calado promedio en cada sección transversal analizada de la rápida.

$$h = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i}{3} - y_{fondo}$$

► Para el ejemplo se selecciona la abscisa: $x = 337.50$ cm

$$Y_{izq} = 0.269 \text{ m}$$

$$Y_{\text{cent}} = 0.275 \text{ m}$$

$$Y_{\text{der}} = 0.2717 \text{ m}$$

$$Y_{\text{fondo}} = 0.1468 \text{ m}$$

$$\text{Entonces: } h = 0.125 \text{ m}$$

2.8.2.2 VELOCIDADES MEDIDAS CON EL MICROMOLINETE

Elemento	Nº	x [cm]	V [m/s]		
			micromolinete		
			0.8 x h	0.2 x h	promedio
Transición	1	-90			
	2	-45			
	3	0.00			
Curva (r = 10 cm)	4	10			
Tramo aproximación (1.0 m)	5	60			
	6	85	1.410	1.387	1.399
	7	110			
Grada 1	8	115.5			
	9	141.5			
	10	167.5	1.973	1.971	1.972
Grada 2	11	183.5			
	12	192.5			
	13	202.5			
	14	217.5	2.394	2.076	2.235
Grada 3	15	232.5			
	16	240.5			
	17	266.5			
Grada 4	18	292.5	2.689	2.249	2.469
	19	307.5			
	20	317.5			
	21	337.5	2.722	2.507	2.615
	22	357.5			
Grada 5	23	365.5			
	24	391.5			
	25	417.5	2.829	2.726	2.778
Tramo salida (1.0 m)	26	427.5			
	27	447.5			
	28	470.5	2.861	2.716	2.789
	29	500.5			

Tabla 2.8.2.b Velocidades medias medidas en las secciones transversales a lo largo de la rápida (Anexo 1.a)

Donde:

0.8 x h; 0.2 x h: Lecturas de la velocidad media a 0.8 y 0.2 del calado promedio, tomadas desde el fondo del canal, en el punto medio de una sección trasversal determinada.

Promedio: velocidad media en la sección

► Para el ejemplo de escoge el valor de: **x = 337.5 cm**

$$0.8 \times h = 2.72 \text{ m/s}$$

$$0.2 \times h = 2.51 \text{ m/s}; \text{ de donde el promedio es: } V = 2.62 \text{ m/s}$$

2.8.2.3 VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO.

En el Anexo 1.a se cálculo las velocidades a partir del área y el caudal en cada sección de estudio

Elemento	Nº	x [cm]	h [m]	A [m2]	V [m/s]
			carga		
Transición	1	-90	0.695		
	2	-45	0.690		
	3	0.00	0.664		
Curva (r = 10 cm)	4	10	0.266	0.040	0.975
Tramo aprox. (1.0 m)	5	60	0.196		
	6	85	0.183	0.027	1.419
	7	110	0.165		
Grada 1	8	115.5	0.221		
	9	141.5	0.166		
	10	167.5	0.141	0.021	1.843
Grada 2	11	183.5	0.188		
	12	192.5	0.168		
	13	202.5	0.149		
	14	217.5	0.136	0.020	1.917
	15	232.5	0.126		
Grada 3	16	240.5	0.181		
	17	266.5	0.138		
	18	292.5	0.123	0.018	2.111
Grada 4	19	307.5	0.169		
	20	317.5	0.170		
	21	337.5	0.125	0.019	2.077
	22	357.5	0.113		
Grada 5	23	365.5	0.167		
	24	391.5	0.124		
	25	417.5	0.113	0.017	2.297
Tramo salida (1.0 m)	26	427.5	0.170		
	27	447.5	0.133		
	28	470.5	0.112	0.017	2.328
	29	500.5	0.115		

Tabla 2.8.3.b.
medias
el calado

Velocidades
obtenidas con
promedio

Velocidad media: $V = \frac{Q}{A} [m/s]$; Área hidráulica: $A = h \cdot b [m^2]$

Luego: Se escoge el valor: $x = 337.5$ cm

$$Q_p = 7 [m^3/s] \rightarrow Q_m = 0.0387$$

$$b = 0.15 \text{ m}$$

$$h = 0.125 \text{ m}$$

Entonces: $A = 0.125 \times 0.15 = 0.019 \text{ m}^2$

$$V = 2.077 [m/s]$$

Entre la velocidad medida y calculada en la sección $x = 337.5$ cm., se observó que la medida ($V = 2.62$ m/s) es mayor que la calculada ($V = 2.077$ m/s) en un 26% que resulta bastante significativo siendo una de las razones para esta

diferencia el que el equipo no se encuentre bien calibrado o en mal estado el sistema electromecánico, por lo que resulta más confiable para la determinación de la disipación de energía el valor de la velocidad calculada en cada una de las secciones del abscisado x , como una función del caudal Q y su área hidráulica A .

2.8.2.4 CARGAS DE PRESIÓN.

Los datos obtenidos de los piezómetros colocados en los escalones 2 y 4 son:

		Carga Piezométrica			
		Modelo		Prototipo	
		[cm]	[m]	[m]	
Grada 2	Cara Vertical	P1	8.8	0.088	0.704
		P2	10.8	0.108	0.864
	Cara Horizontal	P3	12.8	0.128	1.024
		P4	18	0.180	1.440
		P5	21.8	0.218	1.744
		P6	16.6	0.166	1.328
		P7	10.8	0.108	0.864
Grada 4	Cara Vertical	P8	4.8	0.048	0.384
		P9	7.8	0.078	0.624
	Cara Horizontal	P10	9.2	0.092	0.736
		P11	14.5	0.145	1.160
		P12	16.5	0.165	1.320
		P13	8.5	0.085	0.680

Tabla 2.8.4.b Cargas de presiones medidas en cada piezómetro.

2.8.2.5 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.

El grado de disipación de energía que se presenta en la estructura, será calculado mediante la ecuación de Bernoulli aplicada a una línea de corriente que va por el eje del fondo del canal escalonado, siendo la sección inicial la (0) y la final la (6).

Elemento	Nº	x [cm]	h [cm]	h [m]	z [m]	V ² /2g [m]	Energía	
			carga					
Transición	1	-90.00	69.46	0.695	0	0.00016		0.695
	2	-45.00	69.03	0.690				
	3	0.00	66.36	0.664				
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	26.64	0.266				
Canal aprox. (1.0 m)	5	60.00	19.56	0.196				
	6	85.00	18.31	0.183	0.375	0.1025	E0	0.661
	7	110.00	16.53	0.165				

Grada 1	8	115.50	22.11	0.221				
	9	141.50	16.61	0.166				
	10	167.50	14.10	0.141	0.313	0.1730	E1	0.627
Grada 2	11	182.50	18.82	0.188				
	12	192.50	16.80	0.168				
	13	202.50	14.95	0.149				
	14	217.50	13.55	0.136	0.25	0.1873	E2	0.573
	15	232.50	12.64	0.126				
Grada 3	16	240.50	18.14	0.181				
	17	266.50	13.76	0.138				
	18	292.50	12.31	0.123	0.188	0.2271	E3	0.538
Grada 4	19	307.50	16.86	0.169				
	20	317.50	16.96	0.170				
	21	337.50	12.51	0.125	0.125	0.2198	E4	0.470
	22	357.50	11.34	0.113				
Grada 5	23	365.50	16.71	0.167				
	24	391.50	12.39	0.124				
	25	417.50	11.31	0.113	0.063	0.2688	E5	0.444
Tramo salida (1.0 m)	26	427.50	16.97	0.170				
	27	447.50	13.30	0.133				
	28	470.50	11.16	0.112	0	0.2762	E6	0.388
	29	500.50	11.54	0.115				

Tabla 2.8.5.b Disipación de Energía con la ecuación de Bernoulli. (Anexo 1.a)

- Sección en el Canal de Aproximación a la rápida (0):

$$E_o = z_o + h_o + \frac{V_o^2}{2g}$$

E_o = carga Energética en la sección (0)

$$\frac{V_o^2}{2g} = \text{Carga de velocidad en la sección (0)}$$

$$\frac{V_o^2}{2g} = \frac{1.419^2}{2 * 9.81} = 0.1025$$

h_o = carga de agua

$$h_o = 0.183$$

Z_o = Carga de posición en la sección (0)

$$z_o = 0.375$$

Reemplazando:

$$E_0 = 0.375 + 0.183 + 0.1025$$

$$E_0 = 0.661$$

► Sección (6), aguas abajo del pie de la rápida.

$$E_6 = z_6 + h_6 + \frac{V_6^2}{2g}$$

Donde:

h_6 = carga de agua en la sección (6)

$$h_6 = 0.112$$

$\frac{V_6^2}{2g}$ = Carga de velocidad en la sección (6)

$$\frac{V_6^2}{2g} = 0.2763 \text{ m}$$

Z_6 = Carga de posición en la sección (6)

$$Z_6 = 0 \rightarrow \text{tramo final}$$

Reemplazando:

$$E_6 = 0 + 0.112 + 0.276$$

$$E_6 = 0.388$$

Por lo tanto:

$$\Delta E = \left(\frac{E_0 - E_6}{E_0} \right) \cdot 100\%$$

$$\Delta E = \left(\frac{0.661 - 0.388}{0.661} \right) \cdot 100$$

$$\Delta E = 41.30\%$$

En la tabla 2.8.5.b se indican además los valores de la carga energética remanente en cada grada tomando las secciones hidráulicas en las abscisas x

indicadas, donde se observó que el flujo tiene líneas de corriente paralelas al fondo.

2.8.2.6 CÁLCULO ANALÍTICO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Aplicando la ecuación 2.2.5 se tiene:

$$Q_p = 7 \text{ [m}^3\text{/s]} \rightarrow Q_m = 0.0387 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$H_{dam} = 0.375 \text{ m}$$

$$\theta = 5.71^\circ$$

$$Y_c = 0.19 \text{ [m]}$$

$h_{pie} = 0.112 \text{ m}$ (Carga piezométrica considerando flujo uniforme en el pie de la rápida)

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Velocidad calculada: 2.33 m/s

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot Y_p \cdot \text{sen} \theta}{V^2} \quad (2.2.6)$$

Reemplazando:

$$f_{pie} \text{ (calculado)} = 0.161$$

Entonces:

$$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \text{Sen} \theta}\right)^{\frac{1}{3}} \text{Cos} \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \text{Sen} \theta}\right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{H_{dam}}{Y_c} + \frac{3}{2}} \quad (2.2.5)$$

$$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} \cdot 100 = \Delta E$$

Reemplazando los valores anteriores se tiene que el grado de disipación de energía es:

$$\Delta E \text{ (ecuación 4.2.5)} = 31.97\%$$

2.8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DATOS PROCESADOS.

2.8.3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA.

2.8.3.2. PERFIL DE FLUJO.

Una vez obtenidos los resultados para los caudales ensayados y que presentan régimen grada a grada se procede con su análisis y discusión. (Anexo 1.a)

El flujo grada a grada que se presenta en el modelo se forma desde el caudal inicial de $1\text{m}^3/\text{s}$ ($Y_c/h = 0.848\text{m}$) hasta un intermedio de $4\text{m}^3/\text{s}$ ($Y_c/h = 2.112\text{m}$), con láminas de flujo libre que cae en forma de cascada de un escalón a otro, esta caída forma cavidades con aire y vórtices recirculantes limitadas en la parte baja por chorros y un colchón de agua localizado sobre la huella del escalón en todo su ancho (Figura 2.8.4). A pesar de que la formación de vórtices recirculantes es una característica típica del flujo en rasante en esta investigación su aparición es debida en gran parte a que la relación de la altura de la grada es mucho menor que su longitud.



Para el caudal de $1\text{m}^3/\text{s}$ en el tramo de aproximación hasta el final de la grada 1 el flujo es continuo y con las cavidades llenas, es decir la unión de la huella y contrahuella en la parte inicial de grada no presenta vacíos, caso contrario a partir del final de la grada dos en donde se produce el primer vórtice recirculante debido a la relación $h/l = 0.1$, a la aceleración del flujo que se produce en este tramo, y por el cruce de las líneas de flujo a lo largo del modelo, lo que provoca además la formación de crestas en paredes y estas la formación de crestas centrales con alturas de hasta 34 cm.

Al aumentar el caudal, los vórtices recirculantes inician en la misma grada o se forman una grada más abajo, así por ejemplo para el caudal $2\text{m}^3/\text{s}$ y $3\text{m}^3/\text{s}$ los vórtices se forma al final de la grada 3.

La presencia de grandes salpicaduras, que en su mayoría sobrepasan la altura del escalón y se extienden hasta el final de la estructura, se evidencia desde el primer caudal, estas salpicaduras son resultado de un comportamiento caótico a partir de la ruptura del perfil de flujo en el cuarto escalón, la ruptura es generada por la formación de crestas en paredes y en el centro la grada. (Figura 2.8.5)



Fotografía 2.8.5

Fotografía 2.8.6

A partir del caudal $3\text{m}^3/\text{s}$ las cavidades de aire son mínimas y prácticamente desaparecen en su totalidad para los caudales mayores ($5\text{m}^3/\text{s}$ en adelante), pero es notable el crecimiento de las crestas laterales y centrales y el aumento de las salpicaduras disminuyendo estas para los últimos caudales más altos ($9\text{m}^3/\text{s}$ y $10\text{m}^3/\text{s}$) (Figura 2.8.6)

2.8.3.3. PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Una vez recopilados todos los datos de los ensayos y después del cálculo de las variables necesarias se llegó a determinar los siguientes resultados de porcentajes de disipación de energía (tabla 2.8.6.a), entre una sección en el canal de aproximación, y en una sección al pie de la rápida. Este análisis fue realizado para las cuatro relaciones de Y_c/h correspondiente a cada caudal ensayado. Para esta determinación, se utilizó las ecuaciones 2.2.3 y 2.2.4 (Anexo 1.b).

Qm	Qp	Qunitario	yc	Emín	λ	$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}}$	ΔE [%]	yc / h	Régimen De Flujo
[m ³ /s]	[m ³ /s]		[m]	[m]					
0,0057	1,04	0,038	0,053	0,079	0,52	0,73	72,70	0,85	Escalón a Escalón
0,0117	2,11	0,078	0,085	0,128	0,55	0,63	62,98	1,36	Escalón a Escalón
0,0167	3,03	0,111	0,108	0,162	0,57	0,57	57,10	1,73	Escalón a Escalón
0,0226	4,09	0,151	0,132	0,198	0,57	0,52	51,71	2,12	Escalón a Escalón

Tabla 2.8.6.a Porcentaje de disipación de energía para régimen Escalón a Escalón.

El proceso de cálculo está detallado en el ejemplo mostrado en el numeral 2.8.1.6 de este capítulo y los cálculos para los demás caudales se ubican en el anexo 1.b.

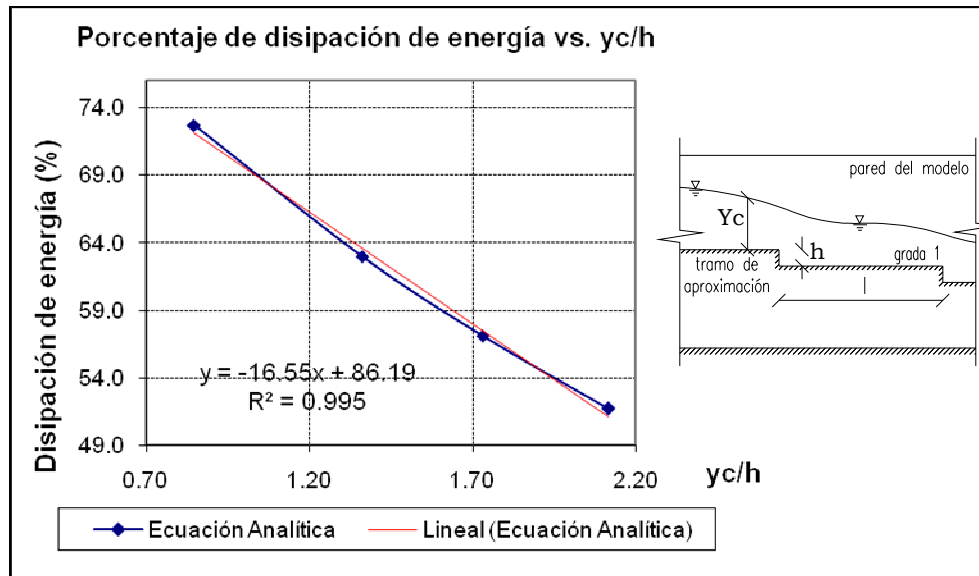


Figura 2.8.7. Variación del porcentaje de disipación de energía en función de la relación Y_c/h para el rango de caudales mostrado en la tabla 2.8.6.a, Línea de Tendencia Ecuación Analítica. (Anexo 1.b)

Por otro lado, aplicando la ecuación de Bernoulli, en la sección aguas arriba ($x=85$ cm) y aguas abajo al pie de la rápida ($x=470.5$ m), y para las mismas relaciones de Y_c/h , se obtienen los resultados indicados en la tabla 2.8.7 a

Y_c/h	0.847	1.362	1.731	2.117
E0	0.473	0.526	0.564	0.601
E6	0.102	0.176	0.204	0.288
ΔE (%)	78.44	66.54	63.83	52.08

Tabla 2.8.7.a Porcentaje de disipación de energía para régimen Escalón a Escalón.

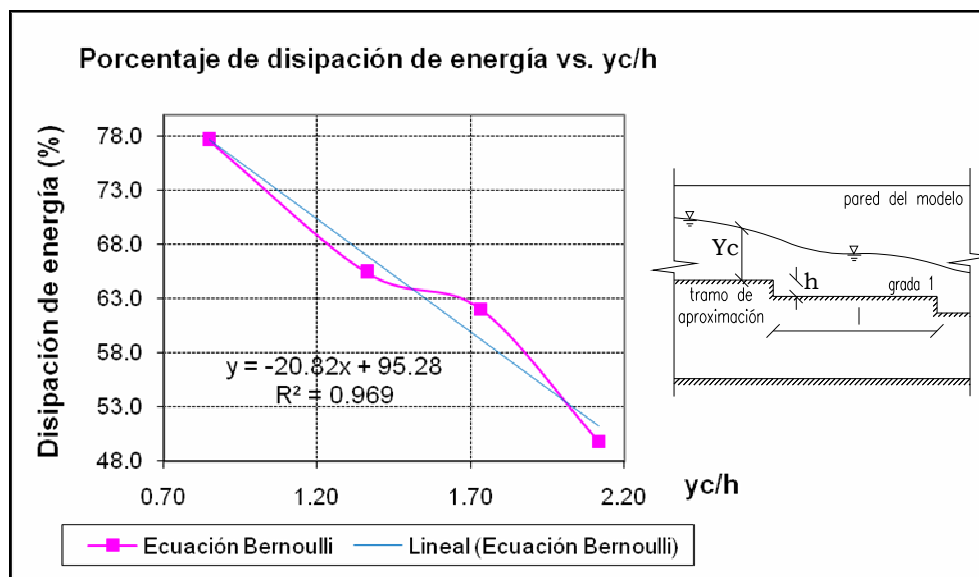


Figura 2.8.8. Variación del porcentaje de disipación de energía en función de la relación Y_c/h para el rango de caudales mostrado en la tabla 2.8.7.a. Línea de Tendencia Ecuación de Bernoulli. (Anexo 1.b)

Y_c/h	0,85	1,36	1,73	2,12
ΔE Bernoulli (%)	78.44	66.54	63.83	52.08
ΔE ecuacion 2.11 (%)	72.70	62.98	57.10	51.71

Tabla 2.8.8.a. Comparación de la Variación del porcentaje de disipación de energía en función de la relación Y_c/h para la Ecuación de Bernoulli y la Ecuación 2.11.

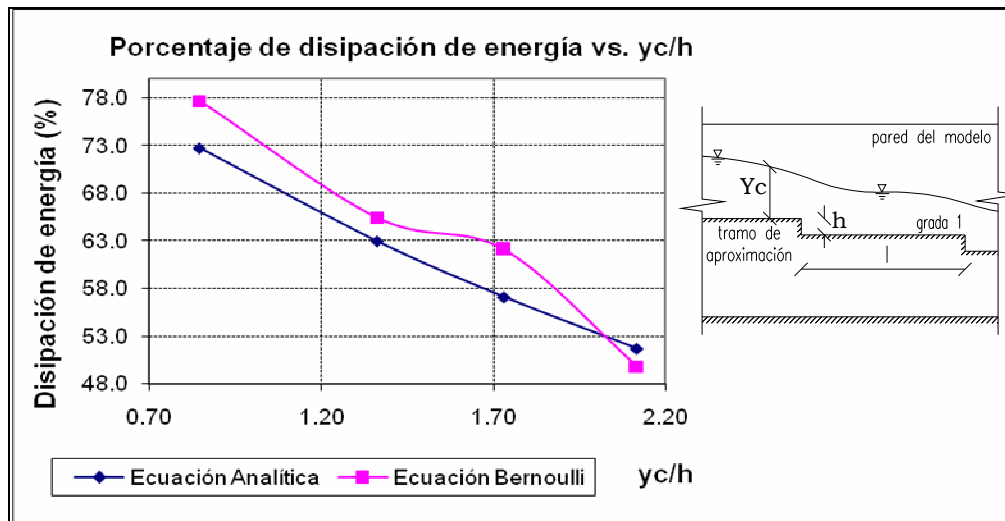


Figura 2.8.9. Comparación de la variación del porcentaje de disipación de energía en función de la relación Y_c/h para el rango de caudales mostrado en la tabla 2.8.8.a.

2.8.3.4. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.

$X2/l$ (m)	$X4/l$ (m)	Q_p [m ³ /s]	Y_c/h	CARGAS PIEZOMETRICA (m)															
				P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	
0.1																			
0.2	0.2	1.035	0.85	0.006	0.028	0.056	0.046	0.036	0.034	0.032	0	0.019	0.04	0.055	0.026	0.024	0.028	0.032	
0.3	0.3	2.113	1.36	0.025	0.046	0.065	0.1275	0.07	0.056	0.043	0.007	0.026	0.036	0.131	0.04	0.046	0.023	0.051	
0.45	0.45	3.026	1.73	0.017	0.038	0.057	0.12	0.039	0.041	0.035	0.007	0.021	0.03	0.129	0.028	0.034	0.022	0.037	
0.6	0.6	4.093	2.12	0.046	0.066	0.089	0.146	0.14	0.096	0.065	0.027	0.046	0.059	0.14	0.093	0.047	0.056	0.077	

$X2/l$ (m)	$X4/l$ (m)	Q_p [m ³ /s]	Y_c/h	CARGAS PIEZOMETRICA (m)															
				P1/h	P2/h	P3/h	P4/h	P5/h	P6/h	P7/h	P8/h	P9/h	P10/h	P11/h	P12/h	P13/h	P14/h	P15/h	
0.16																			
0.32	0.32	1.035	0.85	0.096	0.448	0.896	0.736	0.576	0.544	0.512	0	0.304	0.64	0.88	0.416	0.384	0.448	0.512	
0.48	0.48	2.113	1.36	0.4	0.736	1.04	2.04	1.12	0.896	0.688	0.112	0.416	0.576	2.096	0.64	0.736	0.368	0.816	
0.72	0.72	3.026	1.73	0.272	0.608	0.912	1.92	0.624	0.656	0.56	0.112	0.336	0.48	2.064	0.448	0.544	0.352	0.592	
0.96	0.96	4.093	2.12	0.736	1.056	1.424	2.336	2.24	1.536	1.04	0.432	0.736	0.944	2.24	1.488	0.752	0.896	1.232	

Tabla 2.8.9.a. Cargas de presión media para caudales en flujo Grada a Grada, para $h/l = 0.1$

Los piezómetros fueron ubicados en la huella y contrahuella del segundo y cuarto escalón según la distribución mostrada en la figura 2.6.5, a más de los piezómetros colocados al final de la rápida. (Anexo 1.c.1)

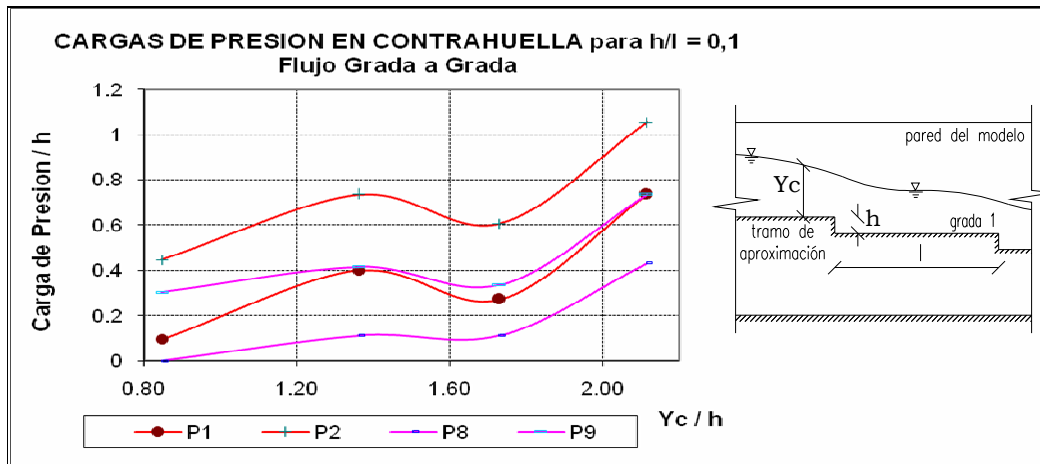


Figura 2.8.10

Teniendo como referencia la ubicación de los piezómetros, se observa la similitud de la variación de las cargas piezométricas para los piezómetros uno y dos, siendo la carga de presión en P2, el doble y hasta el triple que la carga en P1, debido esto a que en la ubicación de P1, las cavidades con aire son más influyentes (carga de flujo mínima) y en la ubicación de P2 influye la formación discontinua de vórtices recirculantes, aumentando así la carga.

Para los valores de $Y_c/h = 1.73$ se produce una discontinuidad en el perfil de flujo lo que provoca la formación de crestas centrales más altas pero muy irregulares, por lo tanto crestas laterales bajas (flujo mas pegado al fondo) de aquí se justifica la disminución de la carga.

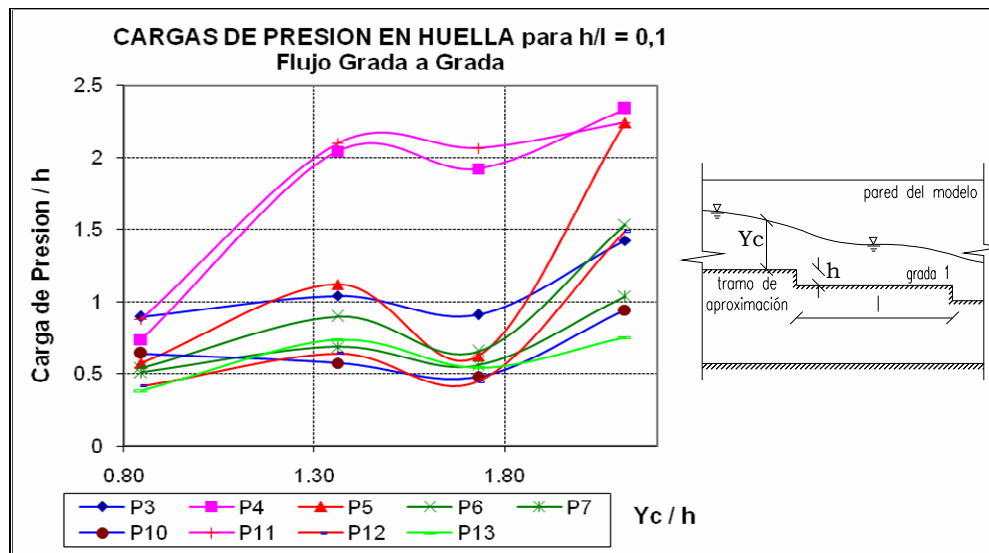


Figura 2.8.11 Variación de la carga de presión en la huella dos y cuatro en función de Y_c/h .

En la figura 2.8.11 se trata de establecer la relación existente entre las diferentes curvas obtenidas para los piezómetros ubicados a una misma distancia sobre el eje x.

Así para P3 y P10 se tienen valores bajos de carga ya que están ubicados antes del impacto directo de la lámina de agua, en esta zona el flujo más bien tiende a estabilizarse con el aumento del caudal formando cavidades llenas.

La carga piezométrica para P4 y P11 tiene la misma tendencia debido a que están ubicados a la misma distancia (20cm. de la arista), por lo que ambos piezómetros presentan un perfil de flujo similar. Además se observa que tienen los valores más altos por recibir directamente al chorro que cae de la grada anterior.

Las curvas para P5 y P12 disminuyen en comparación con P4 y P11 debido a su ubicación ya que en este tramo de la huella el flujo tiende a estabilizarse después de la caída del chorro de agua, para los últimos caudales la carga se incrementa ya que la caída del flujo de agua está más cerca de estos puntos.

De igual manera P6, P7 y P13 tienen una tendencia similar, no tan marcada como en las curvas anteriores pero si semejantes, en este caso no están ubicadas a una misma distancia desde la arista de la grada pero si en el último tramo por lo que las condiciones de flujo coinciden.

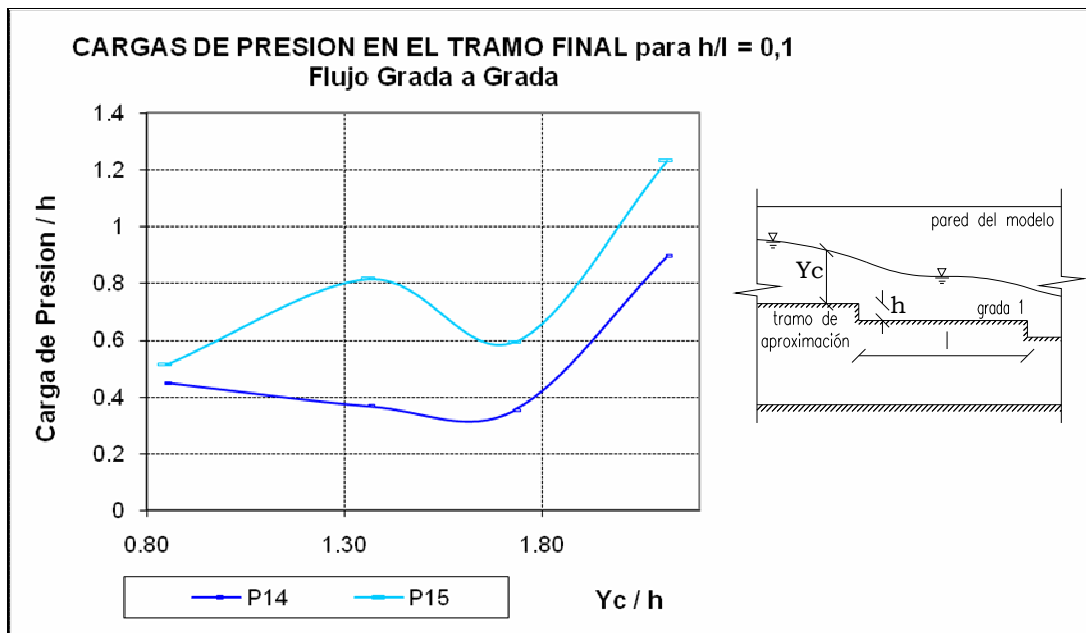


Figura 2.8.12

En la figura 2.8.12, se evidencia una vez más que la influencia del choque del chorro que cae cerca de los piezómetros eleva los valores de carga de presión, así para P15 en el punto $Y_c/h = 1.36$, la carga es mayor por recibir directamente la descarga de la grada anterior, pero para P14 es menor debido a que en esta zona el flujo más bien es estable y disminuye. Para los últimos caudales la carga aumenta de manera similar por existir mayor flujo de agua.

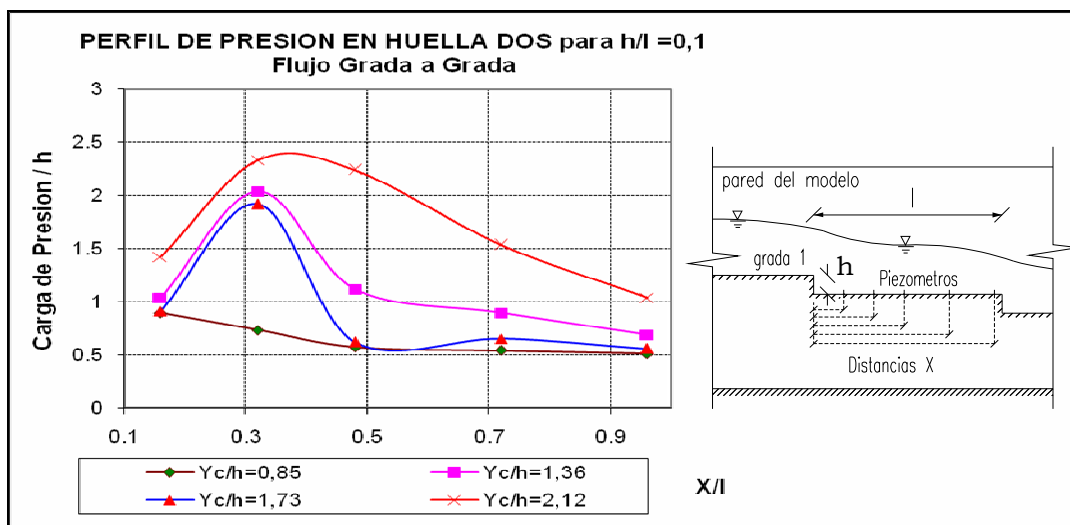
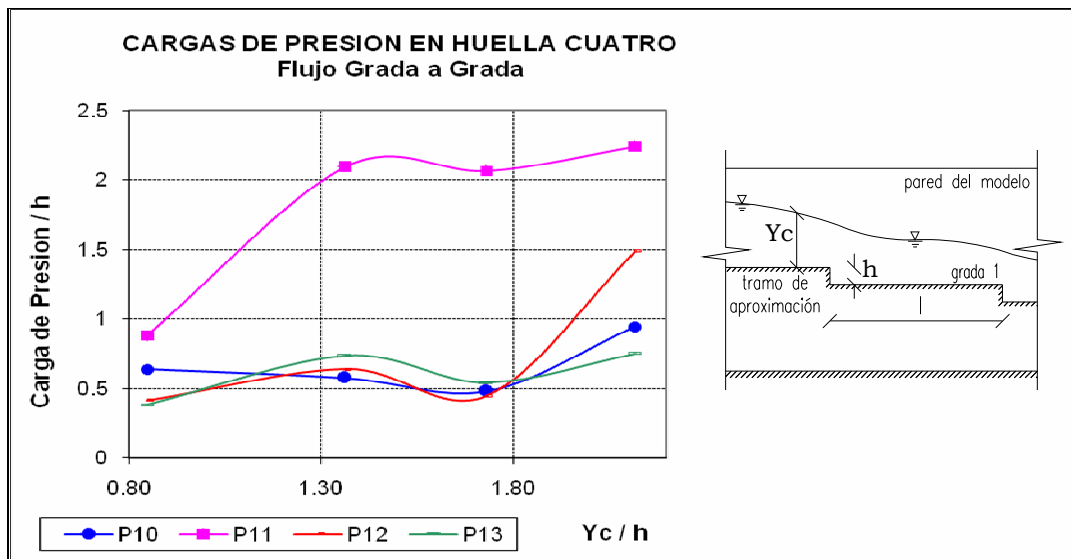


Figura 2.8.13



La similitud de las figuras 2.8.13 y 2.8.14, está dada por la ubicación casi simétrica de los piezómetros en las huellas. Los perfiles de presión, para $Y_c/h = 1.36, 1.73, 2.12$ son notoriamente mayores que el perfil de presión para $Y_c/h = 0.85$ esta variación tiene mucha influencia de la configuración geométrica de la estructura ya que al ser la base muy angosta ($b = 0.15\text{m}$) permite la formación de crestas centrales y laterales que hacen que la carga de agua aumente o disminuya, para el primer caudal el régimen de flujo grada a grada es más notorio y en las huellas el perfil de flujo es uniforme y horizontal a medida que el caudal aumenta esta condición va desapareciendo.

2.8.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE

2.8.4.1 PERFIL DE FLUJO.

Posterior a las observaciones realizadas en el laboratorio y la obtención de los perfiles de flujo de cada caudal con las mediciones proporcionadas con el limnómetro, se puede anotar que a partir del caudal $Q_p = 5 \text{ [m}^3/\text{s]}$ ($Y_c/h = 2.398$) se presenta un perfil de flujo prácticamente en régimen rasante, el mismo que continua hasta el $Q_p = 10 \text{ [m}^3/\text{s]}$ ($Y_c/h = 3.865$). (Anexo 1.a)

Con la presencia de flujo rasante se observó que las cavidades con aire localizadas al pie del escalón (en su contrahuella), habían desaparecido, que

sumado a los incrementos de caudal realizados hasta llegar al caudal prototipo máximo ($Q_p = 10 \text{ m}^3/\text{s}$), dieron lugar a perfiles de flujo más uniformes. (Figura 2.8.15).



Fotografía 2.8.15

En el caudal de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ se observa claramente que el flujo presenta crestas relativamente grandes a partir del final de la grada 3, tanto en las paredes del canal como en el centro, las mismas que van desapareciendo según va aumentándose el caudal en el modelo, hasta ser escasamente observadas en el caudal máximo $Q_p=10 \text{ m}^3/\text{s}$, esto debido a que la velocidad disminuye con el aumento de caudal, lo cual puede ser verificado con las mediciones realizadas en el laboratorio y que están detalladas en los anexos, provocando que los choques de las láminas de agua contra las paredes del canal, las que provocan el surgimiento de las crestas, también disminuyan.

Una de las características observadas a partir del caudal de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, es la presencia de salpicaduras que en su mayoría sobrepasan la altura del escalón, al final del tercer escalón, para el caudal $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ($y_c/h = 2.733$) al final del cuarto escalón, para $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ($y_c/h = 3.043$) en el quinto escalón, para $8 \text{ m}^3/\text{s}$ ($y_c/h = 3.323$) a partir del último cuarto del tramo de salida y desapareciendo para los caudales 9 y $10 \text{ m}^3/\text{s}$, esto como resultado de la uniformidad alcanzada a través del aumento de caudales y el desvanecimiento de las crestas. (Figura 2.8.16).



Fotografía 2.8.16



Fotografía 2.8.17

Se debe puntualizar que aunque no se observó un total sumergimiento de todos los escalones, lo que provocaría la existencia del fondo falso, así como los vórtices de recirculación y la lámina principal del flujo, las observaciones realizadas en el laboratorio, sobre el modelo, indicaban que lo más adecuado para poder obtener el coeficiente de fricción y el coeficiente de Manning, era aplicar el concepto de régimen rasante a partir del caudal $Q_p = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($yc/h = 2.398$), ya que desde este se observó características de un flujo rasante pero gradualmente variado. (Figura 2.8.17).

La influencia de la contracción en el canal, originada por la transición en curva dispuesta aguas arriba del canal de aproximación a la rápida, se resume en que para un flujo subcrítico aguas arriba (es decir $Fr < 1$), fenómeno que se presenta en la estructura que se está analizando, la profundidad de flujo disminuye si el ancho del canal disminuye. Como resultado, el número de Froude se incrementa y cuando $Fr = 1$ ocurren condiciones de flujo crítico para con un ancho mínimo del canal, que en este caso es $b = 0,15 \text{ m}$. Para condiciones aguas arriba de flujo supercrítico la profundidad aumenta y el Froude disminuye hasta alcanzar las condiciones de flujo crítico. Por la tanto, con los dos tipos de flujo una constricción lo suficientemente severa puede inducir condiciones de flujo crítico en la garganta y el flujo aguas abajo de esta contracción tenderá a ser supercrítico ($Fr > 1$) si no existe un control aguas

abajo (**REF.3**), que es lo que sucede en la estructura analizada, y que fue comprobado en los cálculos realizados en la Tabla 2.9.2.

En el flujo supercrítico, una perturbación de flujo como la contracción que se presenta en la estructura investigada, induce el desarrollo de ondas de choque que se propagan en la superficie libre a través del canal, las mismas que con sus impactos originan la presencia de crestas de diferente altura e influencia según la velocidad del flujo. Además el ancho característico b del canal es bastante pequeño con respecto a la longitud del mismo, provocando que los choques de onda sean más violentos y que se produzcan en un intervalo de tiempo menor, lo que aumenta la disipación de energía y torna al perfil de flujo mucho más variable.

Para el caudal prototipo máximo, $Q_p = 10 \text{ m}^3/\text{s}$, el perfil es bastante uniforme ya que las crestas han desaparecido casi en su totalidad, presentándose muy pocas y de muy poca dimensión al final del escalón 5. Entonces el perfil más variable, para flujo rasante, será para $Q_p = 5 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.8.4.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Las mediciones realizadas en el modelo permiten encontrar los valores de las variables que componen el análisis del grado de disipación de energía. Estas condujeron a los siguientes resultados aplicando la ecuación de Bernoulli y la ecuaciones analíticas 2.2.5 y 2.2.6, entre la sección 85 cm en el canal de aproximación a la rápida y a 470.5 cm al pie de la misma. Figura 2.6.1 y 2.6.2 (Anexo 1.b):

Qp	Qm	Qm	yc / h	ΔE [%]		Régimen de Flujo
				Ecuación	Ecuación	
				Bernoulli	Analítica	
[m ³ /s]	[lt/s]	[m ³ /s]			V. calculada	
4,93	27,26	0,0273	2,398	46.50	46,40	Rasante
6,00	33,17	0,0332	2,733	42.88	42,88	Rasante
7,05	38,97	0,0390	3,043	41.30	41,43	Rasante
8,05	44,47	0,0445	3,323	38.86	38,99	Rasante
9,04	49,93	0,0499	3,590	37.78	37,95	Rasante
10,10	55,77	0,0558	3,865	37.40	37,38	Rasante

Tabla 2.8.6.b. Porcentaje de disipación de energía para cada caudal. Ecuación de Bernoulli y ecuación analítica utilizando velocidades calculadas con el calado para $h/l = 0.1$.

El siguiente gráfico presenta la variación del porcentaje de disipación de energía producido en esta rápida con fondo escalonado ensayada en el rango de caudales expuesto en la tabla 2.8.6.b, para flujo rasante.

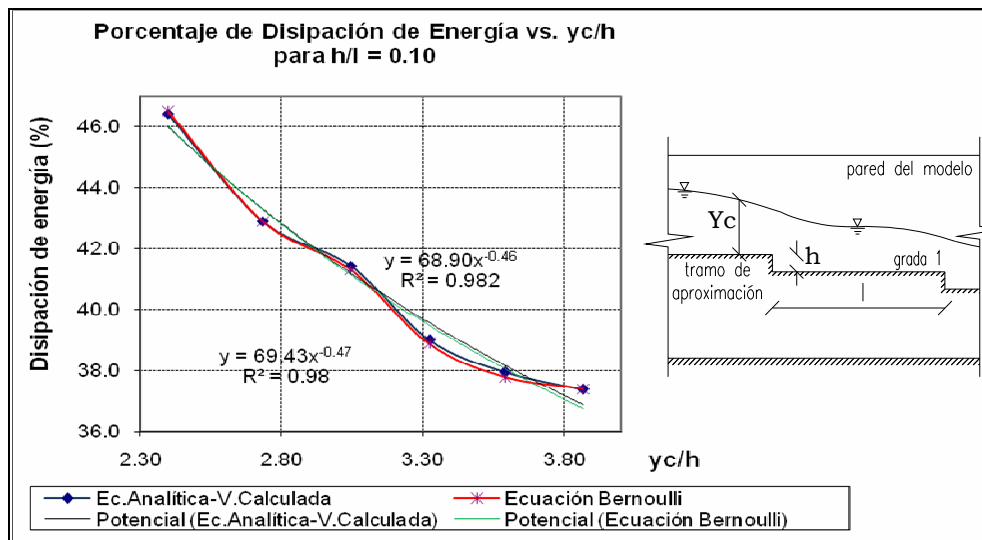


Figura 2.8.18 Porcentaje de disipación de energía. Línea de Tendencia Potencial Ecuación Analítica. Línea de Tendencia Potencial Ecuación de Bernoulli. (Anexo 1.b)

Se observa que la tendencia de variabilidad de la disipación de energía, es semejante para los dos cálculos realizados, con una diferencia de aproximadamente el 2.5% constante entre las dos ecuaciones aplicadas para todo el rango de caudales, (Figura 2.8.18).

2.8.4.3. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.

Qp [m ³ /s]	yc / h	CARGA DE PRESIÓN (h) [m]														
		Cara vertical		Cara Horizontal					Cara vertical		Cara Horizontal				pie	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
4.93	2.398	0.06	0.082	0.102	0.158	0.168	0.118	0.077	0.035	0.056	0.07	0.132	0.113	0.059	0.071	0.086
6	2.733	0.073	0.094	0.112	0.162	0.193	0.14	0.09	0.045	0.068	0.08	0.135	0.138	0.07	0.091	0.092
7.05	3.043	0.088	0.108	0.128	0.18	0.218	0.166	0.108	0.048	0.078	0.092	0.145	0.165	0.085	0.118	0.112
8.05	3.323	0.099	0.12	0.14	0.189	0.232	0.176	0.116	0.049	0.084	0.099	0.147	0.182	0.094	0.133	0.123
9.04	3.590	0.101	0.128	0.148	0.199	0.251	0.196	0.131	0.053	0.092	0.101	0.16	0.2	0.101	0.158	0.136
10.1	3.865	0.12	0.141	0.16	0.21	0.265	0.211	0.143	0.059	0.1	0.118	0.164	0.218	0.118	0.176	0.146

yc / h	Cara vertical		Cara Horizontal					Cara vertical		Cara Horizontal				pie	
	P1 / h	P2 / h	P3 / h	P4 / h	P5 / h	P6 / h	P7 / h	P8 / h	P9 / h	P10 / h	P11 / h	P12 / h	P13 / h	P14 / h	P15 / h
2.398	0.96	1.312	1.632	2.528	2.688	1.888	1.232	0.56	0.896	1.12	2.112	1.808	0.944	1.136	1.376
2.733	1.168	1.504	1.792	2.592	3.088	2.24	1.44	0.72	1.088	1.28	2.16	2.208	1.12	1.456	1.472
3.043	1.408	1.728	2.048	2.88	3.488	2.656	1.728	0.768	1.248	1.472	2.32	2.64	1.36	1.888	1.792
3.323	1.584	1.92	2.24	3.024	3.712	2.816	1.856	0.784	1.344	1.584	2.352	2.912	1.504	2.128	1.968
3.590	1.616	2.048	2.368	3.184	4.016	3.136	2.096	0.848	1.472	1.616	2.56	3.2	1.616	2.528	2.176
3.865	1.92	2.256	2.56	3.36	4.24	3.376	2.288	0.944	1.6	1.888	2.624	3.488	1.888	2.816	2.336

Tabla 2.8.7.b Cargas de presión para $h/l = 0.10$

En esta estructura se colocaron piezómetros en la huella del segundo y cuarto escalón y en la contrahuella del primer y tercer escalón, como se indica en la figura 2.6.5, además se instalaron dos tomas piezométricas al pie de la rápida, al final del tramo de salida. (Anexo 1.c2)

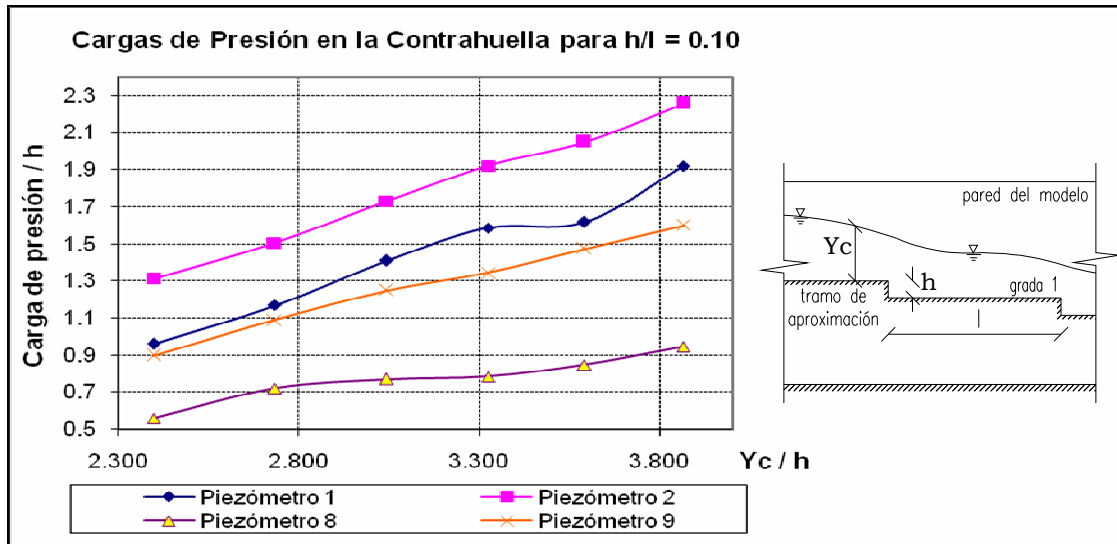


Figura 2.8.19

Teniendo en cuenta que los piezómetros 1 y 2 se localizan en la cara vertical de la grada dos, de la figura 2.8.19 podemos deducir que en el flujo rasante se presentan presiones positivas, siendo los piezómetros 1 y 2 los que presentan los valores más altos y los piezómetros 8 y 9 ubicados en la grada cuatro los valores más bajos, es correcto que la carga del piezómetro 2 sea mayor que la del piezómetro 1 y la carga del piezómetro 9 sea mayor que la del piezómetro 8, ya que 2 y 9 se ubican en la parte inferior de la cara vertical y , 1 y 8 en la parte superior.

Al analizar esta variación de presiones a lo largo del rango de caudales, se ve claramente que los valores de carga son directamente proporcionales al incremento de caudal.

Se nota también que las curvas formadas por los valores de carga de presión en la cara horizontal varían con una pendiente poco pronunciada (Figura 2.8.20), lo que ratifica la uniformidad que va adquiriendo el perfil en el régimen rasante, originada por el aumento de caudal, induciendo un crecimiento proporcional de las cargas.

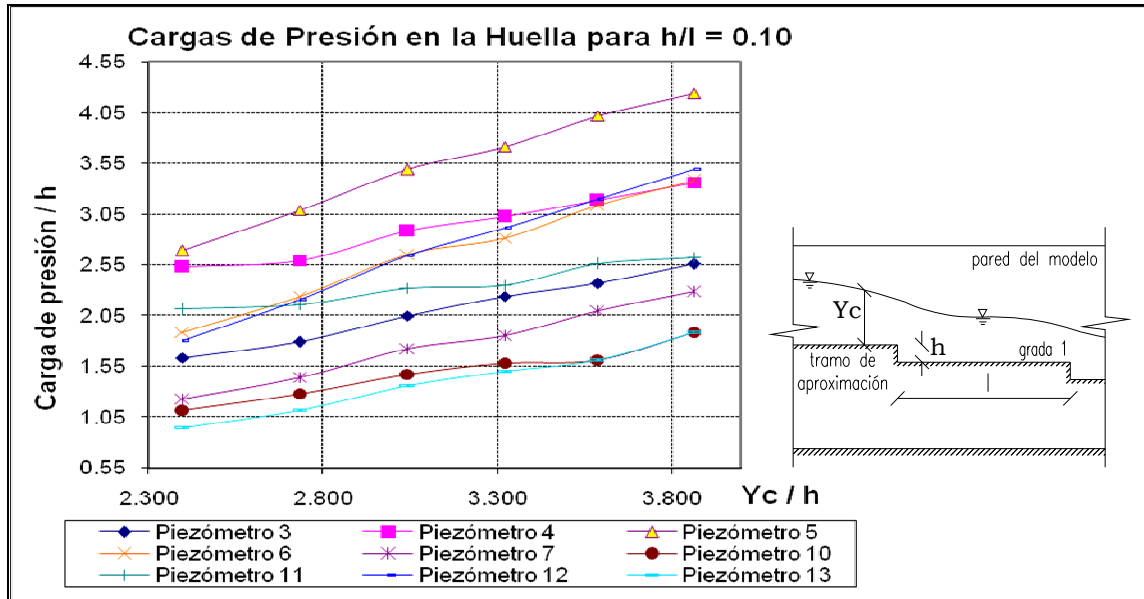


Figura 2.8.20

Las cargas piezométricas en el flujo rasante sufren un incremento de su valor, pero con una clara disminución en la pendiente de la curva formada por dichos valores; esto con respecto al flujo grada a grada.

Las presiones sufren un incremento en sus valores en los piezómetros ubicados en la primera mitad de la longitud de su huella correspondiente, causado por el gran chorro que produce la caída en cascada de escalón a escalón, hasta que el nivel de agua se estabiliza disminuyendo su calado, con la lógica disminución del valor de las cargas de los piezómetros en la segunda mitad de la huella de cada escalón.

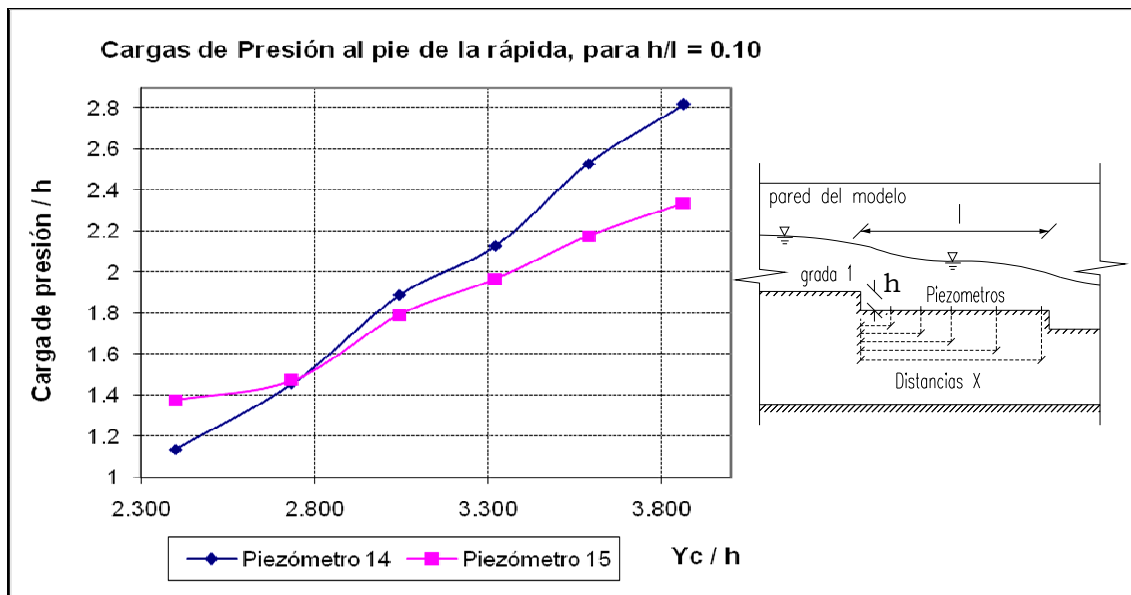


Figura 2.8.21

Se observa que la variación de la carga de presión al final de la rápida es prácticamente lineal, (Figura 2.8.21) solo influida proporcionalmente por el incremento de caudal, lo que indica que el perfil no tiene mayores perturbaciones por crestas y que únicamente aumenta el calado de agua.

El perfil de presiones en la cara horizontal para régimen rasante se puede visualizar en el siguiente gráfico:

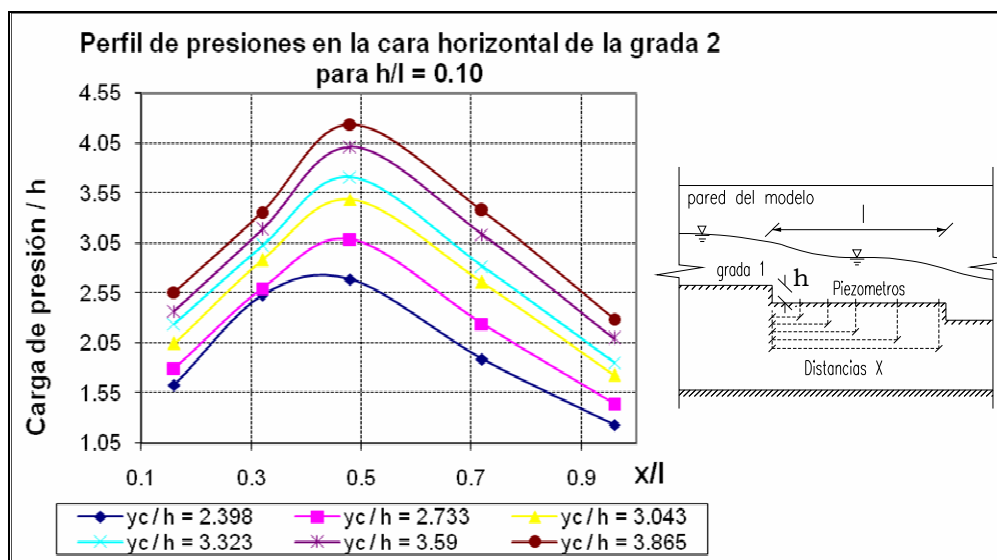


Figura 2.8.22

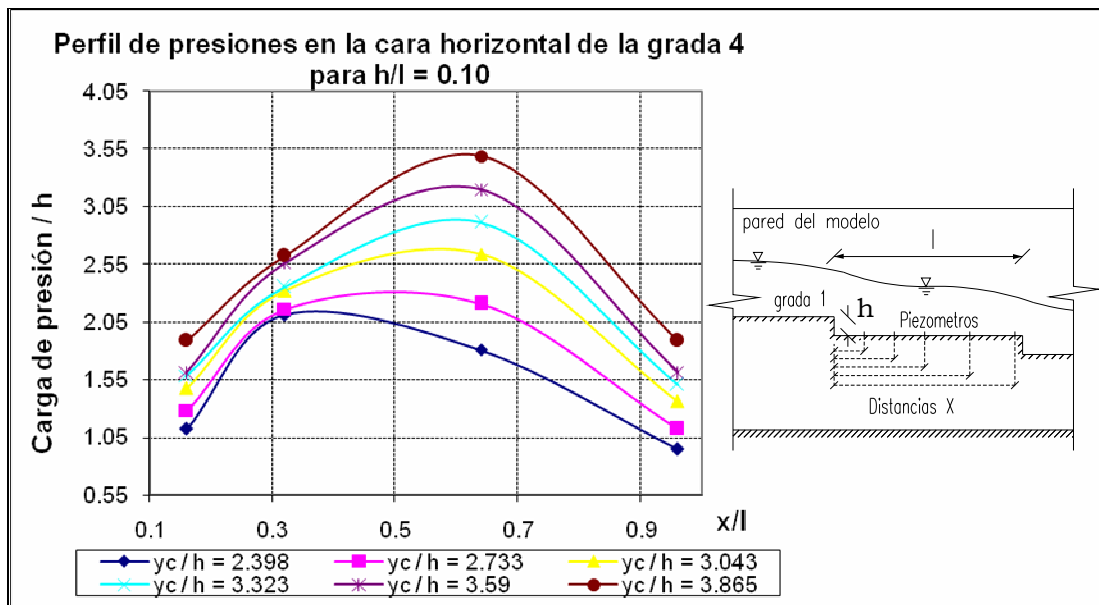


Figura 2.8.23

2.9 OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH Y DE RUGOSIDAD DE MANNING.

2.9.1 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

Para flujo rasante podemos calcular el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach (f) y para este estudio se realizará en los puntos donde el flujo es prácticamente uniforme en cada grada y para un Δx igual a 250 [cm] en el cual el perfil de flujo tiene prácticamente el mismo ángulo de inclinación que la rápida escalonada, lo que permite obtener datos y resultados más cercanos a la realidad de una rápida con fondo escalonado de gran longitud en la que los valores del calado en el tramo de aproximación a la rápida y el tramo de salida son prácticamente los mismos que para los escalones de la rápida, lo que no sucede en nuestro modelo ya que los calados en los tramos de aproximación y salida son bastante diferentes a los calados medidos en los escalones debido a la influencia de los cambios bruscos de pendientes por la longitud relativamente corta de la estructura en estudio. Los cálculos se realizarán a partir del punto $x = 167.50$ [cm] ubicado en la grada 1 hasta el punto $x = 417.5$ [cm] de la grada 5

y para lo cual el valor de y_p de la fórmula (2.5.5) es el calado. Los cálculos para los demás caudales se encuentran en el Anexo 1.d.

Como ya se indicó en la teoría de Similitud, la simulación apropiada del efecto viscoso en la construcción y manejo del modelo bajo el criterio de similitud de Froude, exige que el flujo en el mismo, en todos los casos, sea turbulento totalmente desarrollado además de que el factor adimensional de fricción "f" en la relación de Darcy-Weisbach sea igual en prototipo y en modelo. Entonces se realizará una demostración en la que comprobamos que el f modelo es igual al f prototipo, por lo que no es necesario convertir los datos obtenidos en el modelo experimental a valores prototipo:

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot Y_p \cdot \text{Sen} \theta}{v^2}$$

$$V_p = F^{0.5} \cdot V_m$$

$$Y_{p_p} = Y_{p_m} \cdot F$$

$$f_m = \frac{8 \cdot g \cdot Y_{p_m} \cdot \text{Sen} \theta}{v_m^2}$$

$$f_p = \frac{8 \cdot g \cdot Y_{p_p} \cdot \text{Sen} \theta}{v_p^2}$$

$$f_p = \frac{8 \cdot g \cdot Y_{p_m} \cdot F \cdot \text{sen} \theta}{(F^{0.5} \cdot V_m)^2}$$

$$f_p = \frac{8 \cdot g \cdot Y_{p_m} \cdot \text{Sen} \theta}{v_m^2}$$

Donde: Y_p : Altura de agua

Por lo tanto:

$$f_p = f_m$$

Los valores obtenidos son los siguientes:

Qm [m3/s]	0.039
Qp [m3/s]	7.05
θ (rad)	0.0997

	X	calado yp	V. Calculada	f calculado
	[cm]	[m]	[m/s]	
Grada 1	167.50	0.141	1.84	0.32
Grada 2	217.50	0.136	1.92	0.29
Grada 3	292.50	0.123	2.11	0.22
Grada 4	337.50	0.125	2.08	0.23
Grada 5	417.50	0.113	2.30	0.17

Tabla 2.9.1 Coeficientes de fricción.

2.9.2 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE MANNING.

El proceso de cálculo, se realizará para el caudal prototipo de 8 [m3/s], el cual se aplicará de manera similar para los caudales en régimen rasante, cuyos resultados se encuentran detallados en el Anexo 1.e.

Para este modelo se aplica los conceptos de Flujo Gradualmente Variado, que por las mediciones realizadas en el modelo, es el que realmente está presente en la estructura, debido a la variación de la altura de agua y la velocidad a lo largo de la estructura.

Por otro lado, al ser considerado el perfil de flujo rasante - desarrollado en el canal con fondo escalonado- como gradualmente variado, y en régimen supercrítico con número de Froude > 1 como se indica en la tabla 2.9.2, se procede a calcular desde la sección de control – determinada por el calado crítico Y_c al borde del canal de aproximación a la primera grada - hacia aguas abajo hasta el extremo del último escalón, ubicándose estas dos abscisas en las zonas más uniformes del perfil de flujo.

	Calado [m]	V. Calculada [m/s]	Numero de Froude (Fr)
x = 85 cm.	0.198	1.498	1.07
Grada 1	0.152	1.95	1.60
Grada 2	0.147	2.02	1.68
Grada 3	0.133	2.23	1.95
Grada 4	0.138	2.15	1.85
Grada 5 - x=417.5 cm	0.123	2.42	2.20

Tabla 2.9.2. Número de Froude para $Q_p = 8$ [m³/s]

El procedimiento aplicado para el cálculo es el “Método Estándar de Pasos”:

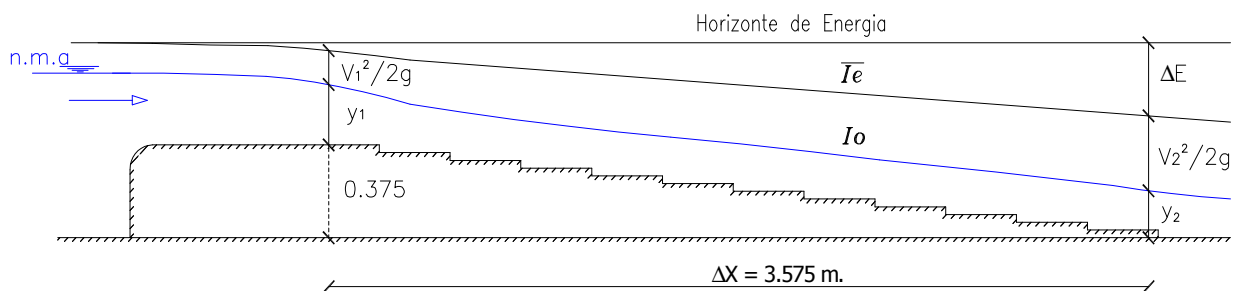


Figura 2.9.1

A partir de la fórmula:
$$I_0 \cdot \Delta x + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta E \quad (2.9.1)$$

Donde:
$$\Delta E = \bar{I}_e \cdot \Delta x \quad (2.9.2)$$

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (2.9.3)$$

Entonces:

$$I_0 \cdot \Delta x + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \bar{I}_e \cdot \Delta x$$

$$y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \bar{I}_e \cdot \Delta x - I_0 \cdot \Delta x$$

$$\Delta x = \frac{\left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)}{\bar{I}_e - I_0} \quad (2.9.4)$$

Donde: $I_0 = 0.1$ (pendiente de la rápida escalonada)

$$\bar{I}_e = \frac{I_{e1} + I_{e2}}{2} \quad (\text{Pendiente de la línea de energía}) \quad (2.9.5)$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot I_e^{\frac{1}{2}} \quad I_{e1} = \frac{v_1^2 \cdot n^2}{(Rh_1)^{\frac{4}{3}}} \quad (2.9.6)$$

$$I_{e2} = \frac{v_2^2 \cdot n^2}{(Rh_2)^{\frac{4}{3}}} \quad (2.9.7)$$

n: Coeficiente de Manning

Calculando cada uno de los términos que componen la ecuación (2.9.4), y reemplazándolos en la misma, se obtiene una expresión en función de un coeficiente “n” de Manning ponderado para todo el canal escalonado con los datos del modelo.

Además:

$$n_{prototipo} = n_{modelo} \cdot F^{\frac{1}{6}}$$

$$R_{prototipo} = R_{modelo} \cdot F$$

Donde, F: factor de escala = 8

Qm [m3/s]	0.0445
Qp [m3/s]	8.06
θ (rad)	0.0997

Elemento	Nº	x [cm]	Δx	Yp [m]	V [m/s]	Rh1	Rh2	le1 x n2	le2 x n2	le x n2	n modelo	n prototipo
Canal aprox.	1	85	3.855	0.198	1.498	0.05439	0.0465	108.88	349.04	228.96	0.01713	0.0242
Grada 5	2	417.5		0.123	2.419							

Tabla 2.9.3. Coeficientes de Manning Total

El valor de “le” queda en función de “n”, el mismo que al reemplazar en la ecuación (2.9.4), además de los otros valores que componen la ecuación, permiten obtener el valor de “n”.

El procesamiento de datos para calcular “n” para todos los caudales ensayados se encuentra desarrollado en el Anexo 1.e.

2.9.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN Y DE MANNING.

2.9.3.1 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Los cálculos correspondientes para los caudales con flujo rasante se encuentran detallados en el Anexo 1.d.

Dada la tendencia de los valores calculados del coeficiente de fricción f según la ecuación 2.2.6 en el anexo indicado, se tomaron los valores de f para cada y_c/h a los correspondientes en el tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 2.9.4. y en la figura 2.9.2.

TENDENCIA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN LA GRADA FINAL AGUAS ABAJO		
Qp [m3/s]	yc / h	f - Vcalculada
4.93	2.398	0.150
6	2.733	0.160
7.05	3.043	0.170
8.05	3.323	0.160
9.04	3.590	0.170
10.1	3.865	0.180

Tabla 2.9.4. Coeficientes de fricción promedio para $h/l = 0.10$

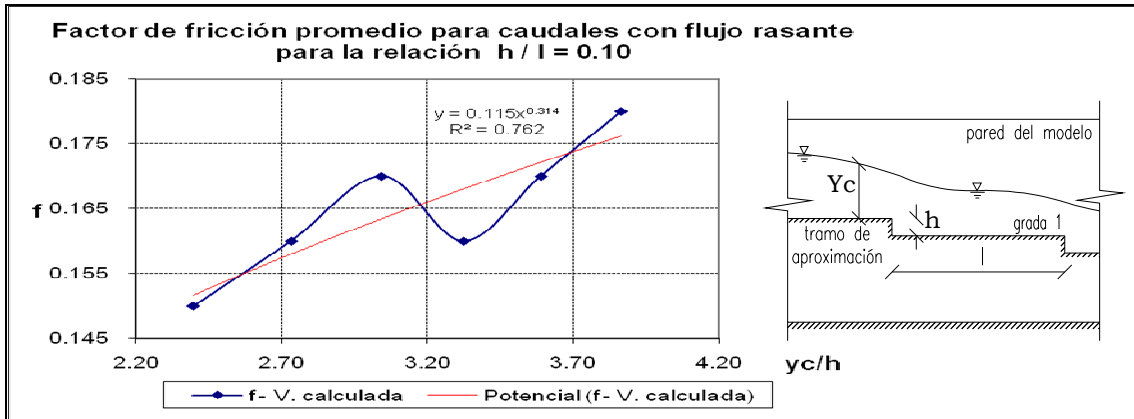


Figura 2.9.2 Factor de Fricción promedio para flujo rasante. Línea de Tendencia Potencial Factor de Fricción. (Anexo 1.d)

2.9.3.2 COEFICIENTE DE MANNING.

(Anexo 1.e)

COEFICIENTE DE MANNING PROMEDIO		
Qp [m3/s]	R promedio (m)	n calculado
	prototipo	prototipo
4.93	0.3584	0.0268
6.01	0.3772	0.0265
7.06	0.3931	0.0257
8.06	0.4039	0.0242
9.03	0.4145	0.0236
10.10	0.4258	0.0243

Tabla 2.9.5 Coeficiente de Manning para $h/l = 0.10$

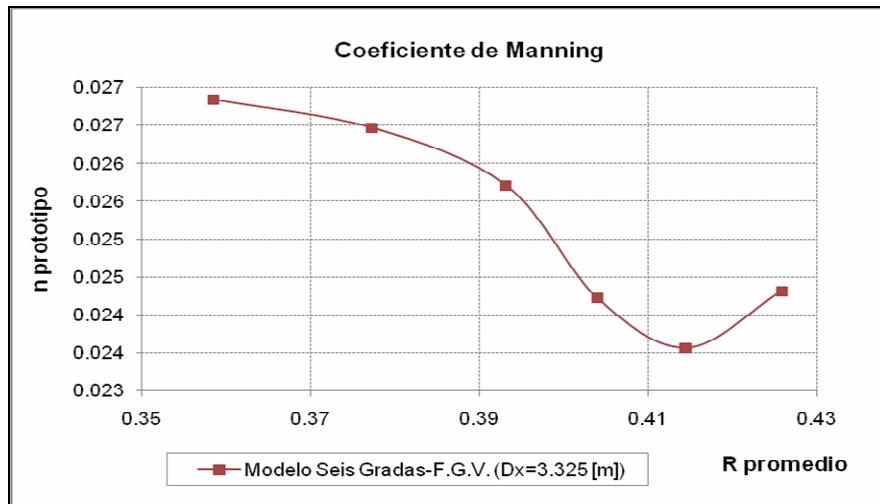


Figura 2.9.3

La curva de la Figura 2.9.3 está limitada entre un intervalo pequeño de valores de “n” (0.0236 – 0.0268), lo que permitiría obtener un valor recomendado promedio de diseño para próximos modelos igual a 0.024 en prototipo.

2.10 CONCLUSIONES

2.10.1 FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN - CONCLUSIONES

- Al terminar el análisis de los resultados para el régimen de flujo Escalón a Escalón se puede concluir, basándose en la figura 2.8.8, que los resultados obtenidos con la ecuación de Bernoulli son en buena parte semejantes o comparables con los resultados obtenidos con la ecuación teórica 2.2.3, por lo que se podría recomendar considerar los primeros resultados por ser tomados directamente de los ensayos o tomar un promedio de ambos resultados.
- Al ser semejantes los resultados de disipación de energía obtenidos por ambos métodos se comprueba que la teoría desarrollada para la ecuación 2.2.3 concuerda con los datos obtenidos en laboratorio.
- Los resultados de disipación de Energía demuestran que la variación de este parámetro está relacionado directamente con la altura de los escalones, ya que en este caso al ser la altura del escalón diez veces menor que su longitud y con el aumento del caudal (Y_c/h también aumenta), la influencia sobre el grado de disipación de las gradas disminuye.
- La ubicación de los piezómetros a lo largo del modelo experimental debe ser establecida de una manera precisa, teniendo en cuenta que la ubicación de estos puntos es proporcional a los datos que se van a obtener, queda claro, que las caídas de agua cerca de los piezómetros eleva de manera notoria los valores de carga y que en los tramos donde

el flujo se estabiliza la carga es menor, se debe evitar ubicar el piezómetro en los puntos donde el chorro de agua lo golpee directamente ya que en ese caso no se estaría midiendo distribución hidrostática de presiones sino carga de impacto. Debemos tomar en cuenta que el punto de impacto del chorro no es fijo, por lo tanto no es posible cumplir de forma exacta con los parámetros de construcción antes expuestos, por lo mismo que se debe tener cuidado, en el laboratorio, de notar las posibles deficiencias en las mediciones realizadas por efecto de los impactos.

- El perfil de flujo observado varía directamente con el caudal que circula por las gradas, para el primer caudal el flujo es prácticamente uniforme en las huellas, se forman cavidades con aire y pequeños vórtices recirculantes, las primeras alteraciones se observan en el tramo de salida, a medida que el caudal aumenta el flujo se vuelve más inestable, aparecen crestas centrales y laterales, debido también a la estrechez de la base, las cavidades de aire desaparecen y los vórtices recirculantes se vuelven más notorios notándose la presencia de un flujo en transición, que no es analizado en este estudio por falta de conceptos y fórmulas, hasta que el flujo pasa de ser escalón a escalón a flujo rasante.

2.10.2 FLUJO RASANTE- CONCLUSIONES

- Los cálculos que delimitan la ocurrencia de flujo rasante para el modelo analizado indican que este ocurriría a partir del caudal prototipo de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, pero las observaciones en el laboratorio revelaron que es en el caudal prototipo de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ donde realmente se empieza a notar las características propias de este régimen de flujo, especialmente por la desaparición de las cavidades con aire en las contrahuellas de los escalones, la presencia de vórtices de recirculación (aunque casi imperceptibles) y la tendencia a formar un fondo falso, el que no se desarrollo completamente para ninguno de los caudales analizados. Este hecho se explica por la gran longitud del

escalón, diez veces mayor a la altura del mismo, que impide el efectivo desarrollo del flujo rasante.

- ▶ En régimen rasante el perfil de flujo tiende a estabilizarse con el aumento del caudal, por lo que las crestas, tan pronunciadas en el régimen grada a grada, se van desvaneciendo hasta casi desaparecer en el caudal máximo $Q_p = 10 \text{ m}^3/\text{s}$.

- ▶ La ecuación analítica 2.2.5, aplicada para obtener el grado de disipación de energía, que emplea la velocidad calculada a partir del calado de agua, da como resultado valores muy semejantes a los calculados por medio de la ecuación de energía de Bernoulli, Tabla 2.8.6.b, de donde se concluye que los ensayos realizados concuerdan con la teoría desarrollada anteriormente por otros autores. Estos valores de acuerdo a la indicada tabla varían según la ecuación 2.13 entre $37.38 \leq \Delta E(\%) \leq 46.40$ y para la ecuación de Bernoulli entre $37.40 \leq \Delta E(\%) \leq 46.50$.

- ▶ El grado de disipación de energía depende directamente de la altura del escalón, así como también de la cantidad de gradas que componen la estructura de la rápida escalonada. En la rápida escalonada de $h/l = 0.10$, con seis escalones y para régimen rasante, o sea para un caudal relativamente alto, la disipación promedio es de un cuarenta por ciento.

- ▶ Todas las presiones medias medidas en régimen rasante resultaron positivas, por lo tanto no existe succión en ningún punto del flujo, ni peligros de cavitación.

- ▶ Las presiones sufren un incremento en sus valores, en los piezómetros ubicados en la primera mitad de la longitud de su huella correspondiente, causado por el gran chorro que produce la caída en cascada de escalón a escalón, hasta que el nivel de agua se estabiliza disminuyendo su calado,

con la lógica disminución del valor de las cargas de los piezómetros en la segunda mitad de la huella de cada escalón.

- ▶ Las presiones sobre la huella de un escalón son máximas en su parte media (figura 2.8.22 y 2.8.23) y disminuyen su valor al acercarse a la contrahuella debido a la acción de los vórtices de recirculación.
- ▶ Las presiones en el segundo escalón son mayores que en el cuarto escalón, debido que la velocidad con la que giran los vórtices aumenta conforme se incrementa la velocidad en la lámina del flujo principal o rasante.
- ▶ Los Coeficientes de Manning para un canal escalonado de las características ensayadas en el laboratorio, correspondiente a un prototipo de: $h/l = 0.10$, $b = 1.20$ m., $h = 0.50$ m., seis gradas y $2.4 \leq y_c/h \leq 3.9$ (Tabla 2.9.4), se encuentran entre $0.024 \leq n \leq 0.027$ (Tabla 2.9.5); lo que permite sugerir un valor para n de 0.024, según la tendencia que presentan los valores de la Figura 2.9.3, ya que en el tramo final de la curva correspondiente a los últimos caudales, esta empieza a estabilizarse alrededor del valor antes mencionado.
- ▶ Dada la tendencia de los valores calculados del coeficiente de fricción f según la ecuación 2.14 en el anexo 1.d, se tomaron los valores de f para cada y_c/h a los correspondientes en el tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 2.9.4. y en la figura 2.9.2.; lo cual permite recomendar un valor de f igual a 0.17 para las características de este tipo de rápida investigada, cuyo prototipo corresponde a $h/l = 0.10$, seis gradas, $h = 0.50$ m y $2.4 \leq y_c/h \leq 3.9$.

2.11. RESULTADOS EXPERIMENTALES CON GRADA INCLINADA

EL 4%, MODELO CON SEIS GRADAS

2.11.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN UNA RÁPIDA ESCALONADA PARA $h/l = 0.10$ CON GRADAS INCLINADAS EL 4 %, MODELO CON SEIS GRADAS

2.11.1.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA.

2.11.1.1.1 PERFIL DE FLUJO.

Con el fin de analizar este tipo de régimen se observará las características que se presentan en el caudal prototipo de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. (Anexo 2a)

El flujo escalón a escalón presente para gradas con pendiente del 4%, muestra características semejantes que las de las gradas horizontales (pendiente = 0%), siendo la diferencia más notoria la disminución de la altura de las crestas aproximadamente en un 5% (tomando como referencia un perfil de flujo sin crestas), y así mismo, de todos los calados a lo largo del modelo (Figura 2.11.1), debido a la mayor velocidad alcanzada por el flujo posterior el aumento de la pendiente.

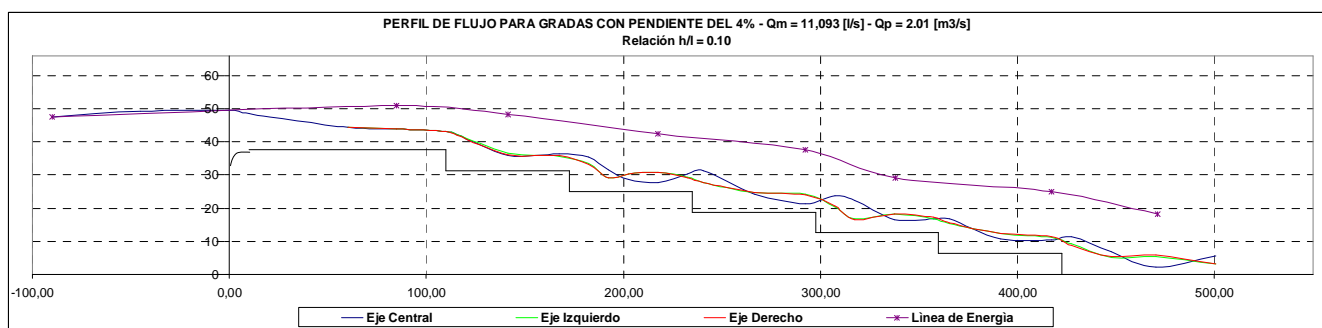
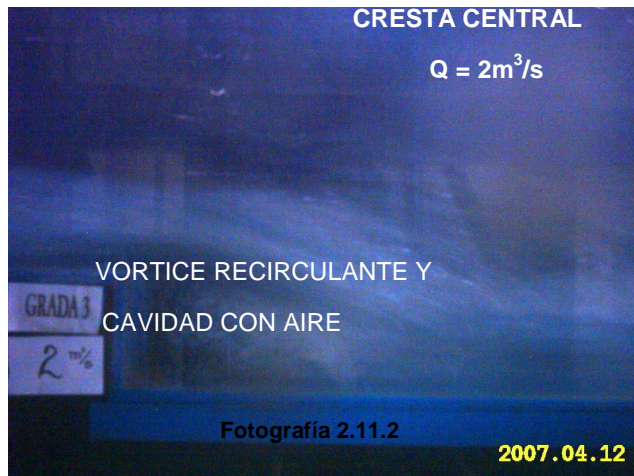


Figura 2.11.1

Al final de la grada dos se produce el primer vórtice recirculante con aire debido a la relación $h/l = 0.1$, y por el cruce de las líneas de flujo las crestas más notorias de hasta 33 cm., medidas desde el escalón. (Figura 2.11.2)

El comportamiento caótico que produce las salpicaduras aún existe aunque en menor dimensión por la misma razón antes mencionada sobre la velocidad. (Figura 2.11.3)



2.11.1.1.2. DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Una vez recopilados todos los datos de los ensayos y después del cálculo de las variables necesarias se llegó a determinar los siguientes resultados de porcentajes de disipación de energía tabla 2.11.1 (Anexo 2b), entre una sección en el canal de aproximación, $x = 85$ cm, y en una sección al pie de la rápida $x = 470.5$ cm. Este análisis fue realizado para una relación de Y_c/h correspondiente a un caudal $Q=2\text{m}^3/\text{s}$. Para esta determinación, se utilizó las ecuaciones 2.2.3, y 2.2.4, y la ecuación de Bernoulli

Qm	Qm	Qp	yc	Porcentaje de Disipación (%)		Régimen de flujo
				Ecuación	Ecuación	
[lt/s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m]	Bernoulli	Analítica	
11,093	0,0111	2,01	0,082	64,51	63,76	Grada a grada

Tabla 2.11.1 Porcentaje de disipación de energía para régimen Escalón a Escalón (Anexo 2b)

2.11.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE

2.11.1.2.1 PERFIL DE FLUJO.

Se analiza este régimen observando las características de los caudales prototipo 5, 8 y 10 m³/s.

El aumento en la velocidad del flujo provocada por el aumento de la pendiente longitudinal del canal produce la formación de un mayor número de ondas de choque a lo largo de la superficie libre del canal, formando un número superior de crestas a partir del segundo escalón en adelante manteniéndose para todos

los flujos observados, a diferencia de cuando el canal se encuentra en posición horizontal, donde las crestas aparecen desde el tercer escalón para $Q_p = 5$ m³/s hasta prácticamente desaparecer en el quinto escalón para $Q_p = 10$ m³/s. Hay que tener en cuenta que las crestas presentes en la rápida con gradas inclinadas son de mucha menor altura, manteniendo un perfil muy uniforme para todos los caudales. (Figura 2.11.5)

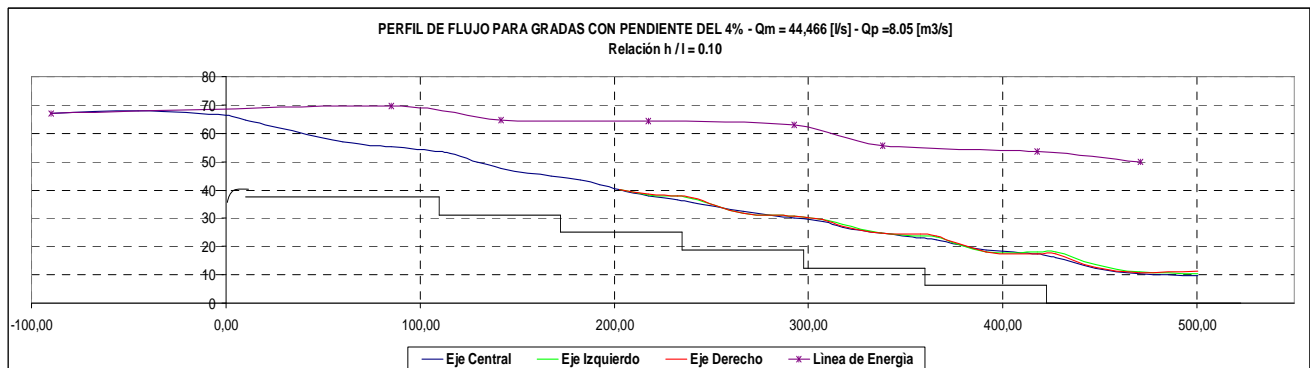


Figura 2.11.5

Se debe anotar que la presencia de salpicaduras es casi nula, igualmente provocada por lo estable del flujo:



Fotografía 2.11.6

La pendiente del 4% de las gradas permite que las características del régimen en flujo rasante, sean mucho más notorias que para las gradas horizontales, siendo mucho más aplicables sus fórmulas y teorías. (Figura 2.11.6).

2.11.1.2.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Las mediciones realizadas en el modelo permiten encontrar los valores de las variables que componen el análisis del grado de disipación de energía. Estas condujeron a los siguientes resultados:

Qm [lt/s]	Qm [m3/s]	Qp [m3/s]	yc [m]	Porcentaje de Disipación (%)		Régimen de flujo
				Ecuación Bernoulli	Ecuación Analítica	
27.261	0.0273	4.93	0.151	32.79	34.59	Rasante
44.466	0.0445	8.05	0.208	27.83	27.57	Rasante
55.774	0.0558	10.10	0.241	26.81	27.07	Rasante

Tabla 2.11.2. Porcentaje de disipación de energía para cada caudal. Ecuación de Bernoulli y ecuación analítica utilizando velocidades calculadas con el calado para $h/l = 0.10$.

El siguiente gráfico presenta la variación del porcentaje de disipación de energía producido para flujo rasante. (Anexo 2b)

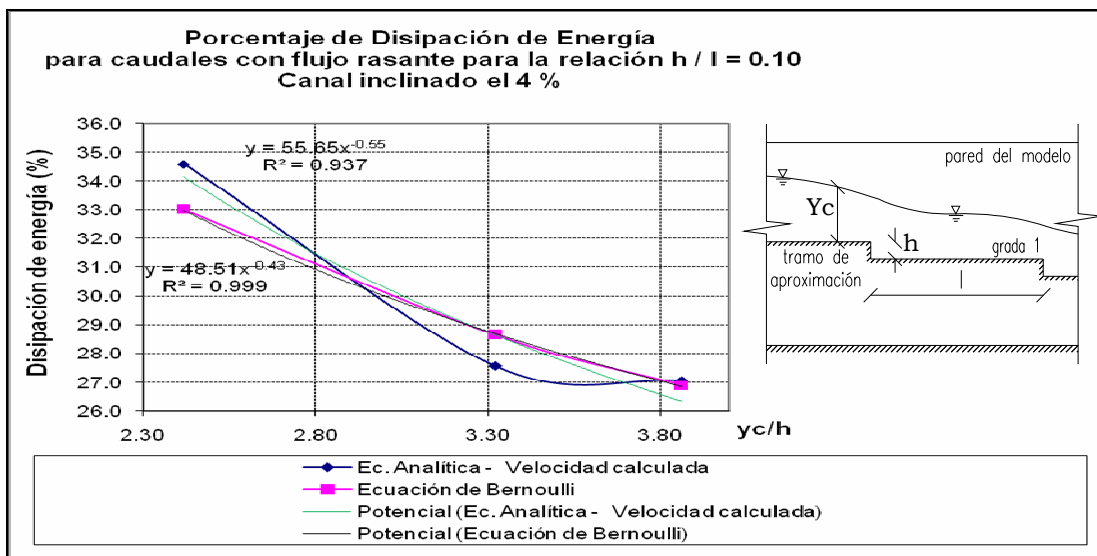


Figura 2.11.7 Porcentaje de disipación de energía. Línea de Tendencia Potencial Ecuación Analítica. Línea de Tendencia Potencial Ecuación de Bernoulli. (Anexo 2.b)

La disipación de energía ha disminuido considerablemente para las gradas inclinadas un 4%, con relación al de posición horizontal, la misma que es un 27% menor en el $Q_p = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta un 32 % menor para el $Q_p = 5 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.11.1.2.3 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES. (ANEXO 2.C)

CARGA DE PRESIÓN (h) [m] - GRADAS CON PENDIENTE DEL 4%																
Qp [m3/s]	yc / h	contrahuella		huella					contrahuella		huella				pie	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
4.93	2.398	0.182	0.201	0.222	0.299	0.307	0.244	0.19	0.099	0.132	0.137	0.242	0.194	0.125	0.091	0.096
8.05	3.323	0.21	0.231	0.248	0.314	0.366	0.298	0.223	0.122	0.153	0.158	0.25	0.255	0.149	0.142	0.127
10.1	3.865	0.234	0.255	0.271	0.336	0.402	0.334	0.248	0.133	0.172	0.175	0.26	0.299	0.168	0.183	0.148

contrahuella		huella					contrahuella		huella				pie	
P1/h	P2/h	P3/h	P4/h	P5/h	P6/h	P7/h	P8/h	P9/h	P10/h	P11/h	P12/h	P13/h	P14/h	P15/h
2.912	3.216	3.552	4.784	4.912	3.904	3.04	1.584	2.112	2.192	3.872	3.104	2	1.456	1.536
3.36	3.696	3.968	5.024	5.856	4.768	3.568	1.952	2.448	2.528	4	4.08	2.384	2.272	2.032
3.736	4.08	4.336	5.376	6.432	5.336	3.968	2.128	2.752	2.8	4.16	4.784	2.688	2.928	2.368

Tabla 2.11.3 Cargas de presión para $h/l = 0.10$

Los piezómetros se mantienen ubicados en la huella del segundo y cuarto escalón y en la contrahuella del primer y tercer escalón, además de las dos tomas piezométricas al pie de la rápida, al final del tramo de salida.

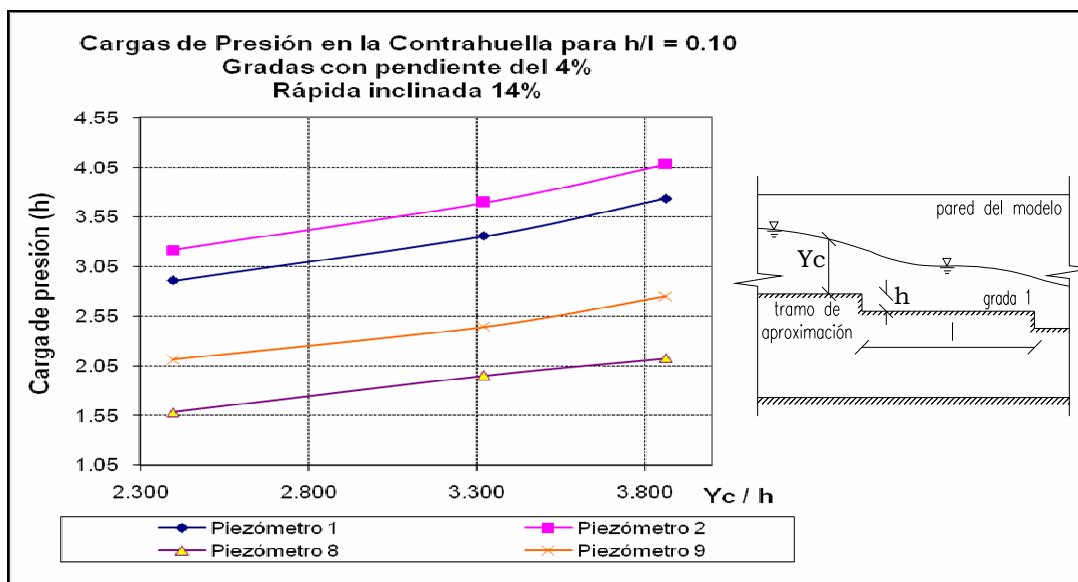


Figura 2.11.8

Las presiones en contrahuella son menores para el escalón más alejado del inicio de la rápida (donde se encuentran ubicados los piezómetros 8 y 9, debido

a la menor altura de agua presente en dicha grada y van aumentando proporcionalmente al aumento de caudal. Las cargas de presión también son menores para los piezómetros ubicados en el extremo superior, en relación a los cuyas tomas están ubicadas en la parte inferior, donde la carga de altura de agua perpendicular a la contrahuella es mayor. (Figura 2.11.8)

Se observa también que las curvas formadas por los valores de cargas de presión presentan pendientes que tienden aún más a la horizontal comparadas con las curvas obtenidas a partir de la rápida sobre el canal con pendiente cero, lo que ratifica la estabilidad que va adquiriendo el perfil en el régimen rasante, para el modelo con gradas inclinadas.

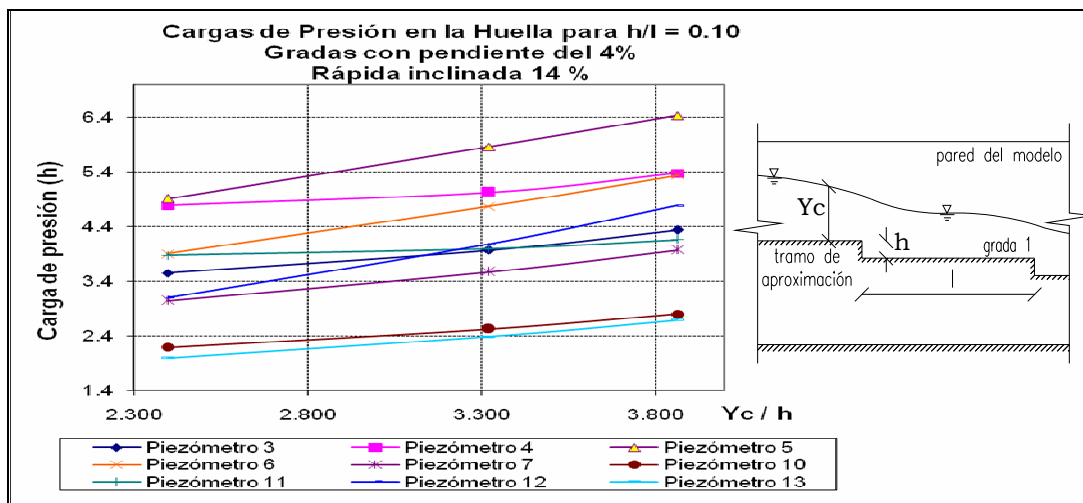


Figura 2.11.9

Las presiones son siempre mayores para los piezómetros ubicados en el escalón más cercano al inicio de la rápida, por la mayor altura de agua presente y máximas en la parte media de la grada.

Una observación muy importante es que la pendiente de la línea de carga de presión para los piezómetros ubicados en un mismo punto sobre el eje longitudinal al flujo, pero en diferentes escalones, son muy similares. Así por ejemplo las pendientes para los piezómetros 5 y 12 que están ubicados en la parte central del escalón tienen casi la misma inclinación (Figura 2.11.9), siendo estas las de más fuerte pendiente por que allí se presenta el mayor choque del chorro de agua sobre el escalón.

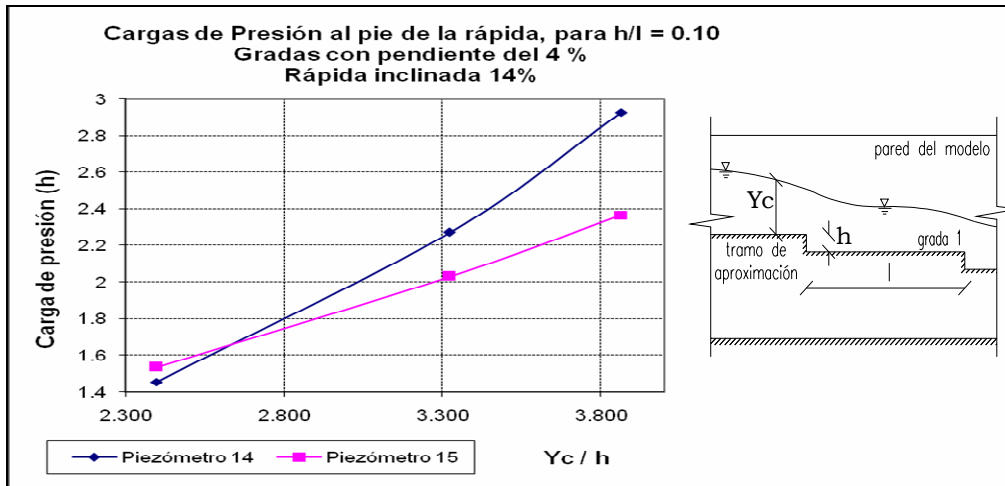


Figura 2.11.10

Las presiones al pie de la rápida son prácticamente las mismas que para el modelo en posición horizontal. (Figura 2.11.10)

El perfil de presiones para régimen rasante se puede visualizar en el siguiente gráfico:

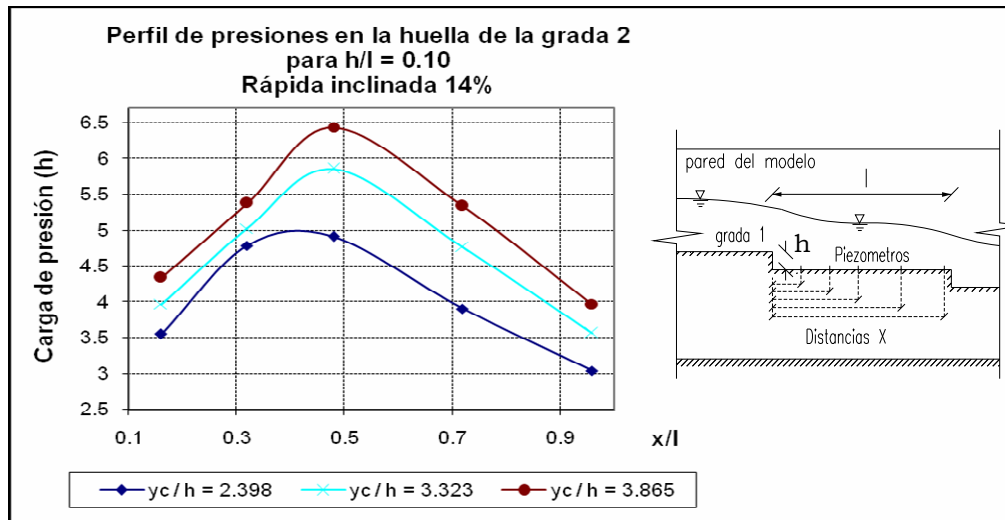


Figura 2.11.11

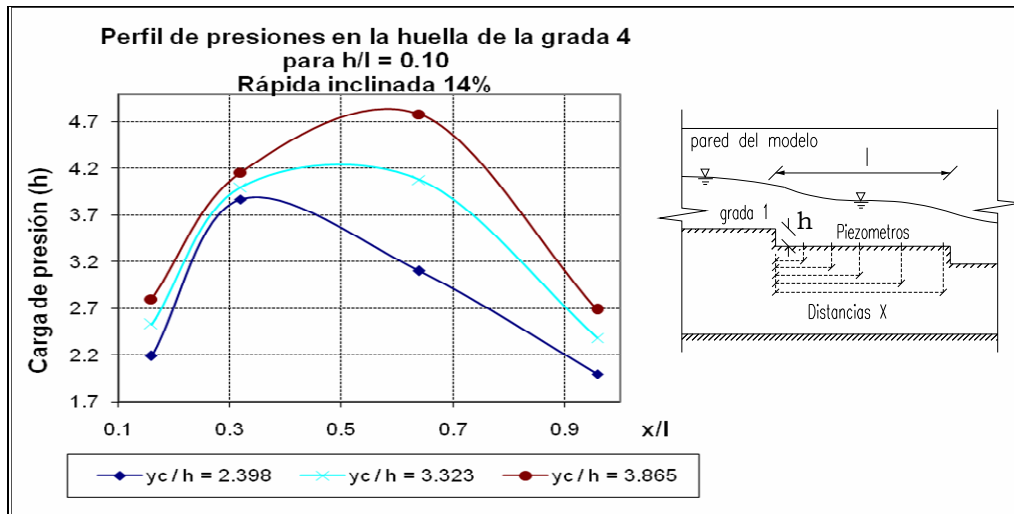


Figura 2.11.12

Tanto en la Figura 2.11.11 como en la Figura 2.11.12, se observa que las mayores presiones se encuentran, como ya se mencionó, en la parte media del escalón.

2.11.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN Y DE MANNING.

2.11.2.1 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Los cálculos correspondientes para los caudales en régimen rasante se encuentran detallados en el Anexo 2.d.

Dada la tendencia de los valores calculados del coeficiente de fricción f según la ecuación 2.2.6 en el anexo indicado, se tomaron los valores de f para cada y_c/h a los correspondientes en el tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 2.11.4. y en la figura 2.11.13.

TENDENCIA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN LA GRADA FINAL AGUAS ABAJO		
Qp [m3/s]	yc / h	f calculado
4.99	2.398	0.160
8.05	3.323	0.160
10.01	3.863	0.170

Tabla 2.11.4. Coeficientes de fricción para $h/l = 0.10$
Gradas con pendiente del 4%

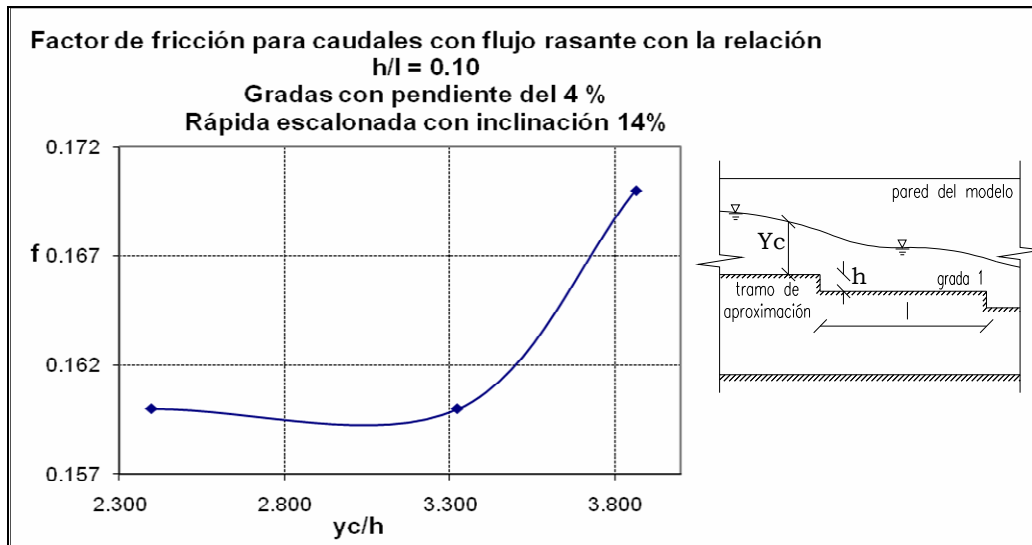


Figura 2.11.13

2.11.2.2. COEFICIENTE DE MANNING

Caudal [m3/s]	F.G.V.	
	Rprot. Prom. (m)	n prototipo
	$\Delta x=3.325$ [m]	$\Delta x=3.325$ [m]
4.93	0.3418	0.0221
8.06	0.3883	0.0192
10.10	0.4133	0.0196

Tabla 2.11.5. Coeficiente de Manning para $h/l = 0.10$

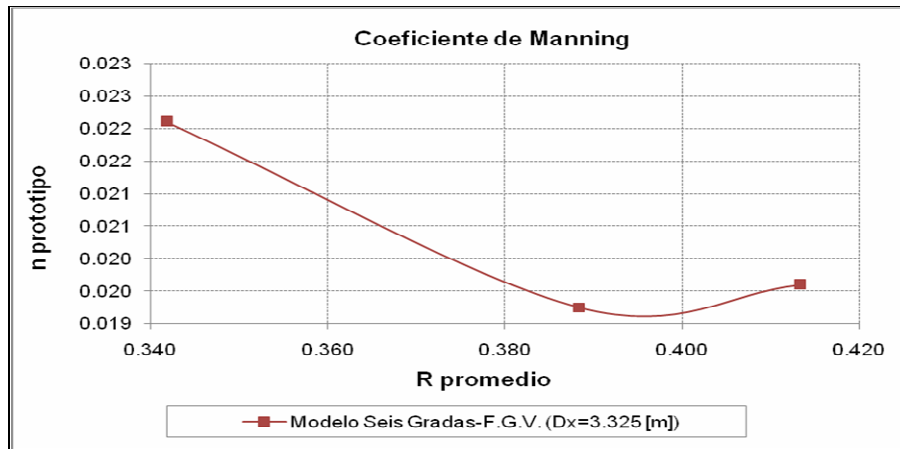


Figura 2.11.14

Los coeficientes de Manning mostrados en la figura 2.11.14 tienen poca variación entre sí, especialmente para los dos últimos caudales analizados lo que facilitará la obtención de un valor promedio para el modelo con pendiente 0.14.

2.11.3 CONCLUSIONES

2.11.3.1 FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN - CONCLUSIONES

- Para $Q = 2\text{m}^3/\text{s}$ y con la pendiente del 14% (10% del modelo + 4% de la inclinación del canal) como inclinación total de la estructura, se produce una aceleración del flujo, con cambios en su perfil hidráulico, incrementándose las velocidades; sin embargo el porcentaje de disipación de energía al pie de la rápida es similar al obtenido para el mismo caudal ($Q = 2\text{m}^3/\text{s}$) con gradas horizontales,
- De la tabla 2.11.1. se sabe que el porcentaje de disipación de energía para el modelo con gradas inclinadas un 14% es de 64.51% y 63.76, según la ecuación de Bernoulli y la ecuación 2.2.3 respectivamente.
- Las salpicaduras en las paredes también disminuyen notablemente y con el aumento del caudal prácticamente desaparecen.

2.11.3.2 FLUJO RASANTE - CONCLUSIONES

- El perfil de flujo para el modelo inclinado tiende a uniformizarse para los caudales medios de este estudio, por lo que las crestas no son lo suficientemente representativas. Debido a la disminución de la altura de las crestas, las salpicaduras casi no existen.
- La teoría sobre régimen en flujo rasante es más notoria en el modelo, donde la huella de la grada no es horizontal sino con una inclinación del 4%, por lo tanto la rápida en su conjunto tiene una inclinación del 14%, obteniéndose perfiles de flujo más aproximados a flujo rasante.
- La formación del fondo falso entre las aristas de cada escalón que se observó durante el proceso experimental, implica que éstas, no tienen mayor influencia sobre el perfil de flujo, por lo que este tiende a ser uniforme.
- La ecuación analítica 2.2.5 de este capítulo, aplicada para obtener el grado de disipación de energía, que emplea la velocidad calculada a partir del calado de agua, da como resultado valores muy semejantes a los calculados por medio de la ecuación de energía de Bernoulli, Tabla 2.11.2., de donde se concluye que los ensayos realizados concuerdan con la teoría desarrollada anteriormente por otros autores. Estos valores de acuerdo a la tabla indicada varían según la ecuación 2.2.5 entre $35\% \leq \Delta E(\%) \leq 27\%$ y para la ecuación de Bernoulli entre $33\% \leq \Delta E(\%) \leq 27\%$.
- Al existir un menor calado, provocado por el aumento de la velocidad, las cargas de presión observadas en los tubos manométricos tienden a ser constantes en un determinado tramo, lo que implica una distribución hidrostática de presiones en ese tramo.
- Las cargas de presión ubicadas en un mismo punto sobre el eje longitudinal del flujo pero en diferentes escalones (2 y 4), son siempre mayores para el escalón más cercano al inicio de la rápida (2), pero tienen la misma tendencia a incrementarse, según aumenta el caudal, para ambos casos

- El valor del seno del ángulo θ , es directamente proporcional al coeficiente de fricción f , por lo tanto al aumentar el valor de θ , el valor de f también se incrementó, variando entre 0.19 y 0.29
- Los resultados obtenidos con este análisis permiten sugerir como valor promedio del coeficiente de Manning, para la relación $h/l = 0,10$, el valor de 0.0190
- Los Coeficientes de Manning para un canal con fondo escalonado de las características ensayadas en el laboratorio, correspondiente a un prototipo de: $h/l = 0.10$, $b = 1.20$ m., $h = 0.50$ m., seis gradas, grada inclinada el 4% y $2.4 \leq y_c/h \leq 3.9$ (Tabla 2.11.4), se encuentran entre $0.022 \leq n \leq 0.0196$ (Tabla 2.11.5); lo que nos permite sugerir un valor para n de 0.020, según la tendencia que presentan los valores de la Figura 2.11.14, ya que en el tramo final de la curva correspondiente a los últimos caudales, esta empieza a estabilizarse alrededor del valor anterior.
- Dada la tendencia de los valores calculados del coeficiente de fricción f según la ecuación 2.2.6 en el anexo 2.d, se tomaron los valores de f para cada y_c/h a los correspondientes en el tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 2.11.4. y en la figura 2.11.13; lo cual permite recomendar un valor de f igual a 0.16 para las características de este tipo de rápida investigada, cuyo prototipo corresponde a $h/l = 0.10$, seis gradas, $h = 0.50$ m, grada con inclinación del 4% y $2.4 \leq y_c/h \leq 3.9$.
- Los valores de R^2 que se muestran en las graficas de disipación de energía y factor de fricción, por ser cercanos a uno, indican que los datos obtenidos en laboratorio son correctos ya que la línea de tendencia abarca casi completamente el espacio de dispersión de los datos. Se descarto el uso de la función polinómica para la línea de tendencia por ser esta una función que obliga a la línea a adaptarse a los datos y por lo tanto a que R^2 tienda a 1.

CAPITULO 3

3.1.- DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS ESCALONADAS

3.1.1 PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS ESCALONADAS, $h/l=0.10$, DOCE ESCALONES

3.1.1.1 DISEÑO.

Con la experiencia obtenida después del análisis de la rápida escalonada de relación altura (h) / longitud (l) = 0.10 con 6 escalones, se procederá a diseñar una nueva estructura con el doble de escalones con respecto a la anterior, es decir con 12 escalones, pero con igual relación h/l , igual escala de longitudes y con las mismas limitaciones del primer modelo.

El modelo tiene una longitud total de desarrollo de 6.125 [m] de largo y 0.15 [m] de ancho, con una altura total o desnivel de la rápida de 0.375 m, con un total de doce gradas, cada una de $h=0.03125$ [m] y $l=0.3125$ [m]. (Figura 3.1.1).

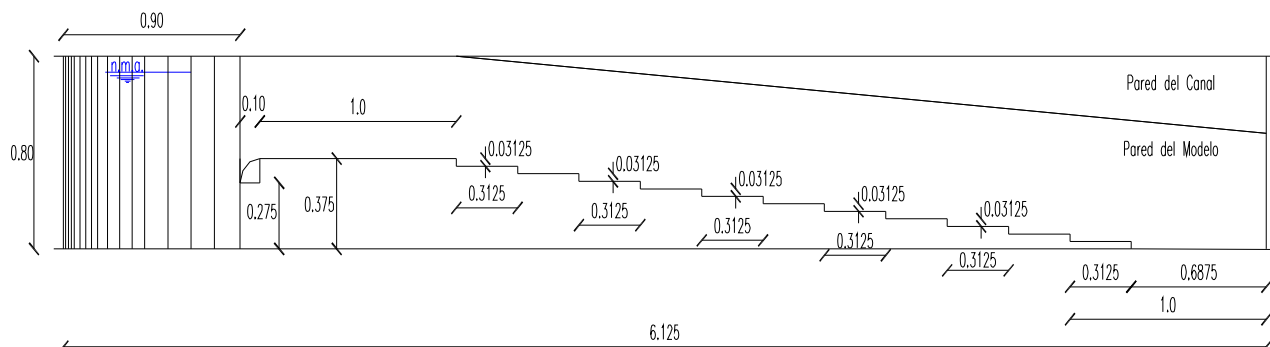


Figura 3.1.1

Los elementos de la estructura que se encuentran aguas arriba de la rápida con fondo escalonado mantienen las dimensiones del modelo anterior, así como sus características geométricas. (Figura 3.1.2)

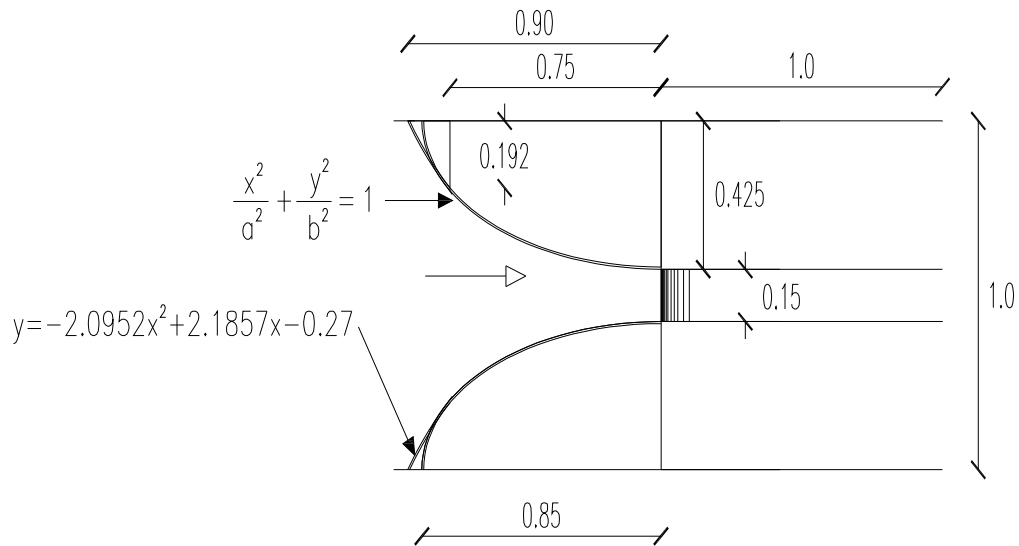


Figura 3.1.2

El tramo final del modelo para la restitución de los caudales será de 0.6875 [m] incluyendo la última huella, debido al aumento del número de gradas (Figura 3.1.3)

Los niveles de agua serán controlados por la compuerta del canal hidrodinámico.

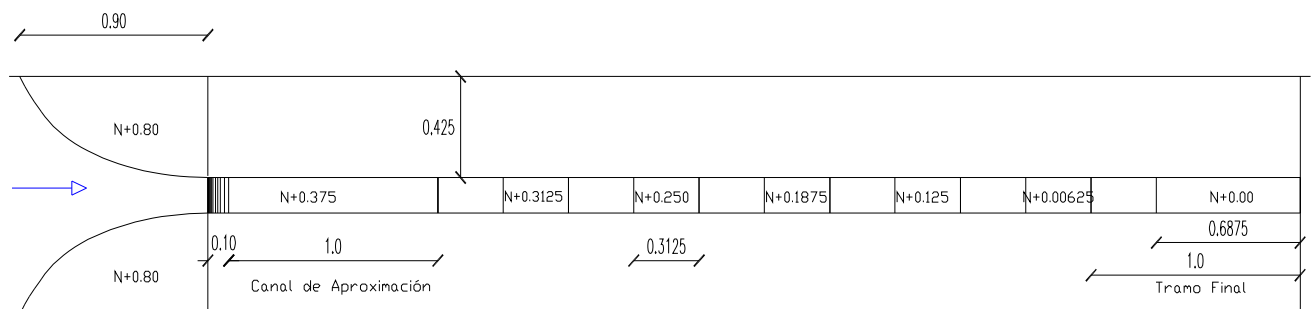


Figura 3.1.3

El prototipo tiene una relación $h/l = 0.10$, siendo h la altura del escalón (contrahuella) igual a 0.25 [m] y l la longitud (huella) igual a 2.50 [m].

Considerando la escala propuesta para el modelo de 1:8 se determina:

$$h_{\text{modelo}} = \frac{h_{\text{prototipo}}}{L} \quad (1.1)$$

$$h_{\text{modelo}} = 0.03125 \text{ [m]}$$

$$l_{\text{modelo}} = \frac{l_{\text{prototipo}}}{L} \quad (1.2)$$

$$l_{\text{modelo}} = 0.3125 \text{ [m]}$$

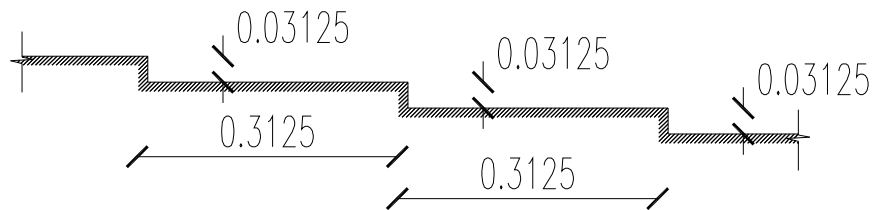


Figura 3.1.4

Al igual que el modelo de seis gradas, el caudal máximo del prototipo (Q_p) es de 10 [m³/s], por lo tanto el caudal del modelo (Q_m) es de 0.055 [m³/s] ó 55 [lt/s].

El valor del caudal unitario (q) es: 0.367 [m³/s/m]

El calado crítico (y_c) se mantiene con un valor de 0.240 [m]

3.1.1.2 CONSTRUCCIÓN

Una vez determinadas las dimensiones del modelo en la etapa de diseño, se procede a su construcción.

Materiales.

- Planchas de acrílico de 2,40 m x 1,50 m x 6 mm.
- Pintura esmalte color blanco.
- Silicón transparente ABRO 1200.
- Lija FANDELLI N° 80.
- Manguera sanitaria transparente de 5/32 mm. (diámetro interior).
- Tubos de cristal de 12 mm (1,20 m de largo).

Equipo de mano.

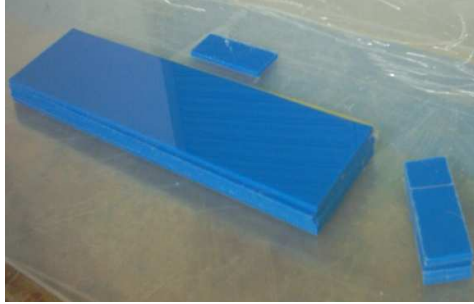
- Lápiz, reglas y flexómetro.
- Cepillo de mano
- Nivel de mano de 50 [cm]
- Pistola para silicón.
- Acrílico líquido
- Escuadra
- Brocha.

Maquinaria.

- Sierra circular
- Caladora eléctrica.

3.1.1.2.1 PROCEDIMIENTO

- Sobre la estructura utilizada para el análisis del flujo con seis gradas se montaran escalones de dimensión igual a la mitad de las dimensiones anteriores, es decir: $H = 0.03125$, $L = 0.3125$
- Trazar y cortar las planchas de acrílico, según las dimensiones establecidas. (cara vertical y cara horizontal).



Fotografía 3.1

- Perforar las huellas y contrahuellas para ubicar los piezómetros en los puntos de interés para el análisis (tercero, séptimo y noveno escalón).



Fotografía 3.2

3.1.1.3 MONTAJE

Construidos los elementos antes mencionados se procede al montaje sobre la estructura anterior.

3.1.1.3.1 PROCEDIMIENTO

- Desmontar los escalones donde se ubicaban los piezómetros en el modelo de 6 gradas para ubicar las mangueras en la nueva posición, empatar con los rificios en huellas y contrahuellas
- Con la ayuda de la escuadra y el nivel de mano montar las nuevas gradas sobre las gradas anteriores.

- Previo a la medición de presiones en las pruebas posteriores se deberá encerrar los piezómetros llenándolos de agua hasta que se estabilicen en un punto y señalarlo.



Fotografía 3.3

- Impermeabilizar las uniones con acrílico líquido y silicón para evitar filtraciones.



Fotografía 3.4

3.2 PLAN DE PRUEBAS DEL PROCESO EXPERIMENTAL

3.2.1 PLAN DE PRUEBAS PARA RÁPIDA ESCALONADA CON GRADA

HORIZONTAL PARA LA RELACIÓN ALTURA (h) / LONGITUD (l),

$h/l = 0.10$, 12 ESCALONES.

En general las pruebas a realizarse en este modelo son semejantes a las realizadas en el primero análisis, estudiando el mismo número de caudales.

3.2.1.1 CAUDALES A SER ENSAYADOS

Rápida con 12 escalones

$$h = 0.03125 \text{ m}$$

$$l = 0.3125 \text{ m}$$

$$h/l = 0.10$$

El rango de caudales a ser ensayados para el canal hidrodinámico en posición horizontal se presenta en la Tabla 3.2.1:

Qprototipo [m³/s]	Qmodelo [m³/s]
1	0.0055
2	0.011
3	0.0166
4	0.0221
5	0.0276
6	0.0331
7	0.0387
8	0.0442
9	0.0497
10	0.0552

Tabla 3.2.1.

El rango de caudales a ser ensayados para el canal hidrodinámico con una pendiente del 4% (Inclinación de la rápida = 14%) se presenta en la Tabla 3.2.2:

Qprototipo [m³/s]	Qmodelo [m³/s]
5	0.0276

8	0.0442
10	0.0552

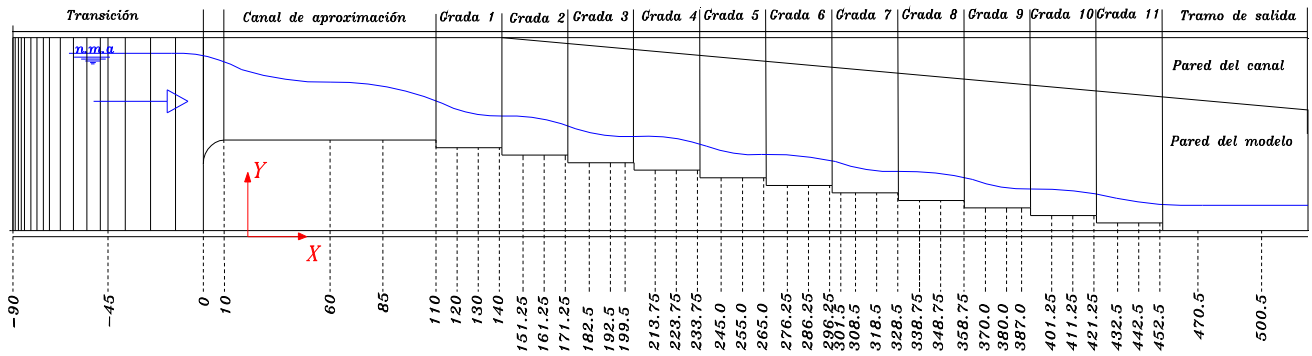
Tabla 3.2.2.

3.2.1.2 DETERMINACIÓN DE CALADOS Y PERFILES DE FLUJO

Utilizando el limnómetro mecánico de 0.1 milímetros de precisión, se procederá a tomar datos de la altura de agua, a partir de la estructura de transición y a lo largo de toda la rápida, tomando como cero del eje “x” al umbral del tramo de aproximación, para cada caudal.

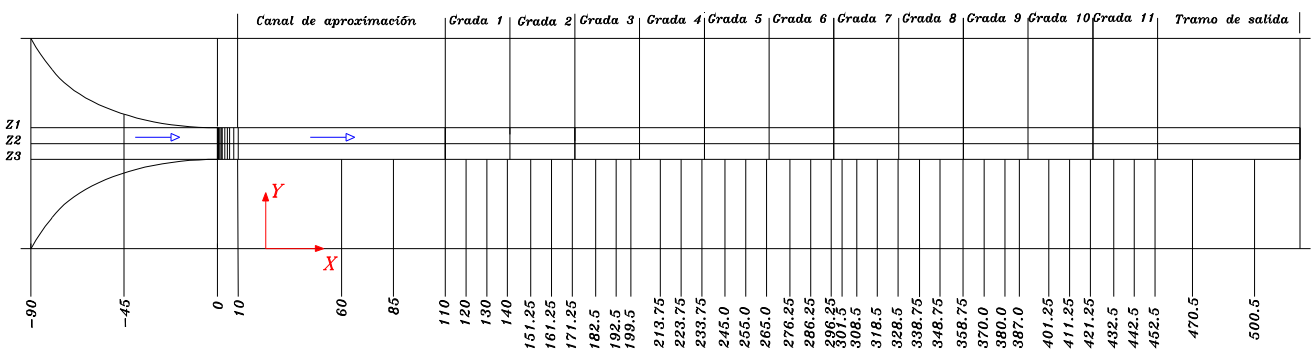
Las medidas a lo largo del eje “x” serán tomadas perpendicularmente a la corriente de flujo, lo que implica el uso de una pequeña estructura de madera colocada en la parte inferior de la base del limnómetro, que permitirá obtener una pendiente de 0.10, necesaria para la medición perpendicular al flujo (Y_p) en las aristas de cada grada para los caudales que presenten flujo rasante. (Figura 3.2.3) y serán generalmente tres en cada grada, cuando estas no tengan tomas de piezómetros, e iguales al número de piezómetros ubicadas sobre la grada, cuando estas los tengan. Las secciones de medición de la altura del flujo o calados se indican en la figuras 3.2.1 y 3.2.2. Esta disposición podría variar según la necesidad de datos que se presente para un eficiente gráfico del perfil de flujo del caudal analizado.

En el eje “z” (sentido perpendicular al flujo), se tomarán tres mediciones de calados en el centro y en puntos cercano a las paredes del canal, con el fin de obtener un calado medio, cuando hay presencia de crestas significativas. (Figura 3.2.2).



VISTA EN CORTE

Figura 3.2.1; Ubicación de los puntos de medición de Calado de agua.



VISTA EN PLANTA

Figura 3.2.2 Ubicación de los puntos de medición de Calado de agua

Como ya se mencionó, para los calados en flujo rasante, donde la lámina de agua tiene una pendiente prácticamente paralela al de la rápida con fondo escalonado a lo largo del eje "x", se deben medir los calados utilizando un soporte inclinado de acuerdo a dicha pendiente, lo que permitirá hacer mediciones perpendiculares al flujo. Dichas mediciones se realizarán sobre los bordes de cada grada. (Figura 3.2.3).

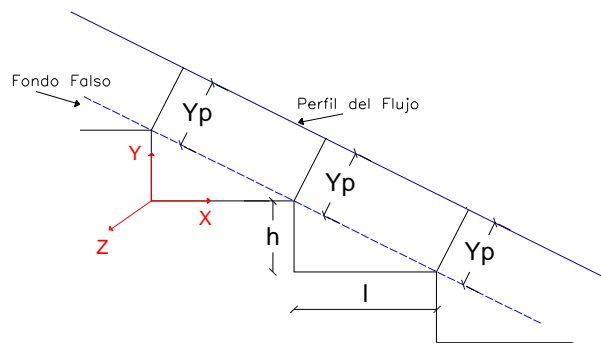


Figura 3.2.3

3.2.1.3 MEDICIONES DE VELOCIDAD.

Debido a la diferencia entre el valor de la velocidad media, medida con el micromolinete digital y la velocidad calculada, determinada con el caudal (Q) y el área hidráulica (A), que fueron encontradas para el canal de seis escalones ensayado con anterioridad; en el presente estudio se realizaron algunas mediciones encontrándose también algunas diferencias significativas entre la velocidad medida y la calculada, por lo que se prefirió, la obtenida con el caudal circulante y el área hidráulica de la sección, para el proceso de cálculo del porcentaje de energía disipada a lo largo del canal escalonado.

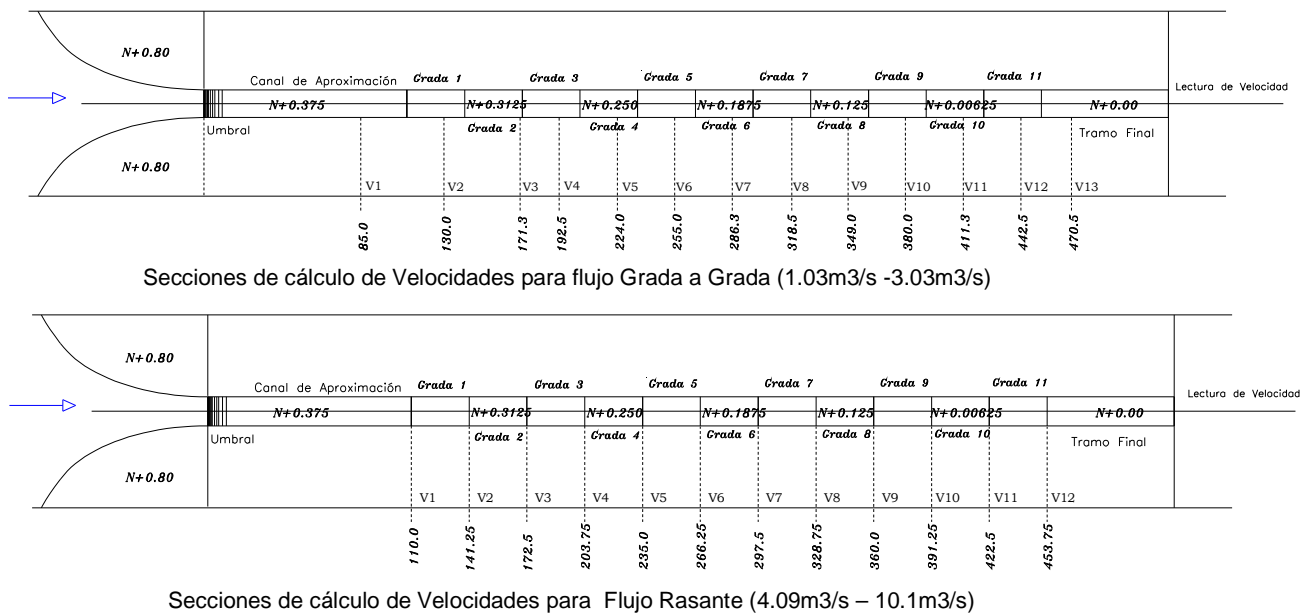
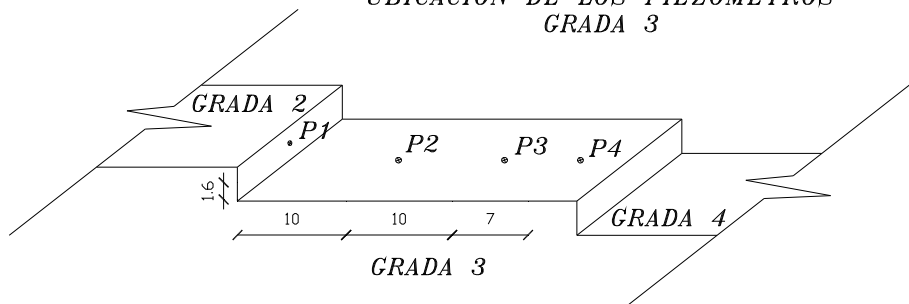


Figura 3.2.4

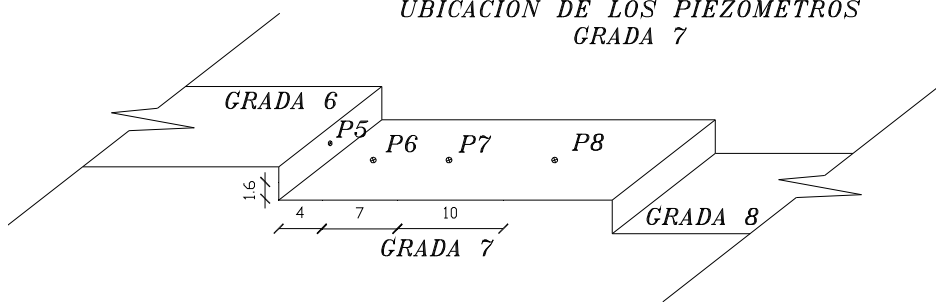
3.2.1.4 MEDICIONES DE CARGAS PIEZOMÉTRICAS

De la misma manera que se explicó la ubicación de las tomas piezométricas sobre cada escalón para la estructura de seis gradas, se procede ahora a explicar para la estructura de doce escalones. En la grada tres y nueve se colocaran tres piezómetros, los dos primeros cada 10 cm. y el último a 7 cm., en la grada siete se colocaran tres piezómetros, a 4cm, 7cm, y 10 cm respectivamente. Figura 3.2.5

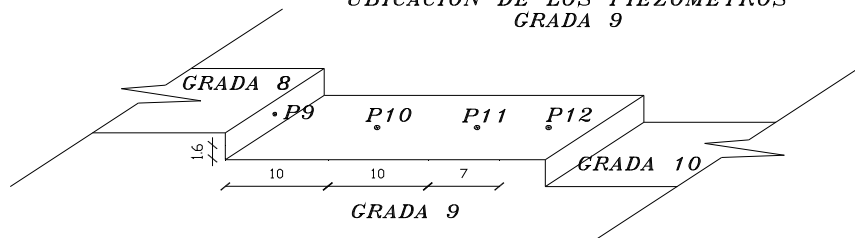
UBICACION DE LOS PIEZOMETROS
GRADA 3



UBICACION DE LOS PIEZOMETROS
GRADA 7



UBICACION DE LOS PIEZOMETROS
GRADA 9



UBICACION DE LOS PIEZOMETROS
TRAMO FINAL

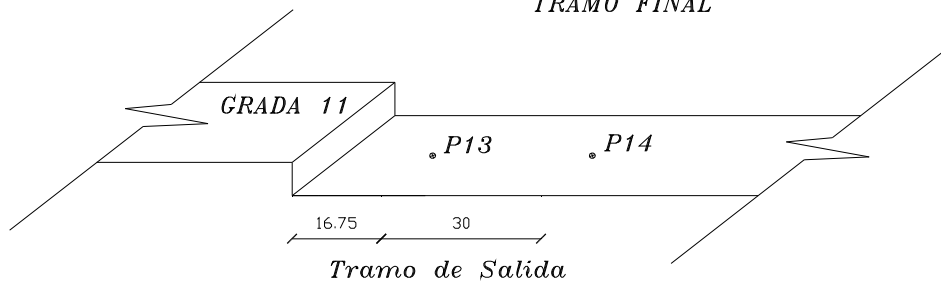


Figura 3.2.5

Sobre la contrahuella del mismo escalón se instalará una toma piezométrica en la mitad de la altura y en la mitad del ancho de la grada. Figuras 3.2.5

Se ubicarán además dos tomas piezométricas aguas abajo del extremo de la rápida, la primera en el sitio donde se puede desprender el flujo del fondo del canal y la segunda donde el flujo tienda a estabilizarse y su distribución sea hidrostática.

En total el conjunto de datos de las cargas de presión será de catorce mediciones por caudal, cada una en su respectivo tubo piezométrico, con lo que se obtendrá la distribución del valor medio de presión que actúa sobre la toma piezométrica para cada caudal y de los valores máximos y mínimos que se presentan sobre los escalones.

3.3 METODOLOGÍA DEL PROCESO EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO PARA DIFERENTES REGÍMENES

3.3.1 DETERMINACIÓN DE LÍMITES PARA LOS TIPOS DE FLUJOS QUE SE PRESENTAN EN LA RÁPIDA ESCALONADA DE RELACIÓN $h/l = 0.10$

Los límites superior e inferior para cada régimen de flujo en esta rápida escalonada serán calculados para los parámetros de diseño del prototipo que son altura del escalón (h) = 0.25 [m], longitud del escalón (l) = 2.5 [m] y caudales de prototipo (Q_p).

3.3.2 LÍMITE INFERIOR DE LA ALTURA DEL ESCALÓN PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN

Aplicando la ecuación 2.1.2 del capítulo 4, donde se indico la referencia:

$$\left(\frac{h}{Y_c}\right) = 0.57(\operatorname{tg} \theta)^3 + 1.3 \quad \text{En el intervalo: } 0.1 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 1.43$$

Donde, θ : pendiente de la rápida escalonada en grados.

Reemplazamos los datos:

$$\left(\frac{h}{0.414}\right) = 0.57(0.1)^3 + 1.3 = 1.301$$

A partir de:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{1}{1.2}\right)^2}{9.81}}$$

$$Y_c = 0.414 \text{ [m]}$$

Donde Y_c es el calado crítico determinado para el caudal mínimo de diseño de 1 [m³/s] y para el ancho del canal de 1.20 [m]

Entonces:

$$h_{\text{mín}} = 1.301 * 0.414$$

$$h_{\text{mín}} = 0.538 \text{ [m]}$$

Lo que quiere decir que para la formación del régimen escalón a escalón, la altura de la grada debería ser mayor a 0.538 [m], pero en el prototipo la altura es de 0.25 [m], por lo que teóricamente este tipo de flujo no ocurrirá en esta rápida.

Ahora, el cálculo debe centrarse en obtener el valor del caudal máximo para que con la altura de escalón de 0.25 [m], se presente el tipo de régimen deseado:

$$\left(\frac{0.25}{Y_c}\right) = 1.301$$

De donde:

$$Y_c = \frac{0.25}{1.301} = 0.1922$$

$$Q = q \times 1.20$$

$$Q = \sqrt{(Y_c^3 \cdot 9.81)} \times 1.20 = \sqrt{(0.1922^3 \cdot 9.81)} \times 1.20$$

$$Q = 0.317 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Este valor demuestra teóricamente que con la altura de la grada $h=0.25$ m, el flujo grada a grada se obtendrá para caudales menores a $0.317 \text{ m}^3\text{/s}$.

3.3.3 LÍMITE INFERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO EN TRANSICION:

Utilizando la Ecuación 2.1.4 del capítulo 2, donde se indico la referencia:

$$\frac{Y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \frac{h}{l} \quad \text{Para:} \quad 0 < \frac{h}{l} < 1.7$$

$$\frac{Y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \cdot 0.1$$

$$\frac{Y_c}{h} > 0.8793$$

Donde:

$$h = \text{altura de la grada en Prototipo} = 0.03125 \cdot 8$$

Entonces:

$$Y_c > 0.8793 \cdot 0.25 > 0.22 \text{ m.}$$

Por lo tanto:

$$Q = q \cdot 1.2$$

$$Q > 0.388 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.3.4 LÍMITE SUPERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO EN TRANSICIÓN

Utilizando la Ecuación 2.1.5 del capítulo 4, donde se indico la referencia:

$$\frac{Y_c}{h} < \frac{0.9821}{\left(\frac{h}{l} + 0.388\right)^{0.384}} \quad \text{Para: } 0 < \frac{h}{l} < 1.5$$

$$\frac{Y_c}{h} < \frac{0.9821}{(0.1 + 0.388)^{0.384}}$$

$$\frac{Y_c}{h} > 1.294$$

Donde:

$$h = \text{altura de la grada del Prototipo} = 0.03125 \cdot 8 = 0.25$$

Entonces:

$$Y_c > 1.294 \cdot 0.25 > 0.3235 \text{ m.}$$

Por otro lado:

$$Q = q \cdot 1.2$$

$$Q = \sqrt{0.3235^3 \cdot 9.81} \cdot 1.2$$

$$Q < 0.69 \text{ m}^3/\text{s} \approx 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$$

De los dos resultados de caudales límites inferior y superior para el flujo en transición se desprende que para $h = 0.25$ se tendría flujo con régimen en transición para caudales $0.39 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que se podrá comprobar a su respectiva escala durante el proceso experimental.

3.3.5 LÍMITE SUPERIOR DE LA ALTURA DEL ESCALÓN PARA LA FORMACIÓN DEL FLUJO RASANTE

Aplicando la ecuación:

$$\frac{h}{y_c} = 1.16 \cdot (\tan \theta)^{0.165}$$

$$\text{Para } 0.1 \leq \tan \theta \leq 1.43$$

$$\frac{h}{1.92} = 1.16 \cdot (0.10)^{0.165} = 0.793$$

A partir de:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{10}{1.2}\right)^2}{9.81}}$$

$$Y_c = 1.92 \text{ [m]}$$

Donde Y_c es el calado crítico determinado para el caudal máximo de diseño que es de $10 \text{ [m}^3/\text{s]}$ y el ancho del canal de 1.20 [m]

$$h_{\text{máx}} = 1.92 \times 0.793 = 1.52 \text{ [m]}$$

Como la altura del escalón es menor que 1.52 m ($h = 0.25 \text{ m}$), entonces para el caudal de $10 \text{ [m}^3/\text{s]}$ vamos a tener flujo rasante, y para caudales inferiores a este hasta $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ como lo indicado en el cálculo del numeral anterior también (límite superior del flujo con régimen en transición).

3.3.6 LÍMITE INFERIOR DEL CAUDAL PARA LA FORMACIÓN DE FLUJO RASANTE

Utilizando la Ecuación 2.1.6 del capítulo 2, donde se indicó la referencia:

$$\frac{Y_c}{h} > 1.057 - 0.465 \frac{h}{l}$$

$$\frac{Y_c}{h} > 1.057 - 0.465 * 0.1 > 1.0105$$

$$\frac{Y_c}{h} > 1.0105$$

Donde:

$$h = \text{altura de la grada del Prototipo} = 0.03125 * 8 = 0.25$$

Entonces:

$$Y_c > 1.0105 * 0.25$$

$$Y_c > 0.2526$$

Por lo tanto:

$$Q = q * 1.2$$

$$Q = \sqrt{0.2526^3 \cdot 9.81} \cdot 1.2$$

$$Q = 0.48 \text{ m}^3/\text{s}$$

De lo cálculos realizados para determinar los limites de caudales, se resume:

TIPO DE FLUJO	CAUDAL (m ³ /s)
Escalón a Escalón	Q < 0.317
Transición	0.388 < Q < 0.7
Rasante	Q > 0.48

Tabla 3.3.1 Tipos de flujo para $h/l = 0.10$, Altura del escalón: $h = 0.25$ cm, ancho del canal: $b = 1.20$ m.

3.4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.4.1 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Posterior a obtener los nuevos datos en el laboratorio, con sus respectivas observaciones sobre el proceso experimental realizado sobre la rápida escalonada, y para efectos de cálculo de la carga de energía disipada se agrupa los regímenes de flujo observados, en dos tipos: Flujo Grada a Grada para los caudales de $1\text{ m}^3/\text{s}$ a $3\text{ m}^3/\text{s}$ y Flujo Rasante desde $4\text{ m}^3/\text{s}$ hasta $10\text{ m}^3/\text{s}$. Como ya se mencionó, no se dispone de ecuaciones analíticas o experimentales que permitan el análisis del flujo en transición, que también se presenta en esta estructura.

Como se indicó en el numeral 2.7.1 del capítulo 2, para $h/l=0.10$, $h=0.50$ [m] y seis escalones, para el estudio de la misma estructura pero con doce escalones, si bien el flujo en transición se calculó entre $0.4\text{ m}^3/\text{s}$ y $0.7\text{ m}^3/\text{s}$, el de grada a grada para $Q < 0.32\text{ m}^3/\text{s}$, y el rasante para $Q > 0.48\text{ m}^3/\text{s}$, en la práctica, de acuerdo a lo observado, el desarrollo del flujo rasante sin cavidad de aire al pie de la grada y sin mayores ondulaciones en la superficie se logró para caudales superiores a los $4\text{ m}^3/\text{s}$, en cambio en los menores a este, el flujo fue con características de estructura caótica y similar al flujo grada a grada, por lo que se decidió agruparlo en este régimen de flujo los valores de caudales menores a $4\text{ m}^3/\text{s}$, a objeto de aplicar las ecuaciones 2.2.3 y 2.2.4 del capítulo 2.

Por otro lado, como se indicó en el capítulo 4, la diferencia entre los límites de rango de caudales para los regímenes de flujo también se debe a la aplicación de las ecuaciones en el rango de h/l .

Con esta aclaración se muestra a continuación ejemplos de los cálculos realizados para la estructura de doce gradas. El procesamiento de los datos para determinar: velocidades, perfiles de flujo, distribución de cargas de presión, coeficiente de rugosidad de Manning, coeficiente de fricción de

Darcy-Weisbach y porcentaje de disipación de energía, es el mismo que para la estructura de seis escalones.

3.4.1.1 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO GRADA A GRADA.

Como ya se ha indicado y justificado, para efectos del procesamiento de datos y determinación de perfiles de flujo, velocidades y porcentaje de disipación de energía a lo largo de la rápida escalonada, se agrupan los tres primeros caudales ensayados como flujo grada a grada.

A continuación se desarrolla un ejemplo de cálculo para el caudal $Q_p = 2.11$ [m^3/s], cuyo procedimiento para determinar velocidades y disipación de energía es similar para los caudales 1 y 3 [m^3/s].

3.4.1.1.1 PERFIL DE FLUJO

El Perfil de Flujo se obtiene con la ayuda del Limnómetro, deslizando a lo largo del modelo y tomando medidas transversales del flujo en ambos extremos y en el centro (Figura 3.4.1). Los datos obtenidos para este caudal se detallan en la Tabla 3.4.1.a.

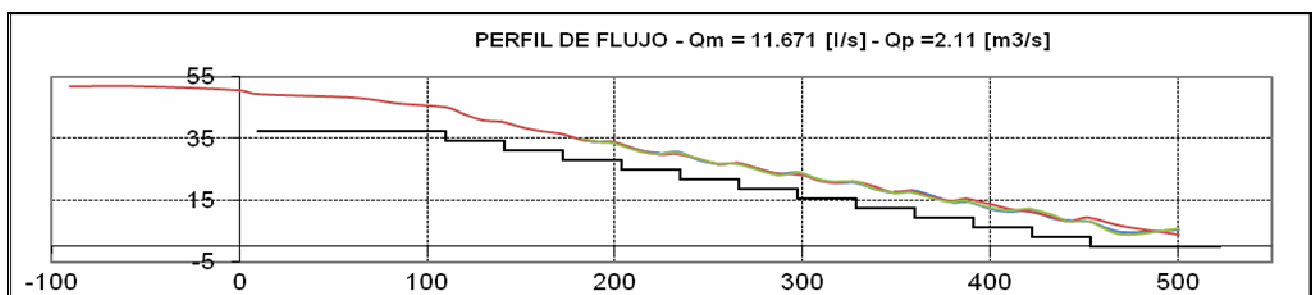


Figura 3.4.1. Perfil de Flujo para $Q_m = 11.67$ [l/s] - $Q_p = 2.11$ [m^3/s]

Elemento	Nº	x [cm]	y fondo [cm]	yr(izq) [cm]	yr(cent) [cm]	yr(der) [cm]	h [cm]	h [m]
			promedio	z [cm] =	z [cm] =	z [cm] =	Calado	Calado
Transición	1	-90.00	1.94		53.8		51.860	0.519
	2	-45.00	1.94		53.7		51.760	0.518
	3	0.00	1.94		52.59		50.650	0.507
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	39.86		51.15		11.290	0.113
Tramo aprox. (1.0 m)	5	60.00	39.74		50.12		10.380	0.104
	6	85.00	39.74		48.38		8.640	0.086
	7	110.00	39.74		46.95		7.210	0.072
Grada 1	8	120.00	36.62		44.78		8.165	0.082
	9	130.00	36.62		42.88		6.265	0.063
	10	140.00	36.62		42.2		5.585	0.056
Grada 2	11	151.25	33.38		40.5		7.120	0.071
	12	161.25	33.38		39.23		5.850	0.058
	13	171.25	33.38		38.48		5.100	0.051
Grada 3	14	182.50	30.26	36.7	36.64	37.1	6.558	0.066
	15	192.50	30.26	35.93	35.86	35.85	5.625	0.056
	16	199.50	30.26	35.7	35.87	35.45	5.418	0.054
Grada 4	17	213.75	27.04	33.1	33.12	32.8	5.967	0.060
	18	223.75	27.04	32.12	31.81	31.79	4.867	0.049
	19	233.75	27.04	32.48	31.98	32.34	5.227	0.052
Grada 5	20	245.00	23.92	29.9	30.16	30.45	6.255	0.063
	21	255.00	23.92	28.7	28.63	28.8	4.795	0.048
	22	265.00	23.92	28.84	29.04	28.77	4.968	0.050
Grada 6	23	276.25	20.79	27.17	27.22	26.6	6.207	0.062
	24	286.25	20.79	25.6	25.55	25.15	4.643	0.046
	25	296.25	20.79	26	25.3	25.8	4.910	0.049
Grada 7	26	301.50	17.67	25.3	24.86	25.4	7.522	0.075
	27	308.50	17.67	23.49	23.44	23.63	5.855	0.059
	28	318.50	17.67	22.5	22.7	22.99	5.065	0.051
	29	328.50	17.67	22.58	23	22.8	5.128	0.051
Grada 8	30	338.75	14.68	20.52	21.3	20.6	6.127	0.061
	31	348.75	14.68	19.36	19.5	19.22	4.680	0.047
	32	358.75	14.68	20	19.7	19.54	5.067	0.051
Grada 9	33	370.00	11.56	18.28	17.8	17.5	6.305	0.063
	34	380.00	11.56	16.3	16.78	16.46	4.958	0.050
	35	387.00	11.56	16.51	17.44	16.8	5.362	0.054
Grada 10	36	401.25	8.49	14.11	15.6	14.21	6.150	0.062
	37	411.25	8.49	13.25	14.1	13.4	5.093	0.051
	38	421.25	8.49	13.78	13.17	14.1	5.193	0.052
Grada 11	39	432.50	5.37	11.1	11.7	12.22	6.308	0.063
	40	442.50	5.37	10.3	10.24	10	4.815	0.048
	41	452.50	5.37	9.8	11.12	9.9	4.908	0.049
Grada 12	42	470.50	1.83	6.39	8.51	5.8	5.070	0.051
	43	500.50	1.83	7.1	5.6	7.47	4.893	0.049

Tabla 3.4.1.a. Calados medidos y promedio en las secciones transversales a lo largo de la rápida

Para efectos de cálculo se toma como ejemplo los valores obtenidos para $x = 3.80$ m. La totalidad de los cálculos se encuentra en el Anexo 3.a.

$$y \text{ (izq)} = 0.163 \text{ m}$$

$$y \text{ (cent)} = 0.1678 \text{ m}$$

$$y \text{ (der)} = 0.1646 \text{ m}$$

$$y \text{ fondo} = 0.1156 \text{ m}$$

Entonces: $h = 0.05$ [m]

3.4.1.1.2 VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO (H):

(TABLA 3.4.2.a)

Elemento	Nº	x [cm]	h [m]	A [m ²]	V [m/s]
			Calado		
Transición	1	-90.00	0.519	0.078	0.150
	2	-45.00	0.518		
	3	0.00	0.507		
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	0.113		
Tramo aprox. (1.0 m)	5	60.00	0.104		
	6	85.00	0.086	0.013	0.901
	7	110.00	0.072	0.011	1.079
Grada 1	8	120.00	0.082		
	9	130.00	0.063	0.009	1.242
	10	140.00	0.056		
Grada 2	11	151.25	0.071		
	12	161.25	0.058	0.009	1.330
	13	171.25	0.051		
Grada 3	14	182.50	0.066		
	15	192.50	0.056	0.008	1.383
	16	199.50	0.054		
Grada 4	17	213.75	0.060		
	18	223.75	0.049	0.007	1.599
	19	233.75	0.052		
Grada 5	20	245.00	0.063		
	21	255.00	0.048	0.007	1.623
	22	265.00	0.050		
Grada 6	23	276.25	0.062		
	24	286.25	0.046	0.007	1.676
	25	296.25	0.049		
Grada 7	26	301.50	0.075		

	27	308.50	0.059		
	28	318.50	0.051	0.008	1.536
	29	328.50	0.051		
Grada 8	30	338.75	0.061		
	31	348.75	0.047	0.007	1.663
	32	358.75	0.051		
Grada 9	33	370.00	0.063		
	34	380.00	0.050	0.007	1.569
	35	387.00	0.054		
Grada 10	36	401.25	0.062		
	37	411.25	0.051	0.008	1.528
	38	421.25	0.052		
Grada 11	39	432.50	0.063		
	40	442.50	0.048	0.007	1.616
	41	452.50	0.049	0.007	1.585
Grada 12	42	470.50	0.051	0.008	1.535
	43	500.50	0.049		

Tabla 3.4.2.a. Velocidades medias calculadas utilizando el calado promedio en las secciones transversales a lo largo de la rápida

Para determinar la velocidad se aplican las siguientes fórmulas:

$$\text{Velocidad media: } V = \frac{Q}{A} \quad [m/s]$$

$$\text{Área hidráulica } A = h \cdot B \quad [m^2]$$

Entonces:

Como ejemplo de cálculo se utilizarán los valores del punto $x = 380$ cm, que es el mismo que ha sido analizado en los cálculos anteriores. Los cálculos para todos los valores de “x” y para todos los caudales se encuentran en el Anexo 3.a.

$$x = 380 \text{ cm}$$

$$Q_m = 0.011671 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$B = 0.15 \text{ m (ancho del canal modelo)}$$

$$h = 0.05 \text{ m (calado)}$$

$$\text{Entonces: } V = 1.569 \text{ [m/s]}$$

3.4.1.1.3 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.

El grado de disipación de energía que se presenta en la estructura, será calculado mediante la ecuación de Bernoulli aplicada a una línea de corriente que va por el eje del fondo del canal escalonado, siendo la sección inicial la (0) y la final la (12) de la figura 3.4.2

Los valores calculados se indican en la tabla 3.4.3.a y se presenta un ejemplo de cálculo entre la sección (0) y la sección (12)

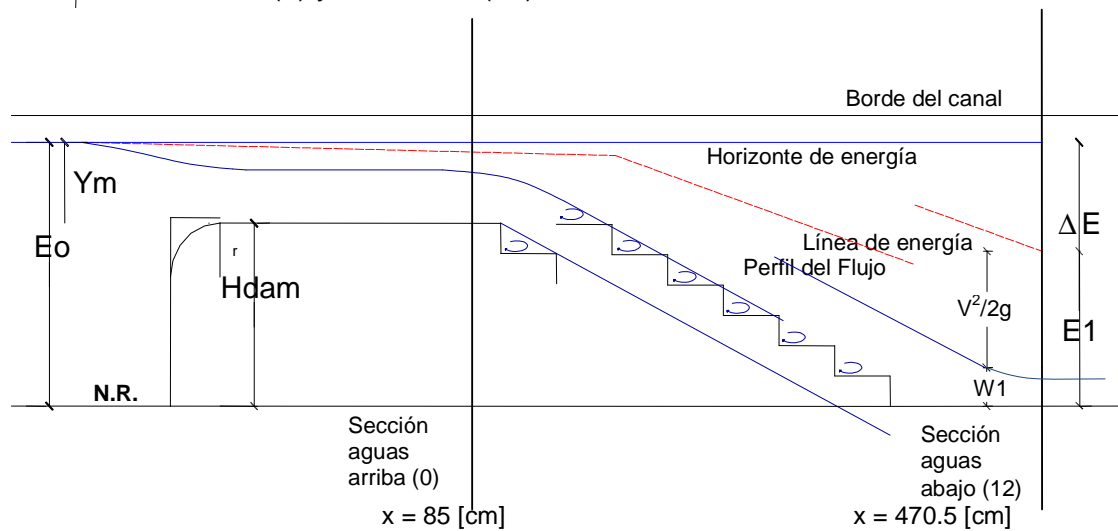


Figura 3.4.2

Elemento	x [cm]	h [m]	V [m/s]	z [m]	V ² /2g [m]	Energía Remanente	
		Calado					
Transición	-90.00	0.519	0.150	0	0.00115		0.520
	-45.00	0.518					
	0.00	0.507					
Curva (r = 10 cm)	10.00	0.113					
Tramo aprox. (1.0 m)	60.00	0.104					
	85.00	0.086	0.901	0.375	0.04133	E0	0.503
	110.00	0.072	1.079				
Grada 1	120.00	0.082					
	130.00	0.063	1.242	0.34375	0.07861	E1	0.485
	140.00	0.056					
Grada 2	151.25	0.071					
	161.25	0.058	1.330	0.3125	0.09016	E2	0.461
	171.25	0.051					
Grada 3	182.50	0.066					
	192.50	0.056	1.383	0.28125	0.09752	E3	0.435
	199.50	0.054					
Grada 4	213.75	0.060					
	223.75	0.049	1.599	0.25	0.13028	E4	0.429
	233.75	0.052					
Grada 5	245.00	0.063					
	255.00	0.048	1.623	0.21875	0.1342	E5	0.401
	265.00	0.050					
Grada 6	276.25	0.062					
	286.25	0.046	1.676	0.1875	0.14311	E6	0.393
	296.25	0.049					
Grada 7	301.50	0.075					
	308.50	0.059					
	318.50	0.051	1.536	0.15625	0.12028	E7	0.327
	328.50	0.051					
Grada 8	338.75	0.061					
	348.75	0.047	1.663	0.125	0.14088	E8	0.313
	358.75	0.051					
Grada 9	370.00	0.063					
	380.00	0.050	1.569	0.09375	0.12551	E9	0.269
	387.00	0.054					
Grada 10	401.25	0.062					
	411.25	0.051	1.528	0.0625	0.11894	E10	0.232
	421.25	0.052					
	432.50	0.063					
	442.50	0.048	1.616	0.03125	0.13309	E11	0.212
	452.50	0.049	1.585				
Grada 12	470.50	0.051	1.535	0	0.12004	E12	0.169
	500.50	0.049					

Tabla 3.4.3.a. Calados de agua, posición, velocidad y energía calculada (Anexo 3.a)

Sección (0), localizado en el punto $x = 85$ [cm], sobre el canal de aproximación:

Donde:

$$V_o^2 / 2g = 0.04133 \text{ [m]}$$

$$h_o = 0.086 \text{ [m]}$$

$$Z_o = 0.375 \text{ [m]}$$

Reemplazando:

$$E_o = 0.375 + 0.086 + 0.0413$$

$$E_o = 0.503$$

Sección (12), aguas abajo del pie de la rápida.

Donde:

$$h_6 = 0.051$$

$$\frac{V_6^2}{2g} = 0.1204$$

$$Z_{61} = 0 \rightarrow \text{tramo } final$$

Reemplazando:

$$E_{12} = 0.169 \text{ m}$$

$$E_6 = 0.051 + 0.1204$$

Entonces el porcentaje de energía disipada es:

$$\Delta E = \left(\frac{0.503 - 0.169}{0.503} \right)$$

$$\Delta E = 66.40\%$$

En la tabla 3.4.3.a se indican además los valores de la carga energética remanente en cada grada tomando las secciones hidráulicas en las abscisas

“x” indicadas, donde se observó que el flujo tiene líneas de corriente paralelas al fondo.

3.4.1.1.4 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN 2.2.3 DEL CAPÍTULO 2

Donde:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\frac{3}{2 * \sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h_{escalón}}{y_c} + \frac{3}{2}}}$$

$$h_{escalón} = 0.0625 \text{ m.}$$

$$Y_c = 0.085 \text{ m.}$$

Reemplazando:

$$\lambda = 0.58$$

Donde:

$$h_{vertedor} = 0.375 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 0.65$$

$$\Delta E [\%] = 65.19 \%$$

3.4.1.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO RASANTE

El ejemplo de cálculo, se realizará para un caudal prototipo de 7 [m³/s], el cual se aplicará de manera similar a los ensayos realizados para los caudales en régimen rasante, indicados anteriormente.

3.4.1.2.1 PERFIL DE FLUJO

El perfil de flujo será determinado obteniendo el calado de agua promedio a partir de las mediciones realizadas con el limnómetro. (Anexo 3.a)

Elemento	Nº	x [cm]	y fondo [cm]	yr(cent) [cm]	h [cm]	h [m]
					Calado	Calado
Transición	1	-90,00	1,94	71,47	69,53	0,695
	2	-45,00	1,94	70,76	68,82	0,688
	3	0,00	1,94	67,84	65,9	0,659
Curva (r = 10 cm.)	4	10,00	39,86	65,93	26,07	0,261
Canal aprox. (1.0 m)	5	60,00	39,74	59,07	19,33	0,193
	6	85,00	39,74	57,82	18,08	0,181
	7	110,00	39,74	56,33	16,59	0,166
Grada 1	8	120,00	36,62	54,93	18,32	0,183
	9	130,00	36,62	53,31	16,70	0,167
	10	140,00	36,62	52,09	15,48	0,155
Grada 2	11	151,25	33,38	50,17	16,79	0,168
	12	161,25	33,38	48,5	15,12	0,151
	13	171,25	33,38	47,25	13,87	0,139
Grada 3	14	182,50	30,26	46,29	16,04	0,160
	15	192,50	30,26	44,93	14,68	0,147
	16	199,50	30,26	43,94	13,69	0,137
Grada 4	17	213,75	27,04	42,21	15,17	0,152
	18	223,75	27,04	40,79	13,75	0,138
	19	233,75	27,04	39,62	12,58	0,126
Grada 5	20	245,00	23,92	38,4	14,49	0,145
	21	255,00	23,92	37,29	13,38	0,134
	22	265,00	23,92	36,26	12,35	0,123
Grada 6	23	276,25	20,79	35,09	14,30	0,143
	24	286,25	20,79	33,89	13,10	0,131
	25	296,25	20,79	32,82	12,03	0,120
Grada 7	26	301,50	17,67	32,42	14,76	0,148
	27	308,50	17,67	31,52	13,86	0,139
	28	318,50	17,67	30,41	12,75	0,127
	29	328,50	17,67	29,49	11,83	0,118
Grada 8	30	338,75	14,68	28,3	13,62	0,136
	31	348,75	14,68	27,42	12,74	0,127
	32	358,75	14,68	26,39	11,71	0,117
Grada 9	33	370,00	11,56	25,08	13,53	0,135
	34	380,00	11,56	23,85	12,30	0,123
	35	387,00	11,56	23,03	11,48	0,115
Grada 10	36	401,25	8,49	21,92	13,43	0,134
	37	411,25	8,49	21,00	12,51	0,125
	38	421,25	8,49	20,01	11,52	0,115
Grada 11	39	432,50	5,37	18,69	13,33	0,133
	40	442,50	5,37	17,45	12,09	0,121
	41	452,50	5,37	16,38	11,02	0,110
Tramo de salida	42	470,50	1,83	14,53	12,70	0,127
	43	500,50	1,83	12,95	11,12	0,111

Tabla 3.4.1.b Calados medidos y promedio ($Q_p = 7.05 \text{ [m}^3/\text{s]})$ en las secciones transversales a lo largo de la rápida (Anexo 3.a)

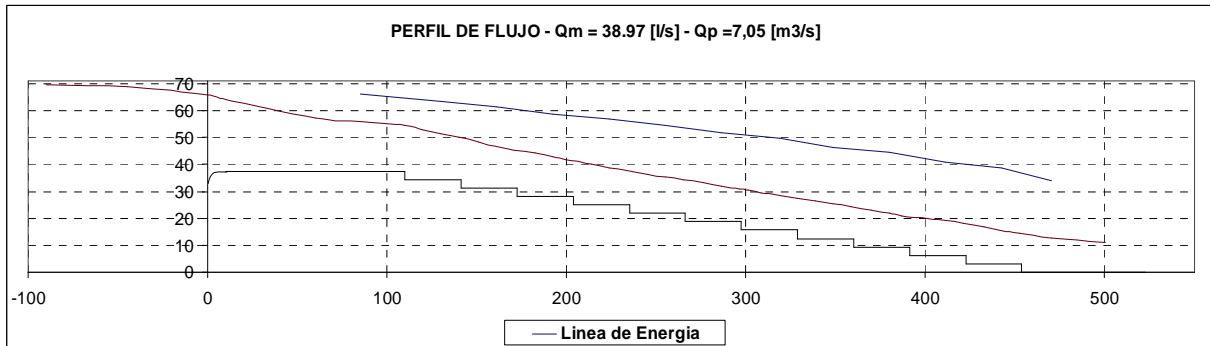


Figura 3.4.3 Perfil de Flujo para $Q_m = 38.7 \text{ [l/s]} - Q_p = 7.05 \text{ [m}^3\text{/s]}$ (Anexo 3.a)

Donde:

Y_{cent} : calados medidos en cada sección transversal del flujo (eje "z").

h = Calado promedio en cada sección transversal analizada de la rápida.

$$h = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i}{3} - y_{\text{fondo}}$$

► Para el ejemplo se selecciona la abscisa: $x = 347.5 \text{ cm}$

$$Y_{\text{cent}} = 27.42 \text{ cm}$$

$$Y_{\text{fondo}} = 14.68 \text{ cm}$$

Entonces: $h = 12.74 \text{ cm}$

3.4.1.2.2 VELOCIDADES CALCULADAS CON EL CALADO PROMEDIO.

(Anexo 3.a)

La Velocidad se obtiene a partir del área hidráulica (A (cm^2)) de la sección y esta a partir del calado de agua h (m) y del ancho del canal b (m).

Elemento	N°	x [cm]	y fondo [cm]	Y [cm]	h [cm]	h [m]	A [m ²]	V [m/s]
			promedio	m = 0.1	calado	calado		
Canal Aprox.	1	85,00	39,74	57,82	18,08	0,181	0,0271	1,437
Grada 1	1	130,00	36,62	53,31	16,69	0,167	0,0250	1,557
Grada 2	2	161,25	33,38	48,5	15,12	0,151	0,0227	1,718
Grada 3	3	192,50	30,26	44,93	14,67	0,147	0,0220	1,771
Grada 4	4	223,75	27,04	40,79	13,75	0,138	0,0206	1,890
Grada 5	5	255,00	23,92	37,29	13,37	0,134	0,0201	1,943
Grada 6	6	286,25	20,79	33,89	13,10	0,131	0,0197	1,983
Grada 7	7	318,50	17,67	30,41	12,74	0,127	0,0191	2,039
Grada 8	8	348,75	14,68	27,42	12,74	0,127	0,0191	2,039
Grada 9	9	380,00	11,56	23,85	12,29	0,123	0,0184	2,114
Grada 10	10	411,25	8,49	21	12,51	0,125	0,0188	2,077
Grada 11	11	442,50	5,37	17,45	12,08	0,121	0,0181	2,151
Tramo salida (1.0 m)	12	470,50	1,83	14,53	12,70	0,127	0,0191	2,046

Tabla 3.4.3.b Velocidades medias obtenidas con el calado promedio

$$\text{Velocidad media: } V = \frac{Q}{A} [\text{m/s}]$$

$$\text{Área hidráulica: } A = h \cdot b [\text{m}^2]$$

Luego:

► Se escoge el valor: $x = 347.5$ cm

$$Q_p = 7 [\text{m}^3/\text{s}] \rightarrow Q_m = 0.0387$$

$$b = 0.15 \text{ m}$$

$$h = 0.127 \text{ m}$$

Entonces:

$$A = 0.127 \times 0.15 = 0.0191 \text{ m}^2$$

$$V = 2.039 [\text{m/s}]$$

3.4.1.2.3 CARGAS PIEZOMÉTRICAS.

Las cargas piezométricas en las gradas 3, 7 y 4 para $Q_p = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$, (Anexo 3.c.2) son:

		Carga Piezométrica			
		Modelo		Prototipo	
		[cm]	[m]	[m]	
Grada 3	Cara Vertical	P1	11,4	0,114	0,912
	Cara Horizontal	P2	16,5	0,165	1,320
		P3	17,3	0,173	1,384
		P4	13,3	0,133	1,064
Grada 7	Cara Vertical	P5	8,2	0,082	0,656
	Cara Horizontal	P6	8,6	0,086	0,688
		P7	16,2	0,162	1,296
		P8	15	0,150	1,200
Grada 9	Cara Vertical	P9	6,1	0,061	0,488
	Cara Horizontal	P10	15,8	0,158	1,264
		P11	16,5	0,165	1,320
		P12	12	0,120	0,960
Tramo de Salida	Cara Horizontal	P13	20,2	0,202	1,616
		P14	12	0,120	0,960

Tabla 3.4.4.b Cargas de presiones medidas en cada piezómetro.

3.4.1.2.4 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.

El grado de disipación de energía que se presenta en la estructura, será calculado mediante la ecuación de Bernoulli aplicada a la lámina de corriente de agua.

Elemento	N°	x [cm]	y fondo [cm] promedio	Y [cm]	h [cm]	h [m]	A [m ²]	V [m/s]	z [m]	V ² /2g [m]	Energía	
				m = 0.1	calado	calado					E	E
Canal Aprox.	1	85,00	39,74	57,82	18,08	0,181	0,0271	1,437	0,375	0,105	E0	0,661
Grada 1	1	130,00	36,62	53,31	16,69	0,167	0,0250	1,557	0,344	0,124	E1	0,634
Grada 2	2	161,25	33,38	48,50	15,12	0,151	0,0227	1,718	0,313	0,151	E2	0,614
Grada 3	3	192,50	30,26	44,93	14,67	0,147	0,0220	1,771	0,281	0,160	E3	0,588
Grada 4	4	223,75	27,04	40,79	13,75	0,138	0,0206	1,890	0,250	0,182	E4	0,569
Grada 5	5	255,00	23,92	37,29	13,37	0,134	0,0201	1,943	0,219	0,192	E5	0,545
Grada 6	6	286,25	20,79	33,89	13,10	0,131	0,0197	1,983	0,188	0,200	E6	0,519
Grada 7	7	318,50	17,67	30,41	12,74	0,127	0,0191	2,039	0,156	0,212	E7	0,496
Grada 8	8	348,75	14,68	27,42	12,74	0,127	0,0191	2,039	0,125	0,212	E8	0,464
Grada 9	9	380,00	11,56	23,85	12,29	0,123	0,0184	2,114	0,094	0,228	E9	0,444
Grada 10	10	411,25	8,49	21,00	12,51	0,125	0,0188	2,077	0,063	0,220	E10	0,407
Grada 11	11	442,50	5,37	17,45	12,08	0,121	0,0181	2,151	0,031	0,236	E11	0,388
Tramo salida	12	470,50	1,83	14,53	12,70	0,127	0,0191	2,046	0,000	0,213	E12	0,340

Tabla 3.4.5.b Disipación de Energía con la ecuación de Bernoulli para $Q_p = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$. (Anexo 3.a)

- Sección en el Canal de Aproximación a la rápida (0):

$$E_o = z_o + h_o + \frac{V_o^2}{2g}$$

E_o = carga Energética en la sección (0)

$$\frac{V_o^2}{2g} = \text{Carga de velocidad en la sección (0)}$$

$$\frac{V_o^2}{2g} = \frac{1.419^2}{2 * 9.81} = 0.105 \text{ m}$$

h_o = calado de agua

$$h_o = 0.181 \text{ m}$$

Z_o = Carga de posición en la sección (0)

$$Z_o = 0.375$$

Reemplazando:

$$E_o = 0.375 + 0.181 + 0.105$$

$$E_o = 0.661$$

- Sección (12), aguas abajo del pie de la rápida.

$$E_{12} = z_{12} + h_{12} + \frac{V_{12}^2}{2g}$$

Donde:

h_{12} = calado de agua en la sección (12)

$$h_{12} = 0.127$$

$$\frac{V_{12}^2}{2g} = \text{Carga de velocidad en la sección (12)}$$

$$\frac{V_{12}^2}{2g} = 0.213 \text{ m}$$

Z_{12} = Carga de posición en la sección (12)

$$Z_{12} = 0 \rightarrow \text{tramo final}$$

Reemplazando:

$$E_{12} = 0 + 0.127 + 0.213$$

$$E_{12} = 0.340$$

Por lo tanto:

$$\Delta E = \left(\frac{E_0 - E_{12}}{E_0} \right) \cdot 100\%$$

$$\Delta E = \left(\frac{0.661 - 0.340}{0.661} \right) \cdot 100$$

$$\Delta E = 48.56\%$$

3.4.1.2.5 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA APLICANDO LA ECUACIÓN 2.2.5 INDICADA EN EL CAPITULO 2.

$$Q_p = 7 \text{ [m}^3\text{/s]} \rightarrow Q_m = 0.0387 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$H_{\text{dam}} = 0.375 \text{ m}$$

$$\theta = 5.71^\circ$$

$$Y_c = 0.19 \text{ [m]}$$

$h_{\text{pie}} = 0.112 \text{ m}$ (Carga piezométrica considerando flujo uniforme en el pie de la rápida)

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Velocidad calculada: 2.05 m/s

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot Y_p \cdot \text{sen}\theta}{V^2} \quad \text{Ec. (2.2.6)}$$

Reemplazando:

$$f_{\text{pie}} (\text{calculado}) = 0.24$$

Entonces:

$$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8\text{Sen}\theta}\right)^{\frac{1}{3}} \text{Cos}\theta + \frac{1}{2}\left(\frac{f}{8\text{Sen}\theta}\right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{H_{dam}}{Y_c} + \frac{3}{2}} \quad \text{Ec. (2.2.5)}$$

$$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}} \cdot 100 = \Delta E$$

Reemplazando los valores anteriores tenemos que el grado de disipación de energía es:

$$\Delta E \text{ (Ec. Bernoulli) } = 48.56\%$$

$$\Delta E \text{ (Ecuación 2.13) } = 48.55\%$$

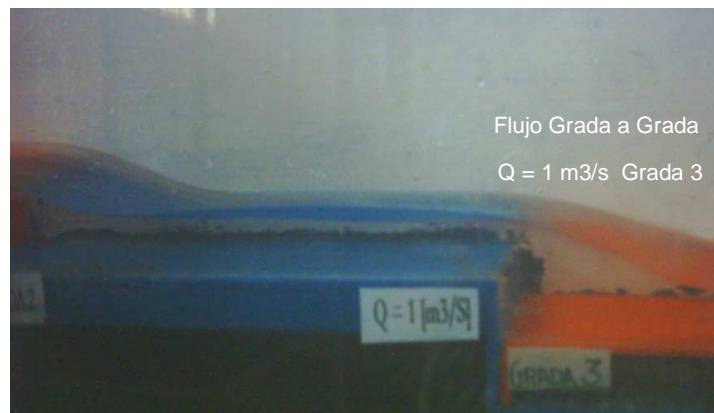
3.4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS DATOS PROCESADOS.

3.4.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA.

3.4.2.1.1 PERFIL DE FLUJO.

Una vez obtenidos los resultados para los caudales ensayados que presentan régimen grada a grada se procede con su análisis y discusión. (Anexo 3.a)

El flujo grada a grada que se presenta en este modelo se forma desde el caudal inicial de 1.04m³/s (Yc/h = 1.69m) hasta 3.03m³/s (Yc/h = 3.46m), (Fotografía 3.5), siendo las limitaciones similares a las del modelo de 6 gradas.



Fotografía 3.5

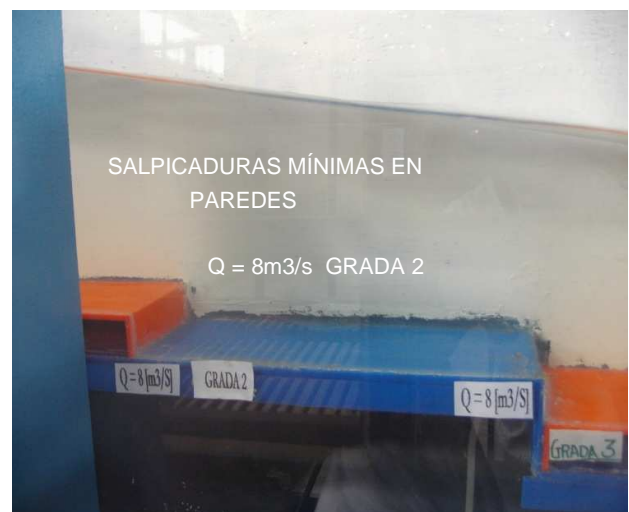
Para el caudal de $1.04\text{m}^3/\text{s}$ el flujo es gradualmente variado en el tramo de aproximación hasta la caída en la grada 1, las cavidades llenas se presentan hasta la cuarta grada, en la unión de la cara vertical y horizontal de la grada cinco se produce el primer vórtice recirculante por la relación $h/l = 0.1$, el cruce de las líneas de flujo provoca el choque de este con las paredes del modelo formando las primeras crestas en paredes y estas la formación de crestas centrales con alturas de hasta 4 cm.(Fotografía 3.5)

Al aumentar el caudal, los vórtices recirculantes se forman en las gradas del tramo final de la estructura, así para el caudal $2.11\text{m}^3/\text{s}$ se forma al inicio de la grada 10, y para el caudal $3.03\text{m}^3/\text{s}$ desaparecen totalmente, todas las cavidades están llenas, de la misma manera se presentan crestas centrales y laterales (Fotografía 3.6).

La presencia de salpicaduras es notoria desde la primera medición, de igual manera su formación varía a medida que aumenta el caudal, para $Q = 1.04\text{m}^3/\text{s}$ las salpicaduras inician en la grada 3, para $Q = 2.11\text{m}^3/\text{s}$ en la grada 4 y para $Q = 3.03\text{m}^3/\text{s}$ en la grada 6, estas salpicaduras son resultado de la ruptura del flujo que es generada por la formación de crestas en paredes y en el centro de la grada. Para los caudales más altos, el flujo se uniformiza y las salpicaduras tienden a desaparecer. (Fotografía 3.7)



Fotografía 3.6



Fotografía 3.7

3.4.2.1.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Después de recopilar y procesar los datos obtenidos en la fase experimental se determinan los siguientes valores de disipación de energía para ΔX entre $x_o = 85$ cm (canal de aproximación) y $x_f = 470.5$ cm (tramo de salida) (tabla 3.4.3.a). Para este análisis se utilizaron las ecuaciones 2.2.3, y 2.2.4 (Anexo 3.b).

Qm	Qm	Qp	q _{unitario}	yc	Emín	λ	$\frac{\Delta H}{H_{m\acute{a}x}}$	ΔE [%]	yc / h	Régimen de Flujo
[lt/s]	[m3/s]	[m3/s]		[m]	[m]					
5,719	0,0057	1,04	0,038	0,053	0,079	0,56	0,75	75,14	1,69	Escalón a Escalón
11,671	0,0117	2,11	0,078	0,085	0,128	0,58	0,65	65,19	2,72	Escalón a Escalón
16,719	0,0167	3,03	0,111	0,108	0,162	0,59	0,59	59,17	3,46	Escalón a Escalón

Tabla 3.4.3.a Porcentaje de disipación de energía para régimen Escalón a Escalón. (Anexo 3.b)

El proceso de cálculo para los demás caudales se detalla en los anexos.

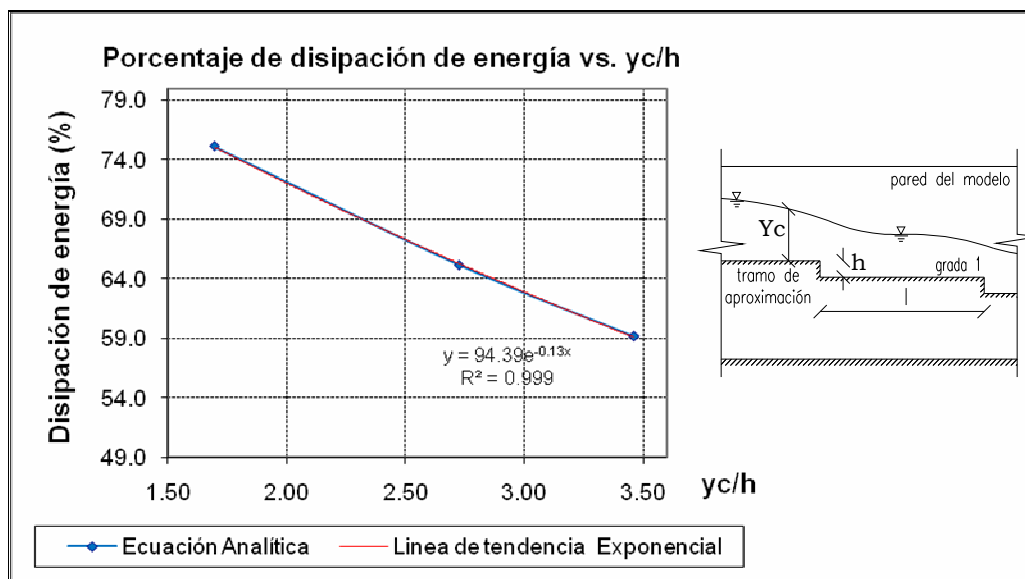


Figura 3.4.4 Variación del porcentaje de disipación de energía para régimen de flujo escalón a escalón en función de la relación Y_c / h para el rango de caudales mostrado en la tabla 3.4.3.a, Ecuación de la línea de tendencia. (Anexo 3.b)

Por otro lado, aplicando la ecuación de Bernoulli, en la sección aguas arriba y aguas abajo al pie de la rápida, y para las mismas relaciones de Y_c/h , se obtienen los resultados indicados en la tabla 3.4.4.a.

Q_m	Q_m	Q_p	E_o	E_f	ΔE [%]
[lt/s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]			
5,719	0,0057	1,04	0,455	0,104	77,14
11,671	0,0117	2,11	0,503	0,169	66,40
16,719	0,0167	3,03	0,537	0,187	65,18

Tabla 3.4.4.a Porcentaje de disipación de energía para régimen Escalón a Escalón. (Anexo 3.b)

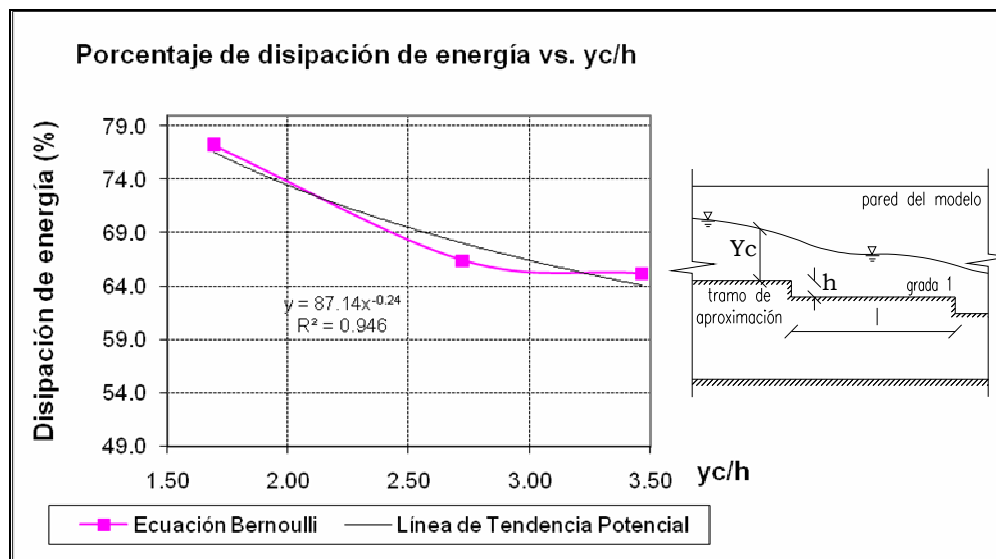


Figura 3.4.5 Variación del porcentaje de disipación de energía para régimen de flujo escalón a escalón en función de la relación Y_c/h para el rango de caudales mostrado en la tabla 3.4.4.a, Ecuación de la línea de tendencia. (Anexo 3.b)

Y_c/h	1,693	2,724	3,462
Ec. Bernoulli (%)	77,14	66,40	65,18
Ec. Analítica (%)	75,14	65,19	59,17

Tabla 3.4.5.a. Comparación de la Variación del porcentaje de disipación de energía en función de la relación Y_c/h para la Ecuación de Bernoulli y la Ecuación 2.11. (Anexo 3.b)

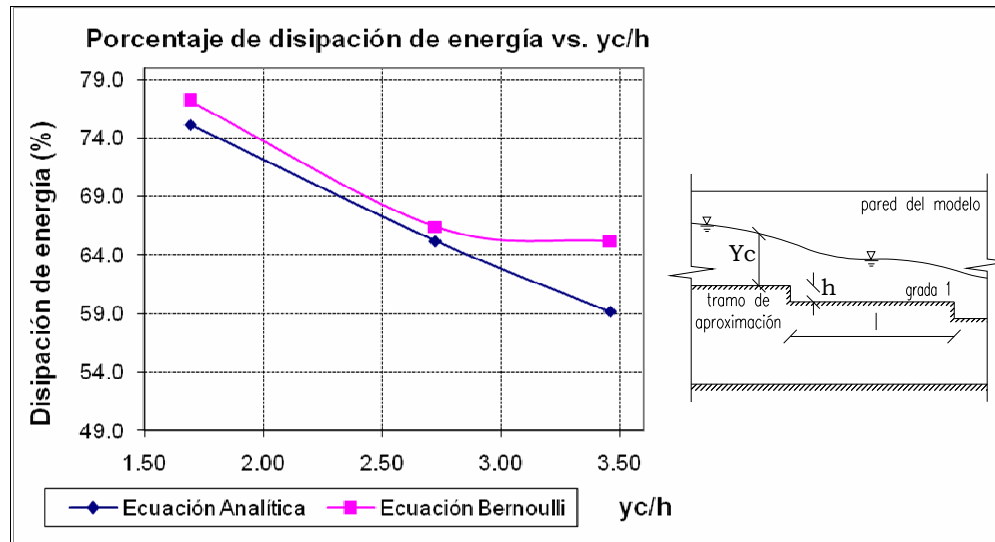


Figura 3.4.6 Comparación de la variación del porcentaje de disipación de energía en función de la relación Y_c / h para el rango de caudales mostrado en la tabla 3.4.5.a. (Anexo 3.b)

3.4.2.1.3 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.

Qp [m ³ /s]	yc / h	CARGA DE PRESIÓN (h) [m]													
		Contrah.		Huella				Contrah.		Huella				pie	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
1,040	1,693	0,024	0,066	0,036	0,031	0,016	0,022	0,075	0,023	0,010	0,079	0,000	0,031	0,041	0,032
2,110	2,724	0,036	0,077	0,064	0,044	0,022	0,028	0,093	0,048	0,014	0,091	0,063	0,046	0,086	0,049
3,030	3,462	0,054	0,097	0,096	0,068	0,036	0,040	0,111	0,078	0,025	0,103	0,094	0,064	0,124	0,062

yc / h	Contrah.	Huella				Contrah.	Huella				Contrah.	Huella				pie	
	P1/h	P2/h	P3/h	P4/h	P5/h	P6/h	P7/h	P8/h	P9/h	P10/h	P11/h	P12/h	P13/h	P14/h			
	1,693	0,768	2,112	1,152	0,992	0,512	0,704	2,400	0,736	0,320	2,528		0,992	1,312	1,024		
2,724	1,152	2,464	2,048	1,408	0,704	0,896	2,976	1,536	0,448	2,912	2,016	1,472	2,752	1,568			
3,462	1,728	3,104	3,072	2,176	1,152	1,280	3,552	2,496	0,800	3,296	3,008	2,048	3,968	1,984			
	x [m]	0,1	0,2	0,27		0,04	0,11	0,21		0,1	0,2	0,27					
	x / l	0,16	0,32	0,432		0,064	0,176	0,336		0,16	0,32	0,432					

Tabla 3.4.6.a. Cargas de presión media para caudales en flujo Grada a Grada, para $h/l = 0.1$ (Anexo 3.c.1)

Los piezómetros fueron ubicados en la huella y contrahuella del tercero, séptimo y noveno escalón según la distribución mostrada en la figura 3.2.5, a más de los piezómetros colocados al final de la rápida. Total 14 piezómetros. (Anexo 3.c.1.)

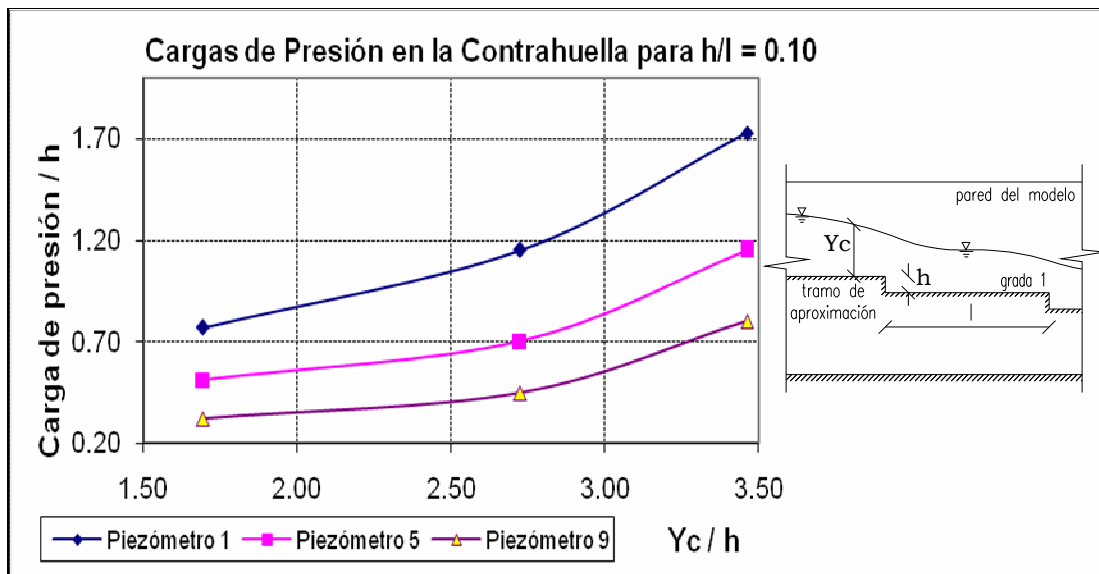
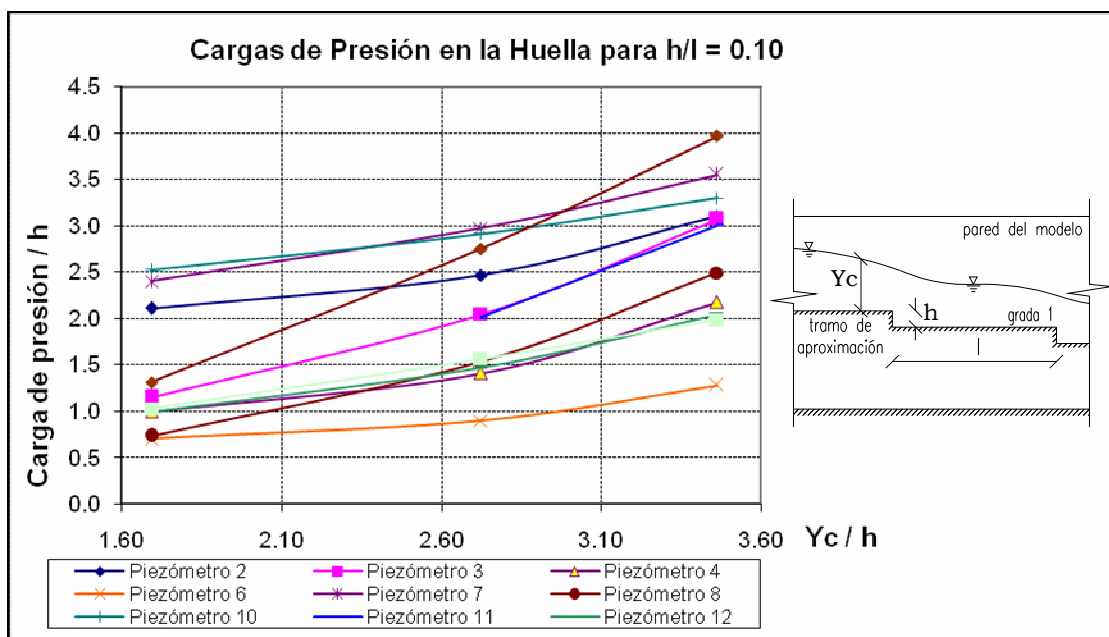


Figura 3.4.7

Teniendo como referencia la ubicación de los piezómetros, se observa una similitud en la variación de las cargas piezométricas para los piezómetros uno, cinco y nueve, siendo la carga de presión en P1, el doble y hasta casi el triple que la carga en P9, esto debido a que en P1 el calado de agua es mayor y en P9 tiende a disminuir debido al aumento de velocidad en el tramo final.

Figura 3.4.8 Variación de la carga de presión en la huella dos y cuatro en función de Y_c/h .

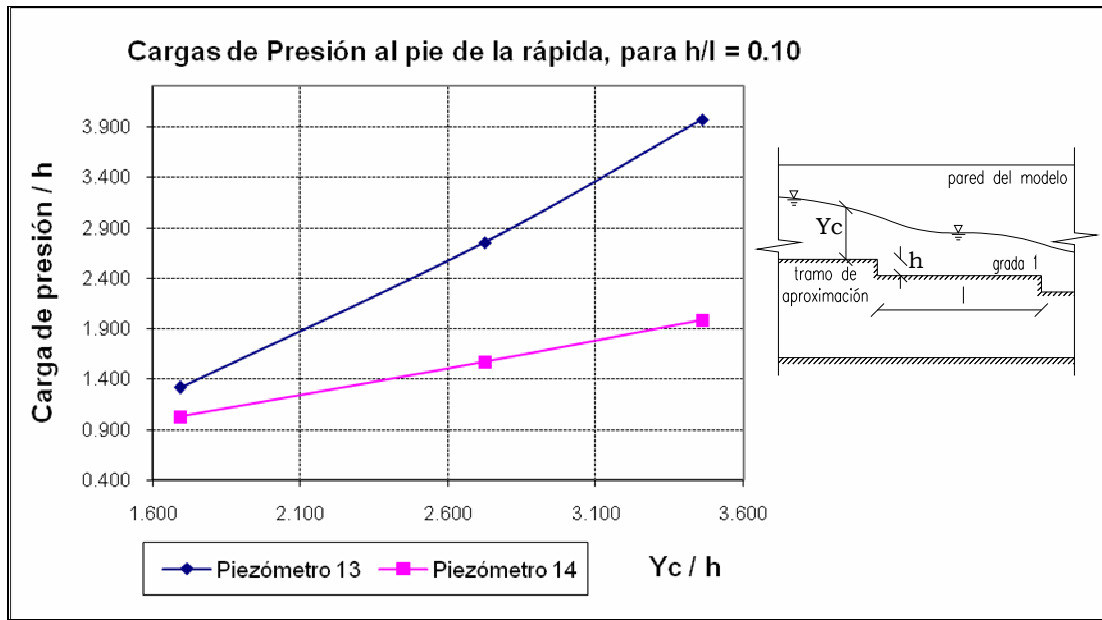


Figura 3.4.9

En la figura 3.4.9, se evidencia una vez más que la influencia del choque del chorro que cae cerca de los piezómetros eleva los valores de carga de presión, así para P13 en el punto $Y_c/h = 3.462$, la carga es mayor por recibir directamente la descarga de la grada anterior, pero para P14 es menor debido a que en esta zona el flujo más bien es estable y disminuye. Para los últimos caudales la carga aumenta de manera similar por existir mayor flujo de agua.

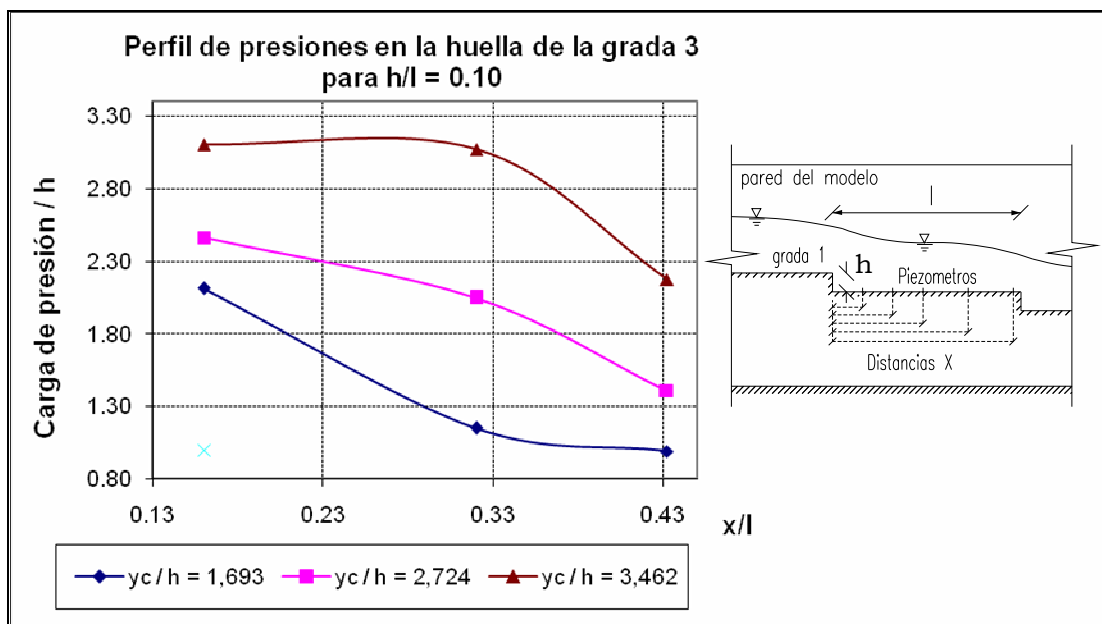


Figura 3.4.10

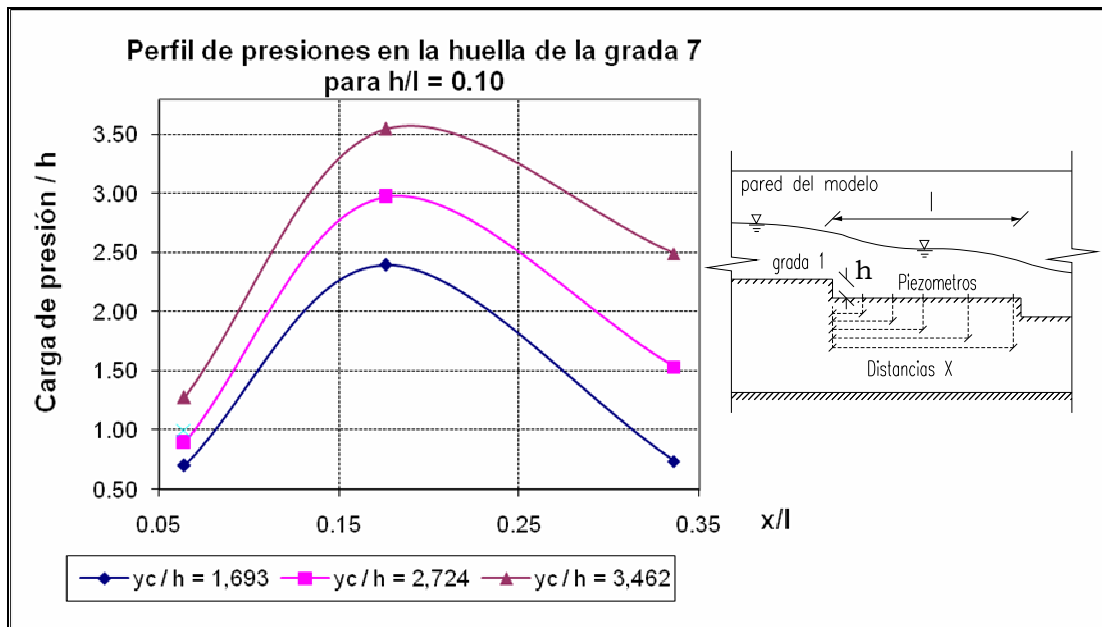


Figura 3.4.11

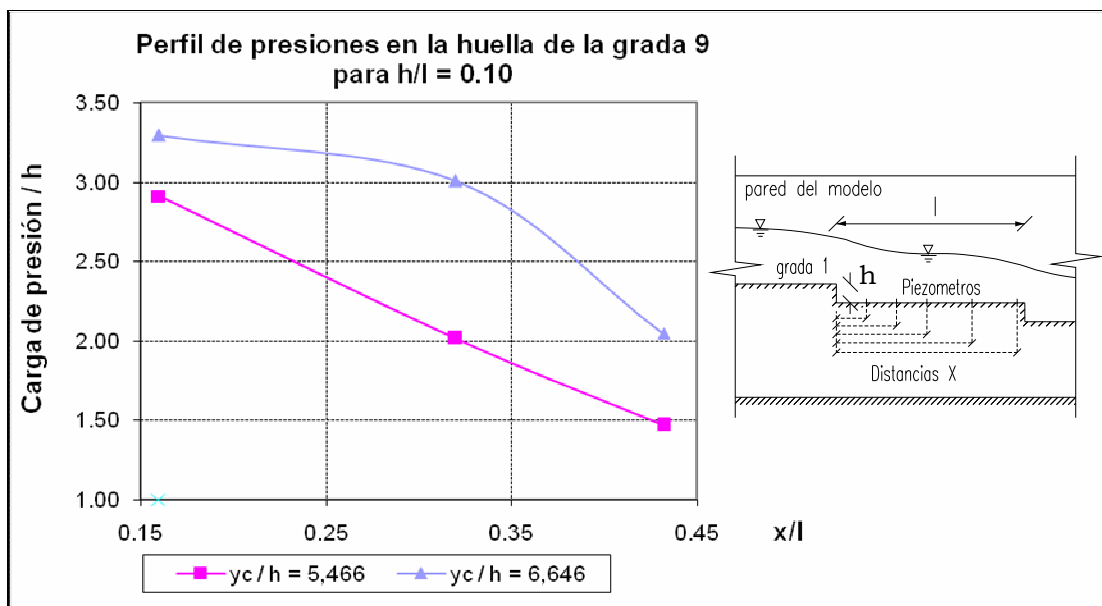


Figura 3.4.12

La similitud de las figuras 3.4.10 y 3.4.12, está dada por la ubicación casi simétrica de los piezómetros en las huellas. Los perfiles de presión, en la

figura 3.4.11, para $Y_c/h = 3.462$, son notoriamente mayores que el perfil de presión para $Y_c/h = 1.693$ y 2.724 , esta variación tiene mucha influencia de la configuración geométrica de la estructura ya que al ser la base muy angosta ($b = 0.15\text{m}$) permite la formación de crestas centrales y laterales que hacen que el calado de agua aumente o disminuya, para el primer caudal el régimen de flujo grada a grada es más notorio y en las huellas el perfil de flujo es uniforme e inclinado a medida que el caudal aumenta esta condición se hace más notoria.

El perfil de presión, para $Y_c/h = 3.462$, es evidentemente mayor que el perfil de presión para $Y_c/h = 1.693$ y 2.724 esta variación tiene mucha influencia de la configuración geométrica de la estructura ya que al ser la base muy angosta ($b = 0.15\text{m}$) permite la formación de crestas centrales y laterales que hacen que el calado de agua aumente o disminuya.

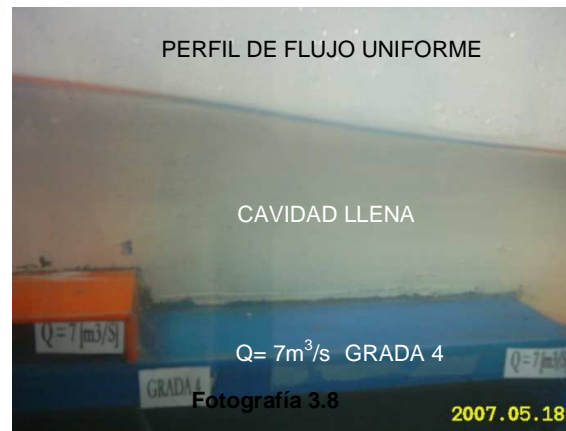
En la figura 3.4.12 la variación de los perfiles es diferente debido al incremento de la relación Y_c/h la misma que aumenta por la elevación del caudal, así, en el registro de medida de cada piezómetro, se observa esta variación de perfil; la primera medición se registra a 4cm de la cara vertical por lo que la influencia del vórtice recirculante es más notoria, es decir el calado de agua no es permanente, para el segundo registro, 7cm mas adelante del anterior, el flujo se estabiliza por la influencia de la cara horizontal de la grada y finalmente para la última medición a 21 cm de la cara vertical, la proximidad con el desnivel de la siguiente grada se evidencia.

3.4.2.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE

3.4.2.2.1 PERFIL DE FLUJO.

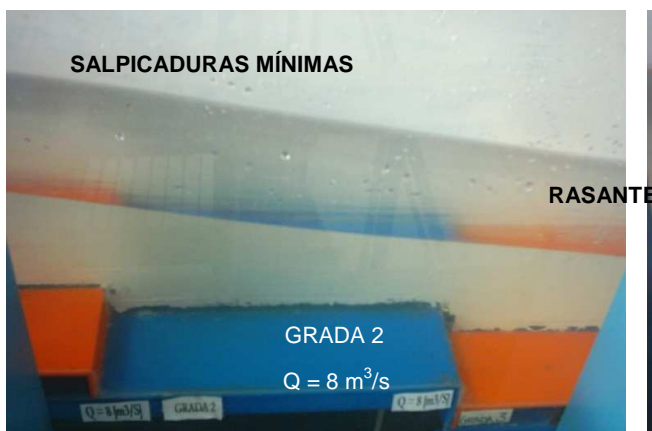
Los perfiles de flujo obtenidos para cada caudal con las mediciones proporcionadas con el limnómetro, nos muestran que a partir del caudal $Q_p = 3 \text{ [m}^3/\text{s]}$ se presenta un perfil de flujo en régimen rasante, el mismo que continua hasta el $Q_p = 10 \text{ [m}^3/\text{s]}$. (Anexo 3.a)

Como consecuencia de la presencia de flujo rasante las cavidades con aire, localizadas entre la huella y contrahuella de cada escalón, han desaparecido, lo que hace a los perfiles de flujo más uniformes (Fotografía 3.8).

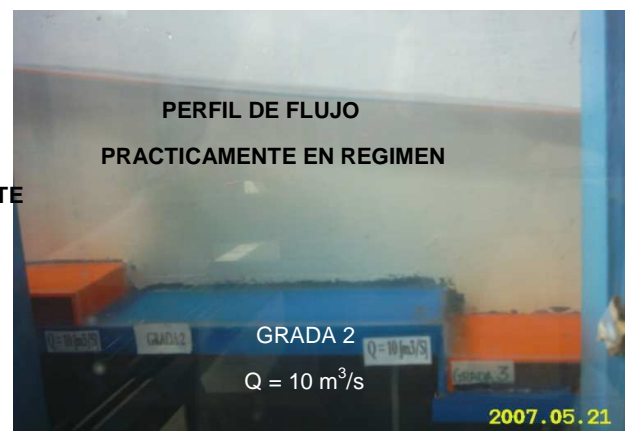


Para los caudales de 4 y 5 [m^3/s] el perfil de flujo presenta crestas muy pequeñas al inicio del escalón 9, las mismas que desaparecen a partir del caudal 6 [m^3/s].

Las salpicaduras son mínimas para todos los caudales en régimen de flujo rasante como resultado de la uniformidad alcanzada a través del aumento de caudales, el desvanecimiento de las crestas y la pequeña altura de los escalones. (Fotografía 3.9).



Fotografía 3.9



Fotografía 3.10

La gran longitud de las huellas en los escalones impide el total desarrollo del régimen rasante, así el fondo falso y demás características propias de este tipo de flujo tampoco se llegan a desarrollar completamente, lo que implica que las

fórmulas aplicadas para determinar los parámetros que busca este estudio, nos darán como resultado solo aproximaciones, pero que según las observaciones realizadas y los datos obtenidos no se alejan demasiado de la realidad. (Fotografía 3.10)

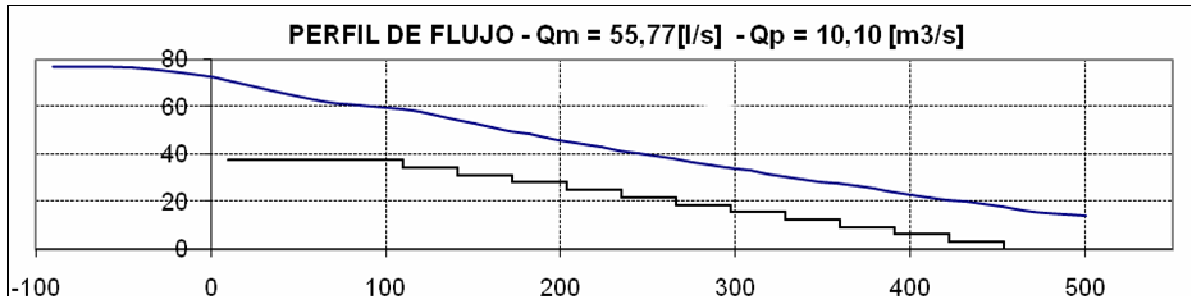


Figura 3.4.13

3.4.2.2.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Los siguientes resultados del grado de disipación de energía se obtienen aplicando la ecuación de Bernoulli y las ecuaciones analíticas indicadas en los anexos, entre una sección en el canal de aproximación a $x = 85\text{cm}$ y al pie de la misma en $x = 470.5\text{cm}$. (Anexo 3.b):

Qm	Qm	Qp	yc / h	ΔE [%]		Régimen de Flujo
				Ecuación Bernoulli	Ecuación Analítica 2,13	
				V. calculada		
[lt/s]	[m3/s]	[m3/s]				
22,612	0,0226	4,09	4,234	56,79	56,86	Rasante
27,261	0,0273	4,93	4,796	55,33	55,37	Rasante
33,168	0,0332	6,00	5,466	49,05	49,13	Rasante
38,973	0,0390	7,05	6,087	48,56	48,55	Rasante
44,466	0,0445	8,05	6,646	44,98	45,01	Rasante
49,928	0,0499	9,04	7,180	44,38	44,42	Rasante
55,774	0,0558	10,10	7,730	41,19	41,33	Rasante

Tabla 3.4.1.b. Porcentaje de disipación de energía para cada caudal. Ecuación de Bernoulli y ecuaciones analíticas utilizando velocidades calculadas con el calado, para $h/l = 0.1$.

El siguiente gráfico presenta la variación del porcentaje de disipación de energía producido en esta rápida escalonada ensayada en el rango de caudales expuesto en la tabla 3.4.1.b, para flujo rasante.

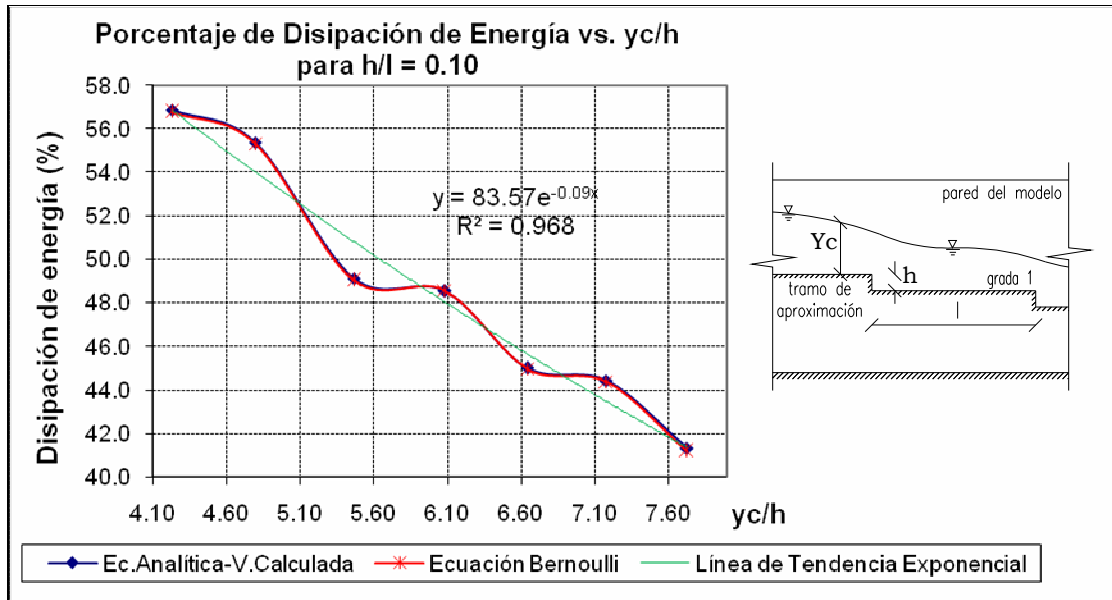


Figura 3.4.14 Porcentaje de disipación de energía para el rango de caudales mostrado en la tabla 3.4.1.b, Ecuación de la línea de tendencia. (Anexo 3.b)

La tendencia de variabilidad de la disipación de energía, es prácticamente la misma para los dos métodos utilizados, con una clara disminución de su valor al aumentar el caudal, hasta llegar a la mínima disipación posible, para este modelo, igual a 41% para el caudal prototipo máximo de 10 [m3/s] (Figura 3.4.14).

3.4.2.2.3 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

Qp [m3/s]	yc / h	CARGA DE PRESIÓN (h) [m]													
		contrah.		huella				contrah.		huella				pie	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
4.090	4.234	0.070	0.116	0.120	0.087	0.047	0.053	0.126	0.100	0.034	0.119	0.115	0.082	0.153	0.081
4.930	4.796	0.083	0.130	0.135	0.100	0.058	0.063	0.141	0.118	0.044	0.128	0.132	0.093	0.172	0.094
6.004	5.472	0.097	0.144	0.152	0.114	0.068	0.073	0.152	0.132	0.053	0.143	0.148	0.105	0.187	0.106
7.05	6.080	0.114	0.165	0.173	0.133	0.082	0.09	0.162	0.15	0.061	0.158	0.165	0.12	0.202	0.12
8.049	6.656	0.125	0.177	0.188	0.143	0.093	0.096	0.184	0.160	0.077	0.170	0.176	0.134	0.217	0.128
9.04	7.168	0.134	0.189	0.203	0.16	0.102	0.11	0.194	0.178	0.087	0.183	0.19	0.15	0.232	0.143
10.096	7.744	0.149	0.206	0.216	0.173	0.114	0.117	0.208	0.188	0.097	0.193	0.204	0.155	0.244	0.152

yc / h	contrah.	huella				contrah.	huella				contrah.	huella				pie	
	P1/h	P2/h	P3/h	P4/h	P5/h	P6/h	P7/h	P8/h	P9/h	P10/h	P11/h	P12/h	P13/h	P14/h			
4.234	2.243	3.712	3.840	2.784	1.504	1.696	4.032	3.200	1.088	3.808	3.680	2.624	4.896	2.592			
4.796	2.656	4.160	4.320	3.200	1.856	2.016	4.512	3.776	1.408	4.096	4.224	2.976	5.504	3.008			
5.472	3.104	4.608	4.864	3.648	2.176	2.336	4.864	4.224	1.696	4.576	4.736	3.360	5.984	3.392			
6.080	3.648	5.280	5.536	4.256	2.624	2.752	5.184	4.800	1.952	5.056	5.280	3.840	6.464	3.840			
6.656	4.000	5.664	6.016	4.576	2.976	3.072	5.888	5.120	2.464	5.440	5.632	4.288	6.944	4.096			
7.168	4.288	6.048	6.496	5.120	3.264	3.392	6.208	5.696	2.784	5.856	6.080	4.704	7.424	4.576			
7.744	4.768	6.592	6.912	5.536	3.648	3.744	6.656	6.016	3.104	6.176	6.528	4.960	7.808	4.864			

Tabla 3.4.2.b Cargas de presión para $h/l = 0.10$

Para este modelo se colocaron piezómetros en la huella y contrahuella del tercer, séptimo y noveno escalones, como se indica en la figura 3.2.5, además se instalaron dos tomas piezométricas al pie de la rápida, en el tramo de salida. (Anexo 3.c.2.)

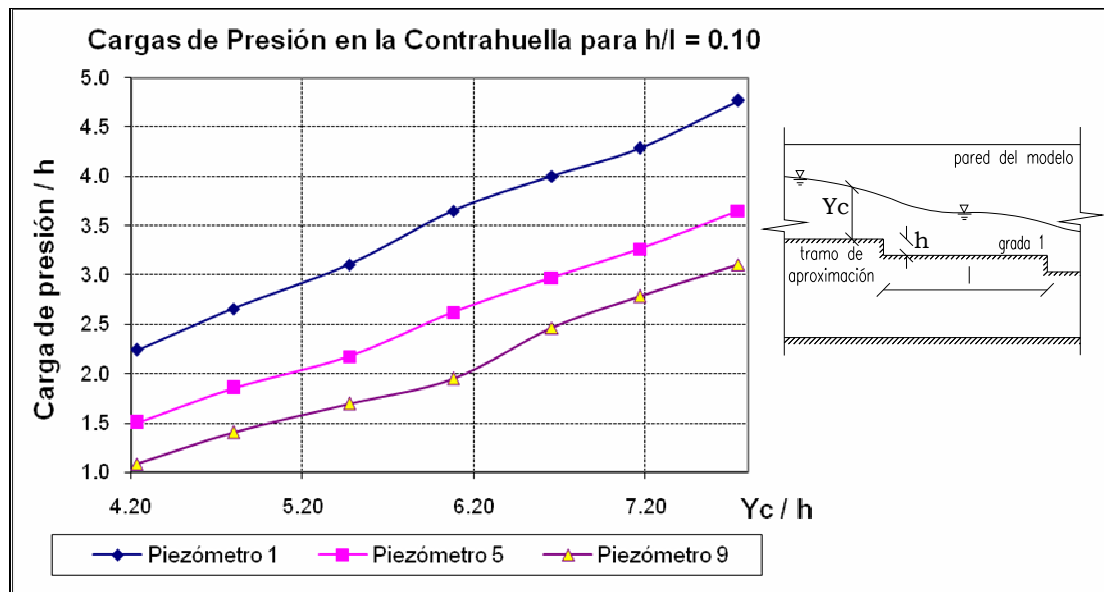


Figura 3.4.15

Al analizar esta variación de presiones a lo largo del rango de caudales, se observa claramente que los valores de carga aumentan de forma directamente proporcional al incremento de caudal y a su ubicación aguas arriba de la rápida, por lo que la carga en el piezómetro ubicado en el tercer escalón siempre será mayor que la carga de las otras dos tomas.

Los valores de presión en la cara vertical prácticamente se triplican desde el caudal prototipo de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. (Figura 3.4.15).

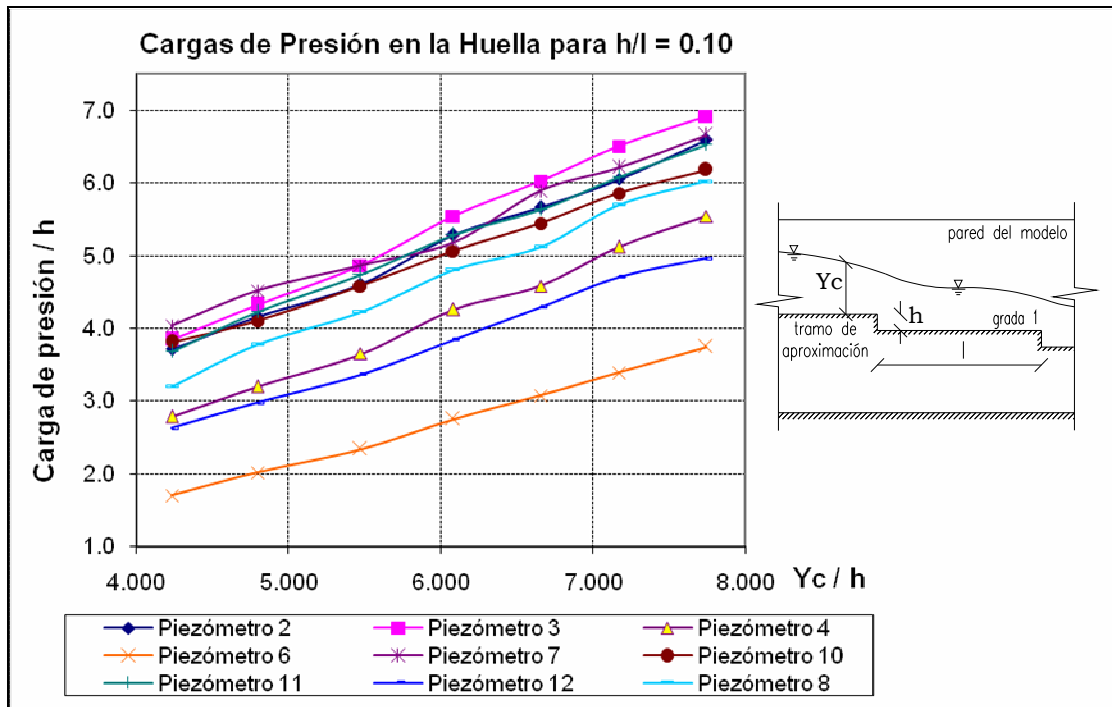


Figura 3.4.16

La carga piezométrica en el flujo rasante aumenta con una pendiente menor, con respecto al flujo grada a grada.

Las presiones de mayor valor se registran siempre en los piezómetros ubicados en el tramo medio de la cara vertical de la grada (Piezómetros: P3, P7 y P12), esto debido a que la caída en cascada que tiene el flujo de un escalón a otro se produce precisamente sobre esta zona de la huella; en cambio los piezómetros ubicados en el extremo inicial de las gradas registran valores bajos ya que en esta zona se producen vorticidades de aire.

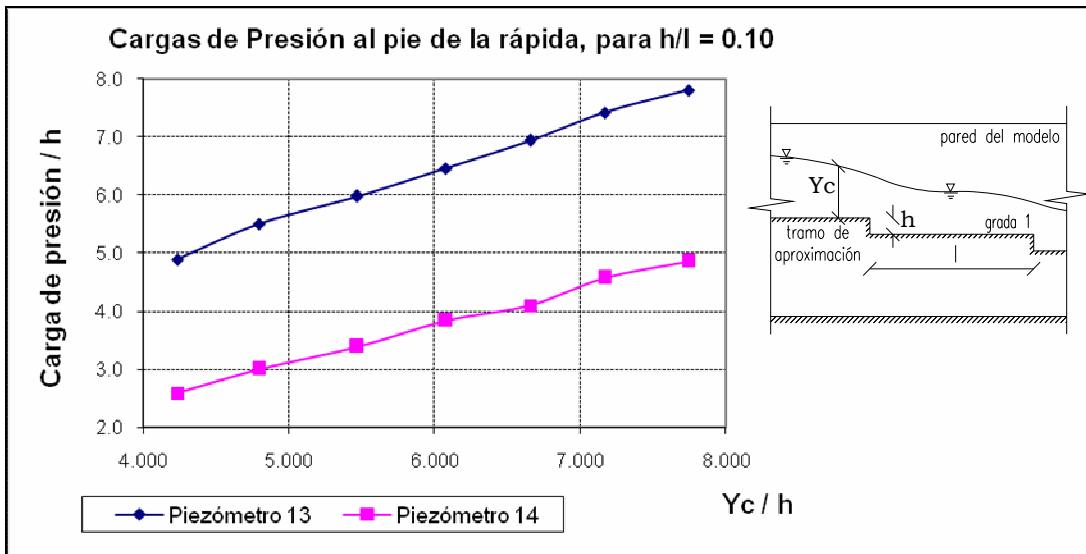


Figura 3.4.17

La variación de la carga de presión al final de la rápida no presenta mayores perturbaciones (Figura 3.4.17) y que solo está influida proporcionalmente por el incremento de caudal.

Los perfiles de presión en la cara horizontal de las gradas con tomas piezométricas para régimen rasante se puede visualizar en los siguientes gráficos:

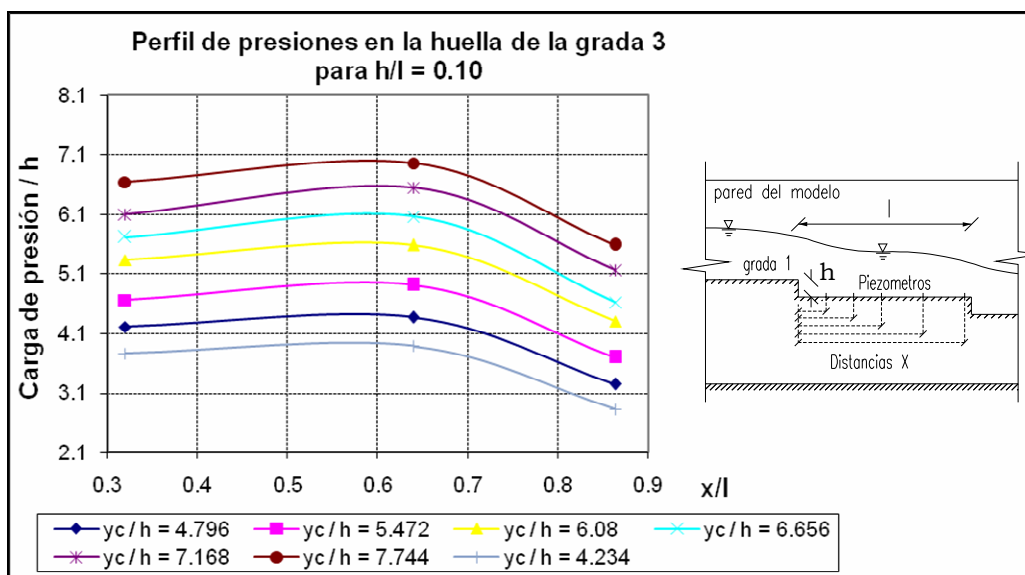


Figura 3.4.18

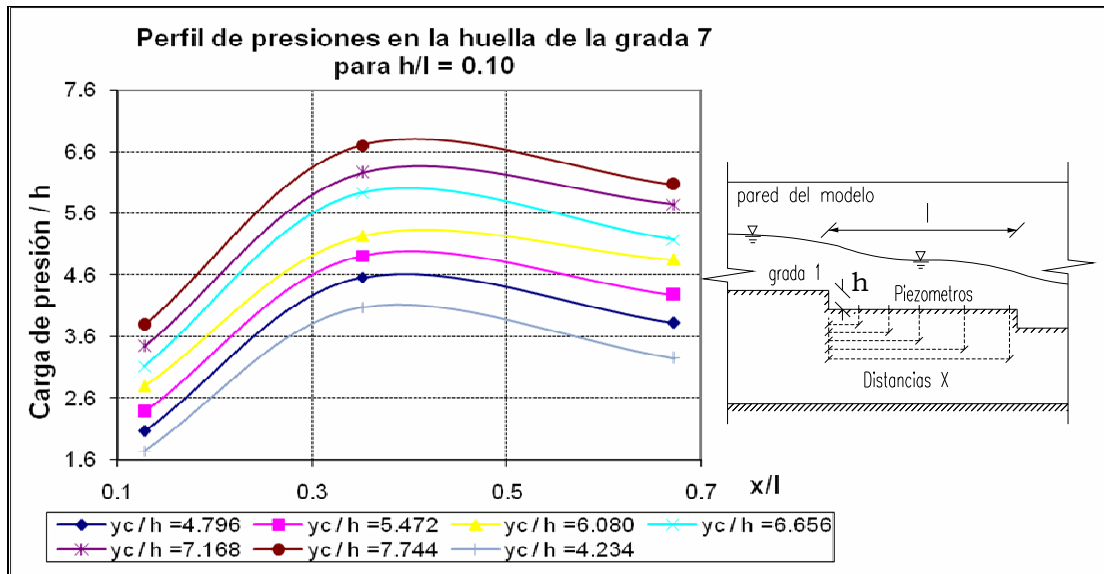


Figura 3.4.19

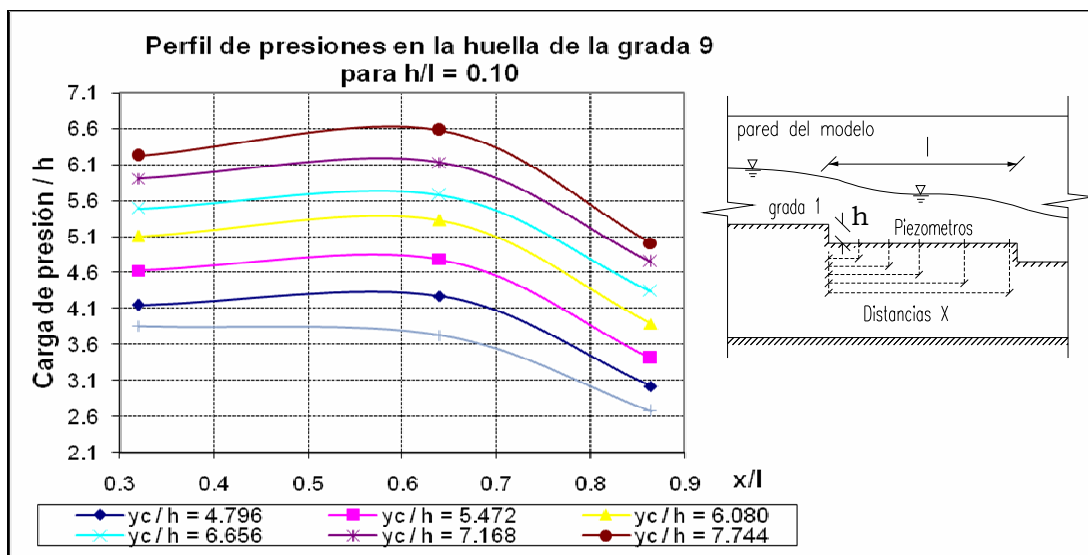


Figura 3.4.20

La notoria diferencia de las curvas de la Figura 3.4.19 con las de las Figuras 3.4.18 y 3.4.20, es debido a que en la grada 7 las tomas piezométricas están ubicadas en diferentes posiciones que en las otras dos gradas, lo que nos permite observar que las presiones son muy sensibles con respecto a su posición en la huella de la grada y que mientras más cerca se encuentre la toma de la contrahuella de su grada la presión será menor debido a las cavidades que se producen en las mismas.

3.5 OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE MANNING Y DE FRICCIÓN DE DARCY - WEISBACH

3.5.1 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

El procedimiento de cálculo, se realizará para un caudal prototipo de 8 [m³/s], el cual se aplicará de manera similar a los ensayos realizados para los caudales en régimen rasante. La totalidad de los cálculos se encuentran en el Anexo 3.d. Factor de fricción.

El cálculo del factor de fricción (f), para este estudio, se realizará en las mismas abscisas en que se calculó velocidades, energías, etc., para un Δx igual a 3.575 [m] o sea entre las abscisas x = 85 [cm] y x = 442.5 [cm].

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot Y_p \cdot \text{Sen } \theta}{v^2}$$

$$f_p = f_m$$

Los valores obtenidos son los siguientes:

Qm [m³/s]	0.0445
Qp [m³/s]	8.06
θ (rad)	0.0997

	Calado yp	V. Calculada	f calculado
	[m]	[m/s]	
Grada 1	0.166	1.79	0.40
Grada 2	0.148	2.01	0.29
Grada 3	0.135	2.19	0.22
Grada 4	0.127	2.33	0.18
Grada 5	0.117	2.54	0.14
Grada 6	0.113	2.61	0.13
Grada 7	0.113	2.64	0.13
Grada 8	0.108	2.74	0.11
Grada 9	0.108	2.76	0.11
Grada 10	0.102	2.89	0.10
Grada 11	0.103	2.89	0.10

Tabla 3.5.6.b Coeficientes de fricción. (Anexo 3.d)

Donde:

- Calado Yp: calado de agua en [m] medido en cada escalón. (Tabla de mediciones).
- V. Calculada: velocidad obtenida a partir del caudal analizado y el área hidráulica. (Tabla de mediciones).

- f calculado: Coeficiente de fricción obtenido aplicando la velocidad calculada.

3.5.2 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE MANNING.

El proceso de cálculo, se realiza para el caudal prototipo de 8 [m³/s], el cual se aplicará de manera similar a los ensayos realizados para los caudales con flujos rasante y grada a grada. Los resultados para todos los caudales restantes se encuentran en el Anexo 3.e.

Durante el proceso experimental también se observó el desarrollo de un perfil de Flujo Gradualmente Variado para el régimen de flujo rasante; por lo que, al ser considerado el perfil de flujo rasante - desarrollado en el canal con fondo escalonado- como gradualmente variado, y en régimen supercrítico con número de Froude (F_r) > 1, se procede a calcular desde la sección de control – determinada por el calado crítico Y_c al borde del canal de aproximación a la primera grada - hacia aguas abajo.

El método aplicado para el cálculo es nuevamente el denominado “Método Estándar de Pasos”, cuyas fórmulas utilizadas son las mismas que se encuentran desarrolladas en sus diferentes etapas en el capítulo 4 del procedimiento y análisis de resultados para el modelo con seis gradas.

3.5.2.1 EJEMPLO DE CÁLCULO PARA EL CAUDAL PROTOTIPO 8.05 [m³/s]

3.5.2.1.1 COEFICIENTE DE MANNING TOTAL (PARA TODO EL MODELO):

Elemento	Nº	x [cm]	Δx	Yp [m]	V [m/s]	Rh1	Rh2	le1 x n2	le2 x n2	le x n2	n modelo	n prototipo
						(Y1xB) / (2Y1+B)	(Y2xB) / (2Y2+B)					
Canal Aprox.	1	85	3.575	0.2	1.486	0.0545	0.0481	106.75	279.57	193.16	0.0204	0.0288
Grada 11	2	442.5		0.134	2.211							

Tabla 3.5.6.b. Coeficientes de Manning Total para $Q_p = 8.05$ m³/s. (Anexo 3.e)

3.5.2.1.2 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Los cálculos correspondientes para los caudales en régimen rasante se encuentran detallados en el Anexo 3.d.

Dada la tendencia de los valores calculados del coeficiente de fricción f según la ecuación 2.14 en el anexo indicado, se toma como valores de f para cada yc/h , a los que corresponden al tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 3.5.3.b. y en la figura 3.5.1.

TENDENCIA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN LA GRADA FINAL AGUAS ABAJO		
Qp [m3/s]	yc / h	f - Vcalculada
4.03	4.234	0.05
4.93	4.796	0.069
6.0	5.472	0.070
7.05	6.080	0.094
8.05	6.656	0.100
9.04	7.168	0.110
10.1	7.744	0.110

Tabla 3.5.3.b Coeficientes de fricción promedio para $h/l = 0.10$ (Anexo 3.d)

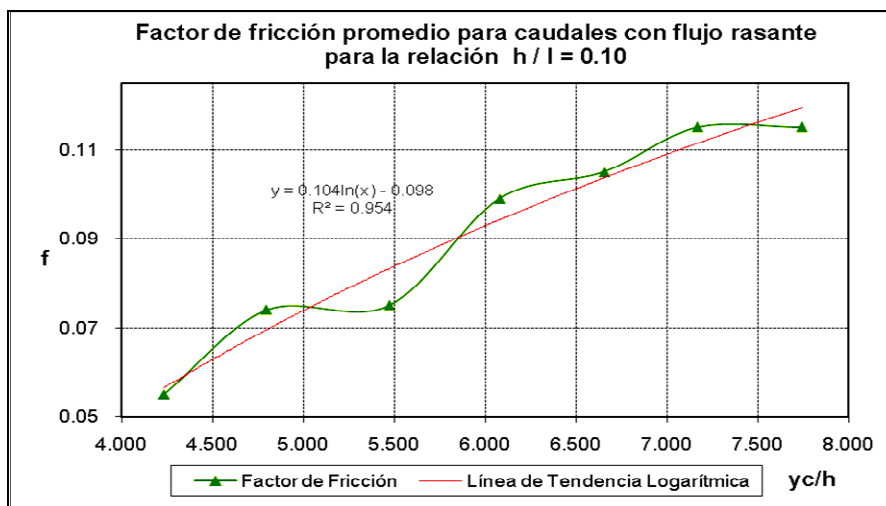


Figura 3.5.1 Variación del Factor de Fricción promedio para caudales con flujo rasante mostrados en tabla 3.5.3.b, Ecuación de la línea de tendencia. (Anexo 3.d)

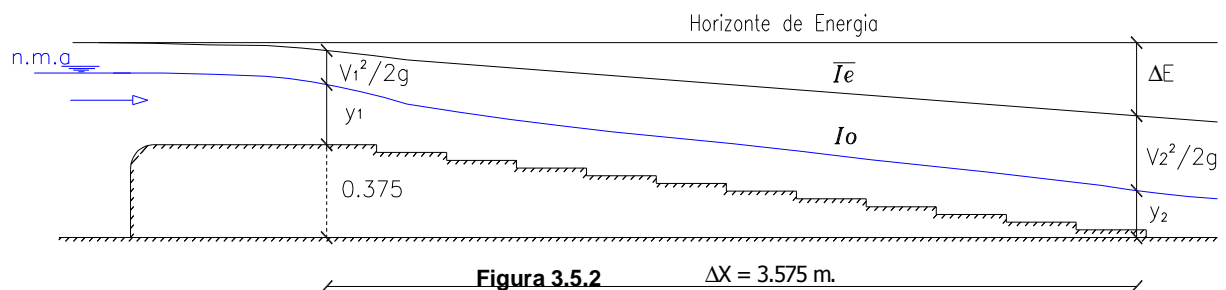
En la figura 3.5.1 se observa que los valores obtenidos para el tramo $\Delta x = 3.4375$ [m] son altos para el tramo donde la relación Yc/h es mayor, esto

debido a que se incluyen los efectos de resistencia al flujo de toda la huella del escalón.

3.5.2.1.3 COEFICIENTE DE MANNING.

Para calcular el coeficiente de Manning (n) en este modelo, se utilizará el “Método Estándar de Pasos” basados en el criterio del perfil de flujo gradualmente variado. Los cálculos se encuentran procesados en el Anexo 3.e

Se obtiene el valor del coeficiente de manning “ n ” entre los puntos $x=85$ [cm] ubicado en el canal de aproximación, hasta el punto $x=442.5$ [cm] localizado en la grada 11, lo que determina un Δx de 3.575 [m] (Figura 3.5.3).



Los resultados para esta condición son los siguientes:

COEFICIENTE DE MANNING TOTAL		
Qp [m3/s]	R (m)	n calculado
	prototipo	prototipo
4.01	0.3451	0.0310
4.93	0.3658	0.0317
6.01	0.3791	0.0276
7.05	0.3973	0.0290
8.05	0.4105	0.0288
9.04	0.4203	0.0281
10.1	0.4282	0.0267

Tabla 3.5.4.b Coeficiente de Manning Total para $\Delta x = 3.575$ [m] (Anexo 3.e)

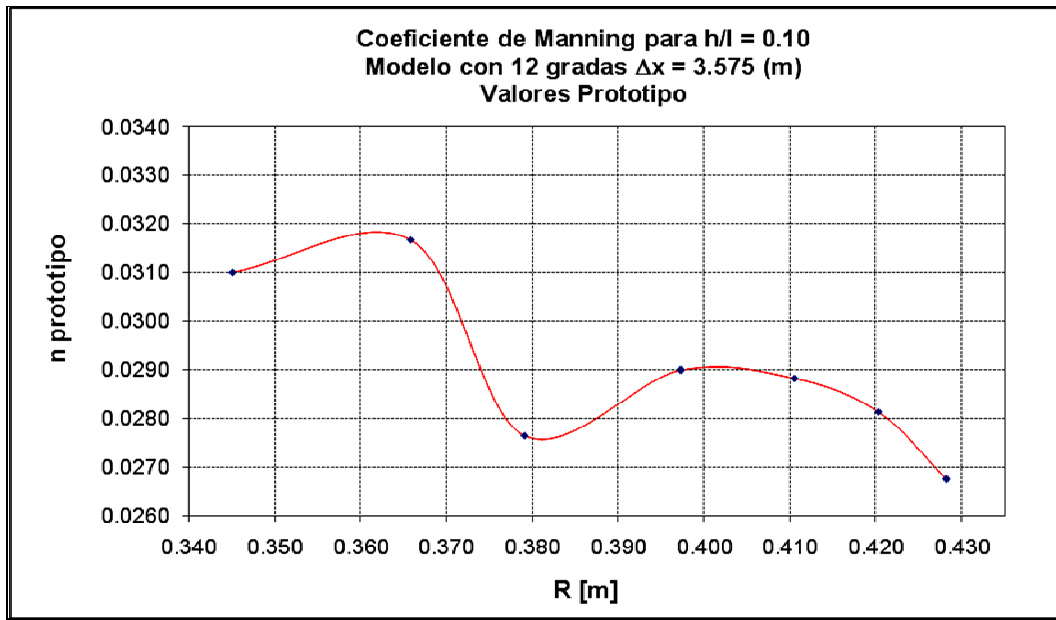


Figura 3.5.3

3.6 CONCLUSIONES

3.6.1 FLUJO GRADA A GRADA - CONCLUSIONES

- El perfil de flujo que se presenta en el modelo con 12 gradas y en especial para el análisis grada a grada tiene características similares al modelo anterior de 6 gradas, de la misma manera por la influencia del cruce de las líneas de flujo se presentan crestas centrales y laterales o en paredes lo que provoca salpicaduras de hasta 4cm. en la última mitad.
- Los vórtices recirculantes son inversamente proporcional al caudal, a medida que el caudal incrementa, los vórtices tienden a desaparecer influyendo esto en los valores obtenidos para la disipación de energía y carga de presión.
- La disipación de energía obtenida para el régimen grada a grada es considerable ya que se obtienen valores de disipación del 70% para el primer caudal y 60% para el tercero, la mayor disipación se presenta en el primer caudal debido a que el flujo grada a grada está más desarrollado, los vórtices recirculantes y las crestas centrales y laterales son más influyentes,

al disminuir estas características con el incremento del caudal, disminuye también la disipación. Además, con los dos métodos utilizados para el análisis se concluye que se obtienen valores semejantes para los dos primeros tramos y una diferencia notoria en el tramo final. (Figura 3.4.5)

- La distribución de presiones obtenida demuestra claramente que para los piezómetros ubicados a una distancia similar a lo largo de la cara vertical la variación de carga es semejante (figuras 3.4.10 – 3.4.12)
- Otra vez se comprueba que el impacto del chorro de agua en las cercanías del piezómetro eleva notoriamente la medición de carga, así se observa para los valores obtenidos al pie de la rápida (Figura 3.4.9)
- La ubicación de los piezómetros a lo largo de la cara horizontal influye directamente en la obtención de resultados, así se comprueba para el caso de la grada siete (figura 3.4.11) en donde por su ubicación se obtienen resultados son totalmente diferentes a los de las gradas 3 y 9, (figuras 3.4.10 – 3.4.12)

3.6.2 FLUJO RASANTE - CONCLUSIONES

- Cuando el flujo se torna en régimen rasante (Anexo 3.a) el perfil de flujo ya no presenta crestas tan pronunciadas como se observaba en el modelo de seis gradas y desaparecen para los caudales mayores.
- El grado de disipación de energía obtenida con la velocidad calculada a partir de la ecuación analítica 4.2.5 del capítulo 4, nos da como resultado valores prácticamente iguales a los calculados por medio de la ecuación de energía de Bernoulli (Tabla 3.4.1.b – Figura 3.4.14), de donde se concluye que los experimentos realizados concuerdan con la teoría desarrollada anteriormente por otros autores y se observa que al aumentar el número de escalones, pero manteniendo la misma relación $h/l=0.10$, la disipación de energía también aumenta aunque no en el grado que se desearía, por lo que para decidir cuál de los estudios experimentales es el más eficiente, se

debería considerar otros parámetros como la facilidad constructiva, los costos, tipo y ubicación del proyecto, estudios hidrológicos, etc. Los valores varían para la ecuación 4.2.5 entre $56.86\% \leq \Delta E(\%) \leq 41.33\%$ y para la ecuación de Bernoulli entre $56.79\% \leq \Delta E(\%) \leq 41.19\%$.

- En resumen, el grado de disipación de energía depende directamente de la altura del escalón, así como también de la cantidad de gradas que componen la estructura de la rápida escalonada. En la rápida escalonada de $h/l = 0.10$, con doce escalones y para régimen rasante, la disipación de energía promedio es del 48%.
- Todas las presiones medidas en régimen rasante son positivas (Anexo 3.c.2), por lo tanto no existe succión en ningún punto del flujo, ni peligro de cavitación.
- Las presiones sufren un incremento en sus valores para los piezómetros ubicados en la parte central de la cara horizontal de la grada, siendo los piezómetros ubicados en la segunda mitad de la huella los que presentan las cargas más bajas, ya que el perfil empieza a decaer hasta alcanzar el nuevo escalón.
- Se ha observado que lo más influyente en los valores de las cargas piezométricas es el caudal que circula por el modelo y la ubicación de la toma piezométrica en el escalón.
- Los Coeficientes de Manning para un canal escalonado de las características ensayadas en el laboratorio, correspondiente a un prototipo de: $h/l = 0.10$, $b = 1.20$ m., $h = 0.25$ m., doce gradas y $4.234 \leq y_c/h \leq 7.744$ (Tabla 3.5.3.b), se encuentran entre $0.031 \leq n \leq 0.0267$ (Tabla 3.5.4.b); lo que permite recomendar un valor de “n” de 0.028, que pertenece a la zona más uniforme de la curva “R vs. n”, de la figura 3.8.27

- Dada la tendencia de los valores calculados del coeficiente de fricción f según la ecuación 2.2.6 en el anexo 3.d, se toman los valores de f para cada yc/h correspondientes al tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 3.5.3.b. y en la figura 3.5.1; lo que permite recomendar un valor de f igual a 0.11 para rápidas con fondo escalonado de similares características en prototipo: $h/l = 0.10$, doce gradas, $h = 0.25$ m y $4.234 \leq yc/h \leq 7.744$.

3.7. RESULTADOS EXPERIMENTALES CON GRADA INCLINADA EL 4%, MODELO CON DOCE GRADAS



3.7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN UNA RÁPIDA ESCALONADA PARA $h/l = 0.10$ CON GRADAS INCLINADAS EL 4 %.

3.7.1.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE

3.7.1.1.1 PERFIL DE FLUJO.

El Análisis de flujo rasante para el modelo de 12 gradas con pendiente del 4% se basa en el estudio realizado para los caudales en prototipo 4.93 (m^3/s), 8.05 (m^3/s), 10.10 (m^3/s). (Anexo 4.a)

Al aumentar la inclinación del modelo, aumenta también la velocidad, por lo tanto disminuye el área de la sección transversal del flujo. El flujo que se forma tiene características de Flujo rasante más notorias - pero no se desarrolla en su totalidad, dado que existe una presencia mínima de crestas centrales y laterales, y presencia de salpicaduras prácticamente nula - siendo entonces la aplicación de las formulas y teoría para este tipo de flujo y los resultados obtenidos después de su aplicación más óptimos. (Figura 3.7.1) y (Fotografía 3.11)

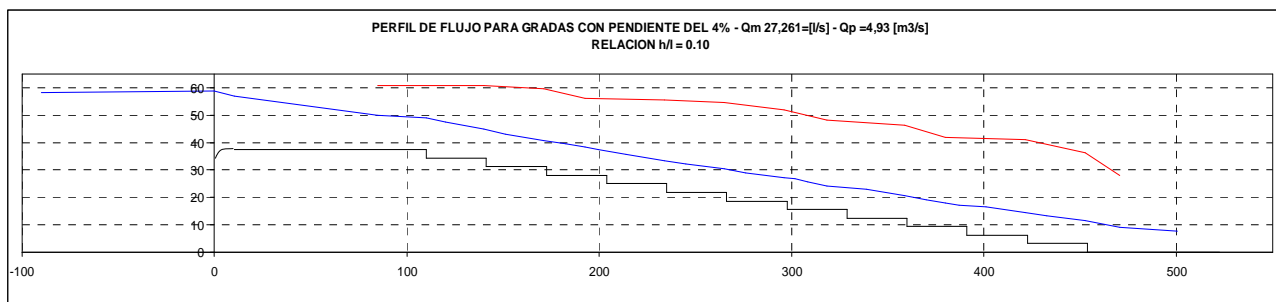
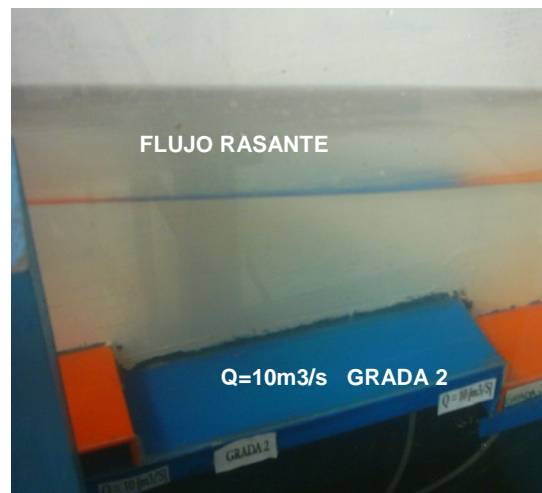


Figura 3.7.1 (Anexo 4.a)



Fotografía 3.11

3.7.1.1.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

De la misma manera aplicando las fórmulas para determinar los parámetros necesarios para encontrar el grado de disipación de energía se comparan los siguientes resultados (Anexo 4.b):

Qm [lt/s]	Qm [m3/s]	Qp [m3/s]	yc [m]	Porcentaje de Disipación (%)		Régimen de flujo
				Ecuación Bernoulli	Ecuación Analítica	
27,261	0,0273	4,93	0,15	53,93	53,19	Rasante
44,466	0,0445	8,05	0,208	39,08	38,42	Rasante
55,774	0,0558	10,10	0,242	38,04	36,51	Rasante

Tabla 3.7.1. Porcentaje de disipación de energía para cada caudal. Ecuación de Bernoulli y ecuación analítica utilizando velocidades calculadas con el calado para $h/l = 0.10$.

El siguiente gráfico presenta la variación del porcentaje de disipación de energía producido para flujo rasante.

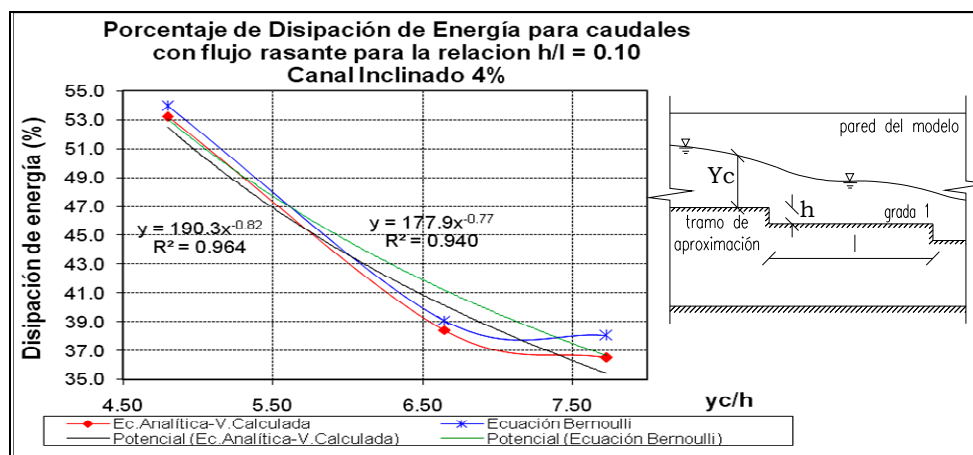


Figura 3.7.2 Porcentaje de disipación de energía para el rango de caudales mostrado en la tabla 3.7.1, Ecuación de la línea de tendencia. (Anexo 4.b)

La disminución de energía en este análisis, en comparación con el modelo para 12 gradas horizontal, tiene una disminución mínima para la relación Y_c/h inicial,

de 57% a 54% y una disminución más considerable por los valores de Y_c/h mayores, de 41% a 37%

3.7.1.1.3 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.

(Anexo 4.c)

CARGA DE PRESIÓN (h) [m] - GRADAS CON PENDIENTE DEL 4%															
Qp [m ³ /s]	yc / h	Contra huella	huella				Contra huella	huella				Contra huella	huella		pie
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
4,935	4,796	0,297	0,154	0,213	0,185	0,125	0,152	0,269	0,158	0,095	0,203	0,120	0,106	0,204	0,102
8,049	6,646	0,182	0,302	0,3	0,189	0,116	0,155	0,172	0,16	0,116	0,201	0,17	0,113	0,255	0,138
10,096	7,730	0,183	0,328	0,353	0,193	0,113	0,158	0,276	0,272	0,137	0,201	0,215	0,113	0,28	0,161

yc/h	Contra huella	huella				Contra huella	huella				Contra huella	huella		pie
	P1/h	P2/h	P3/h	P4/h	P5/h	P6/h	P7/h	P8/h	P9/h	P10/h	P11/h	P12/h	P13/h	P14/h
4,796	9,504	4,928	6,816	5,920	4,000	4,864	8,608	5,056	3,040	6,496	3,840	3,392	6,528	3,264
6,646	5,824	9,670	9,606	6,048	3,712	4,960	5,504	5,120	3,712	6,422	5,440	3,616	8,160	4,416
7,730	5,856	10,496	11,296	6,176	3,616	5,056	8,832	8,704	4,384	6,429	6,880	3,616	8,960	5,152
	x [m]	0,1	0,2	0,27		0,04	0,11	0,21		0,1	0,2	0,27	0,168	0,468
	x / l	0,32	0,64	0,864		0,128	0,352	0,672		0,32	0,64	0,864	0,536	1,496

Tabla 3.7.2 Cargas de presión para $h/l = 0.10$

El número de piezómetros es el mismo y tienen la misma ubicación, en la huella y contrahuella de la tercera, séptima y novena grada, a más de los 2 piezómetros ubicados al final de la rápida como se indicó en la figura 3.2.5.

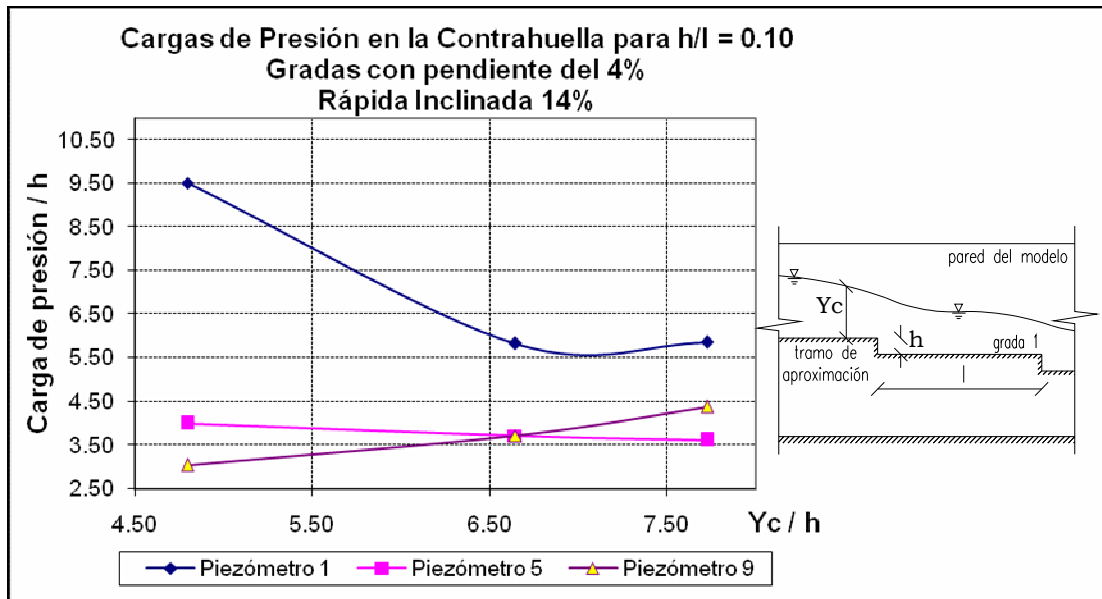


Figura 3.7.3

La carga de presión en el primer piezómetro tiende a disminuir al aumentar el caudal, En la figura 3.7.3 que para la relación Y_c/h inicial la carga de presión es la más significativa, debido a que el flujo no se acelera totalmente en este tramo y el área hidráulica en la sección es mayor, el incremento para el ultimo caudal es debido a las pequeñas variaciones que existen en el flujo cuando el caudal aumenta, entonces cabe mencionar que cuando el flujo se acelera el calado de agua disminuye (piezómetro 1 y 5) y que las irregularidades en el trayecto del flujo son más notorias al final del modelo (piezómetro 9) por eso la carga tiene un leve incremento.

De todos modos se mantiene el criterio general que la carga de presión es menor para el escalón más alejado del inicio de la rápida (donde se encuentran ubicado el piezómetro 9)

Se observa también que los valores tienden a variar con una pendiente horizontal, lo que ratifica la mayor uniformidad que va adquiriendo el perfil en el régimen rasante, para el modelo inclinado.

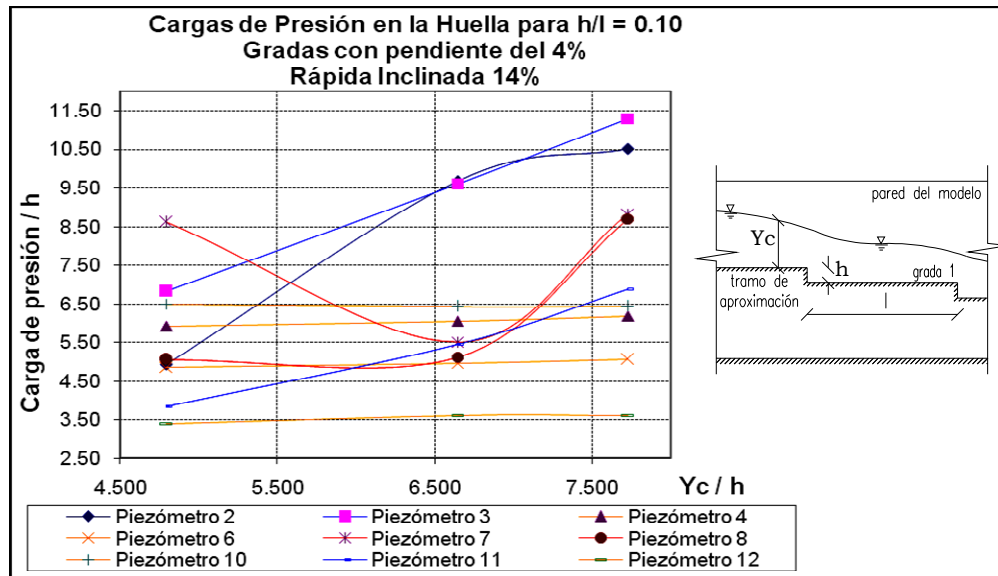


Figura 3.7.4

Se demuestra una vez más con los resultados de la Figura 3.7.4 que el flujo al ingreso de la rápida no desarrolla características de flujo rasante, así para los piezómetros 2 y 3 al aumentar la relación Y_c/h , aumenta también la carga de presión; el piezómetros 11 incrementa su valor debido a que por su ubicación en la mitad de la huella, recibe el impacto directo del flujo que viene de la grada anterior.

Los piezómetros intermedios, al tener una pendiente casi horizontal, muestran que el flujo se dispone a formar flujo rasante.

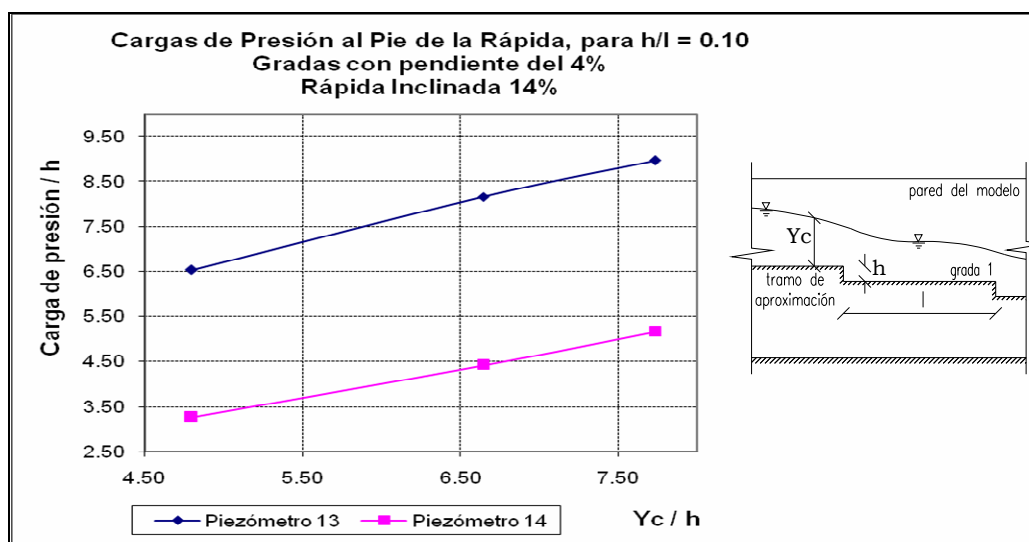


Figura 3.7.5

Las presiones al pie de la rápida son mucho mayores que en el modelo en posición horizontal, al estar el modelo inclinado la carga de presión que se registra en estos piezómetros es más alta debido a que un mismo caudal debe ser desalojado más rápidamente.

El perfil de presiones para régimen rasante se puede visualizar en el siguiente gráfico:

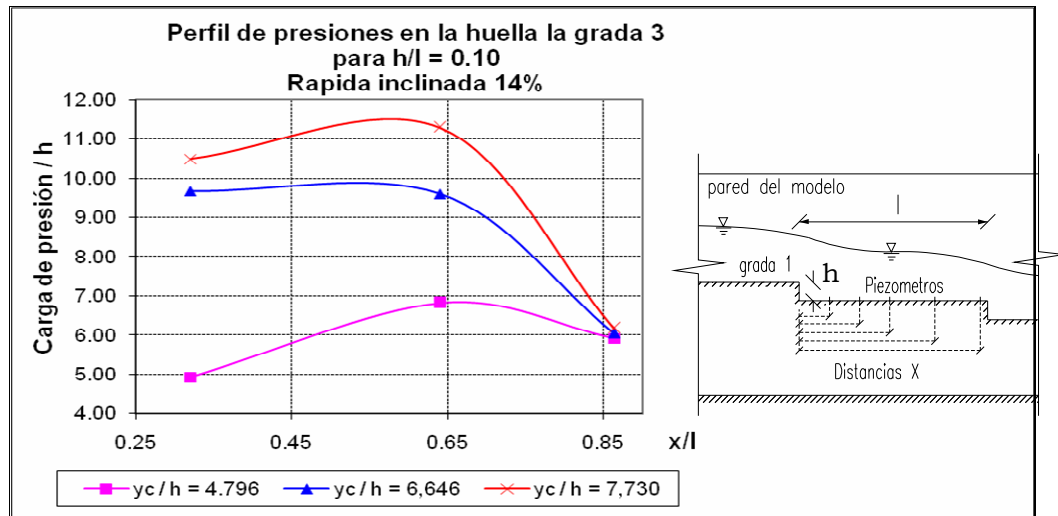


Figura 3.7.6

En la figura 3.7.6, se observa que la carga de presión para cada Y_c/h es menor al inicio de la grada, mayor en el tramo medio y nuevamente bajo al final; La similitud en los valores de presión al final del escalón se debe a que desde este punto se comienzan a registrar las primeras tendencias de flujo rasante.

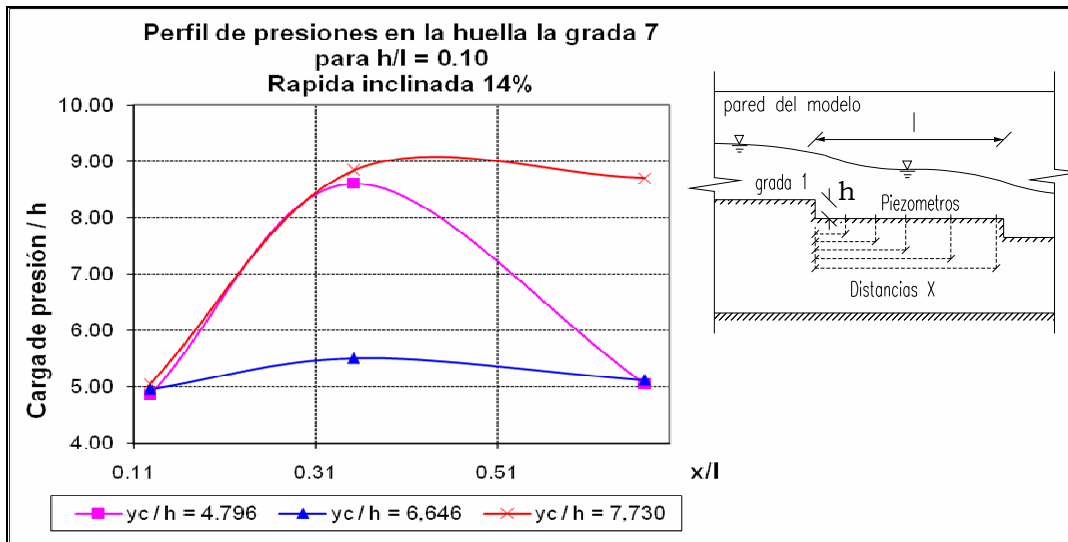


Figura 3.7.7

La ubicación de los piezómetros en la grada 7 (figura 3.7.7) es diferente a los de la grada 3 y 9, como ya se menciona con anterioridad; Esto sin duda influye al cambio en la tendencia de los valores para este escalón, pero de la misma manera se puede observar que para los registros en el centro de la huella, la carga es mayor y que para los registros iniciales y finales la carga de presión es similar, debido esto a las características de flujo rasante.

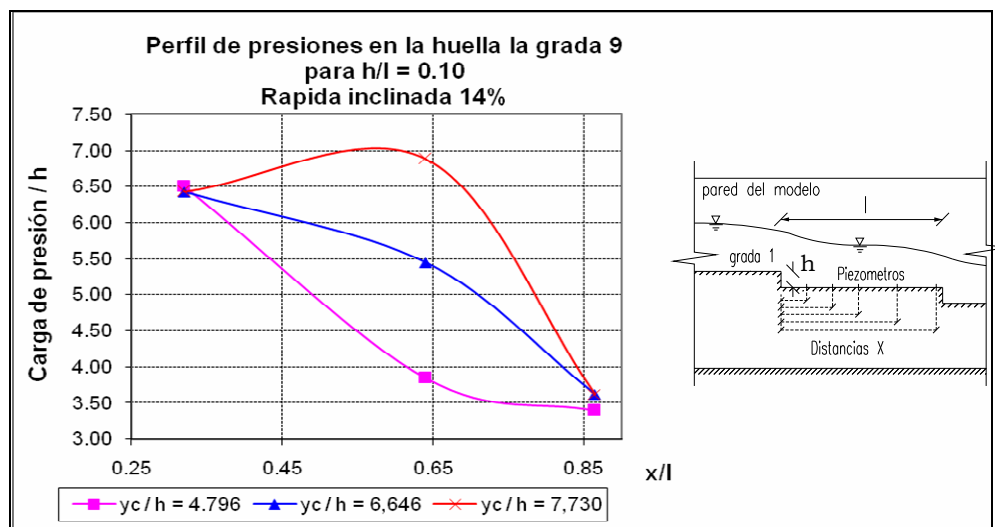


Figura 3.7.8

Finalmente, en la Figura 3.7.8, el flujo tiende a ser rasante ya que las presiones de carga al inicio y al final de la huella para diferente Y_c/h , tienen valores

semejantes, en la mitad del escalón los valores varían debido a los vórtices recirculantes atrapados en las celdas triangulares que forma el fondo falso del flujo con las aristas de las grada, por lo tanto el perfil de presiones en la huella es mayor al inicio y menor al final.

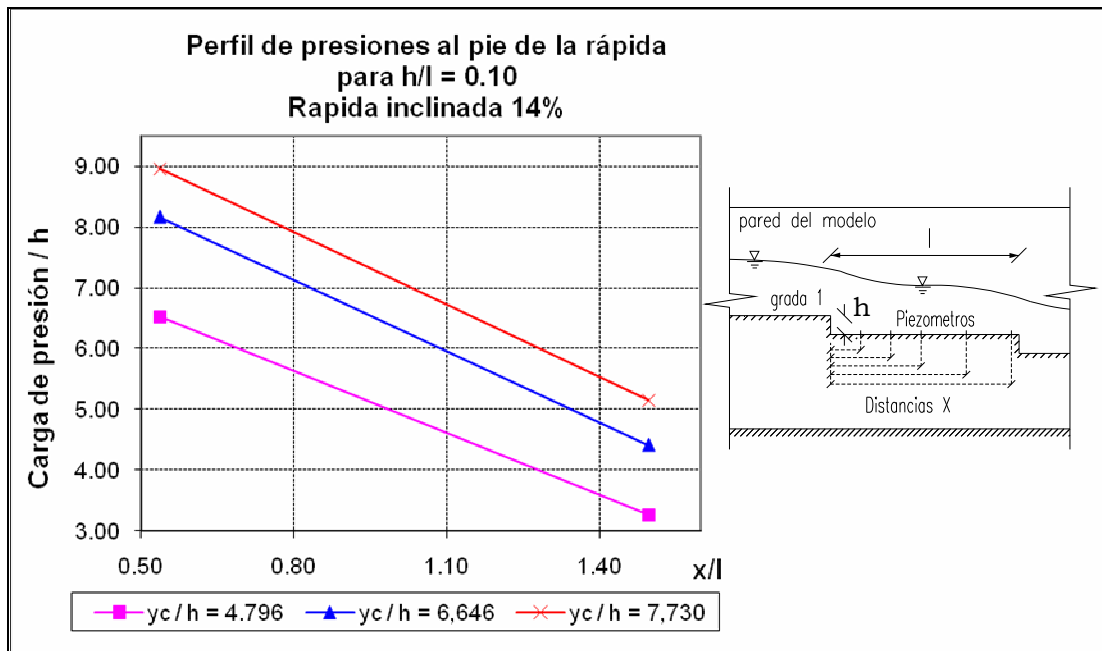


Figura 3.7.9

La ubicación de los piezómetros al pie de la rápida marca la tendencia de los resultados obtenidos en la figura 3.7.10; A una distancia $x = 0.168\text{m}$ desde la cara vertical del último escalón, donde se ubica el piezómetro 13, se recibe una carga de impacto y a $x = 0.468\text{m}$, ubicación del piezómetro 14, se mide una carga de presión más estable, de ahí los valores más bajos para este punto.

3.7.1.1.4 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Los cálculos correspondientes para los caudales en régimen rasante se encuentran detallados en el Anexo 4.d.

Dada la tendencia de los valores calculados del coeficiente de fricción f según la ecuación 4.2.6 en el anexo indicado, se tomaron como valores de f para cada yc/h , a los que corresponden al tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 3.7.3 y en la figura 3.7.10.

COEFICIENTES DE FRICCIÓN		
Qp [m3/s]	yc / h	f calculado
4.93	4.796	0.110
8.05	6.646	0.110
10.1	7.730	0.120

Tabla 3.7.3 Coeficientes de fricción promedio para $h/l = 0.10$
Gradas con pendiente del 4%

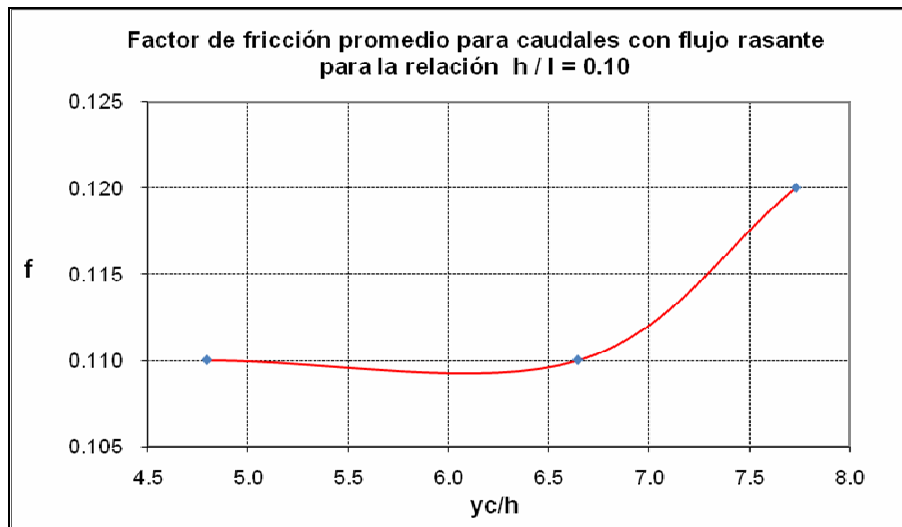


Figura 3.7.10

3.7.1.1.5 COEFICIENTE DE MANNING

Los cálculos que nos permiten obtener los valores de “n” para este estudio experimental están descritos en el Anexo 4.e

COEFICIENTE DE MANNING PROMEDIO		
Qp [m3/s]	R promedio (m)	n calculado
	prototipo	prototipo
4.94	0.0150	0.0242
8.05	0.0180	0.0220
10.10	0.0204	0.0203

Tabla 3.7.4 Coeficiente de Manning para $h/l = 0.10$

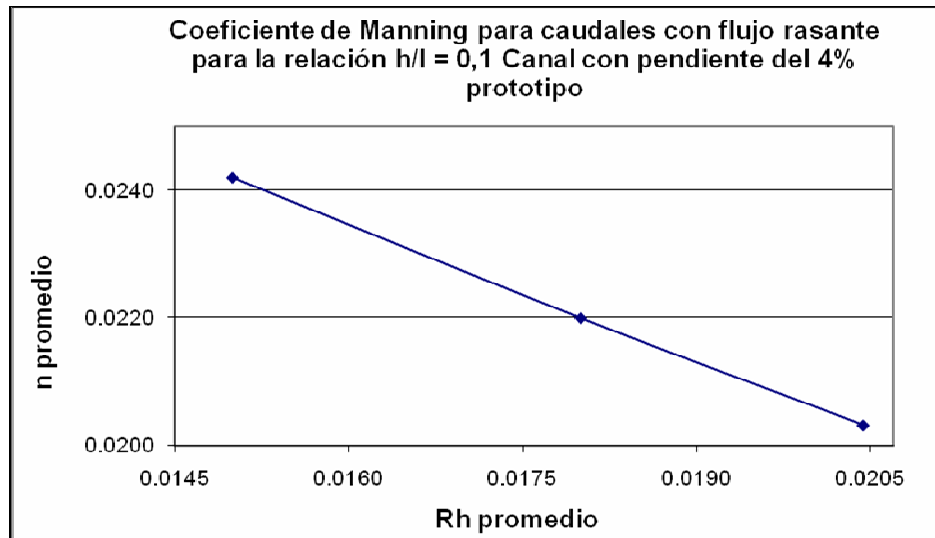


Figura 3.7.11

Como se muestra en la tabla 3.7.4 y en la figura 3.7.11 los valores para el Coeficiente de Manning muestran cierta similitud entre sí, siendo esto de mucha ayuda al momento de escoger un Manning de diseño. Así para este caso el valor recomendado sería de $n_p = 0.022$

3.7.1.3. FLUJO RASANTE.- CONCLUSIONES

- El perfil de flujo que se obtiene después del procesamiento de datos (anexo 4.a), muestra claramente que cuando el canal está inclinado, las características de flujo rasante se forman más rápidamente, las cresta centrales y de paredes disminuyen y las salpicaduras desaparecen, los vórtices recirculantes actúan como un fondo falso.
- Dado que la inclinación de la huella en el modelo es del 4%, la rápida en su conjunto tiene una inclinación del 14%. Por lo tanto la teoría sobre régimen en flujo rasante es más notoria en el modelo, siendo su aplicación más óptima.
- Los vórtices recirculantes no influyen sobre el perfil de flujo dado que se forma un fondo falso entre las aristas de las gradas, y así un flujo

uniforme a lo largo del modelo siendo más notorio en el tramo medio media.

- El grado de disipación de energía obtenida con la velocidad calculada a partir de la ecuación analítica 2.2.5 del capítulo 2, nos da como resultado valores muy parecidos a los calculados por medio de la ecuación de energía de Bernoulli (Tabla 3.7.7. – Figura 3.7.2), de donde se concluye que los experimentos realizados concuerdan con la teoría desarrollada anteriormente por otros autores y se observa que al aumentar el ángulo de inclinación de la rápida, pero manteniendo la misma relación $h/l=0.10$, la disipación de energía disminuye, debido al aumento de la velocidad del flujo. Los valores varían para la ecuación 2.13 entre $53.19\% \leq \Delta E(\%) \leq 36.51\%$ y para la ecuación de Bernoulli entre $53.93\% \leq \Delta E(\%) \leq 38.04\%$.
- Al existir un menor calado y un flujo uniforme, la tendencia horizontal que adoptan los perfiles de carga de presión de cada piezómetro, Fig. 5.7.5. y la similitud de valores de presión al inicio y final de la huella Fig. 5.7.9. comprueban que la inclinación del modelo ayuda a la formación de flujo rasante.
- Cabe recalcar una vez más que la ubicación de los piezómetros a lo largo de la huella influye considerablemente en los resultados obtenidos, así cuando el piezómetro se ubica cerca de la cara vertical, la influencia del vórtice recirculante hace que la carga disminuya, mientras que cuando se ubica en la mitad de la huella la carga es mayor (figura 3.7.6), existiendo una excepción para este caso ya que a medida que el caudal aumenta y la medición de la presión se realiza aguas más abajo, la carga es mayor al inicio de la huella y disminuye a medida que se acerca al borde.

- Los resultados obtenidos en este análisis permiten sugerir como valor promedio del coeficiente de Manning, para la relación $h/l = 0,10$, el valor de 0,020.
- Los Coeficientes de Manning para un canal escalonado de las características ensayadas en el laboratorio, correspondiente a un prototipo de: $h/l = 0.10$, $b = 1.20$ m., $h = 0.25$ m., doce gradas y $4.796 \leq yc/h \leq 7.73$ (Tabla 3.7.3), se encuentran entre $0.024 \leq n \leq 0.020$ (Tabla 3.7.4.); lo que permite recomendar un valor para “n” de 0.022, a partir de los datos de la curva “R vs n” de la figura 3.7.12.
- Dada la tendencia de los valores calculados del coeficiente de fricción f según la ecuación 2.2.6 en el anexo 3.d, se tomaron los valores de f para cada yc/h a los correspondientes al tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 3.7.4.b; lo cual permite recomendar un valor de f igual a 0.11, para rápidas con fondo escalonado de similares características en prototipo: $h/l = 0.10$, doce gradas, $h = 0.25$ m, grada con inclinación del 4% y $4.796 \leq yc/h \leq 7.73$.

CAPITULO 4.

4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE FLUJOS EN RÁPIDAS ESCALONADAS CON UMBRALES COLOCADOS EN EL BORDE DE LA GRADA PARA LA RELACION $h/l = 0.10$ Y SEIS GRADAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Los canales escalonados son utilizados para descargar el flujo de agua por el vertedor de excesos de las represas y también en rectificación de ríos en corrientes de montaña (vertedores de gaviones). El diseño básico de los canales escalonados está basado en gradas horizontales lisas; sin embargo, existen también conceptos de diseño que usan colchones de agua en las gradas ubicando umbrales o tabiques en el borde de la grada y perpendicular al flujo. En el caso de estas gradas en cascadas, lo esencial es tener un entendimiento detallado del proceso de flujo para predecir correctamente la resistencia que ofrecen estas estructuras.

Estudios previos realizados han demostrado que el tipo de régimen de flujo que se presenta, ya sea grada a grada, en transición o rasante, en estas estructuras escalonadas, depende de la profundidad crítica del flujo y de las características geométricas de la grada.

Con el umbral en el extremo aguas abajo de la cara horizontal de la grada (Figura 4.2.1), se forma un colchón de agua lo que incrementa la disipación de energía (André et. al., 2004a; Kökpınar, 2004). Sin embargo se han reportado conjuntamente con el colchón de agua, algunos problemas de

inestabilidad del flujo de agua. (Premstaller et. al., 2004; Thorwarth & Klein, 2005).

El agua que cae de una grada a otra lo hace sobre un colchón de agua que se forma ante la presencia del umbral en su extremo, lo que produce un resalto hidráulico dependiendo del caudal, altura de caída y tamaño del umbral. Otra característica del flujo en estas rápidas escalonadas con umbral, es que la caída de agua va de nivel a nivel, incrementándose la disipación de energía debido al choque del flujo con el umbral. A medida que aumenta el caudal y se alcanza flujo rasante, la grada con su respectivo umbral actúa como un elemento de fricción, y causa una fuerte mezcla de agua con aire y vórtices recirculantes

6.1 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL ESTUDIO

EXPERIMENTAL

4.2.1. REGIMENES DE FLUJO

El criterio de Ohtsu y Yasuda (1997) para distinguir entre los tres regímenes de flujo en un canal de gradas horizontales llanas (sin umbral), es aplicado para esta investigación de gradas con umbral.

Para el flujo grada a grada (nappe flow) una cavidad de aire puede ser encontrada sobre cada grada. El régimen de flujo en transición (transition flow) esta caracterizado por cavidades de aire y vórtices de aire recirculante atrapados en algunas gradas (Figura 4.2.1). En el régimen de flujo rasante (skimming flow), las cavidades de aire no existen y los vórtices recirculantes se encuentran sobre cada grada pero no son tan notorios.

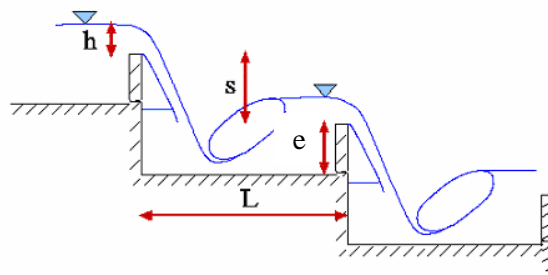


Figura 4.2.1. Rápida escalonada con umbral

Donde:

s — altura de la grada

h — carga de agua

L — longitud de la grada

e — altura del umbral

La figura 4.2.2 muestra los regímenes de flujo observados en estudios experimentales realizados con diferentes relaciones de altura de grada y umbral e (e/s), versus profundidad crítica y altura de grada, para diferentes inclinaciones del canal (André, 2004b; Chanson, 1996; Chanson, 2002; Ohtsu et al., 2004; Ohtsu & Yasuda, 1999). De la figura, se observa que es muy probable que los regímenes de flujo estén significativamente influenciados por la altura del colchón de agua.

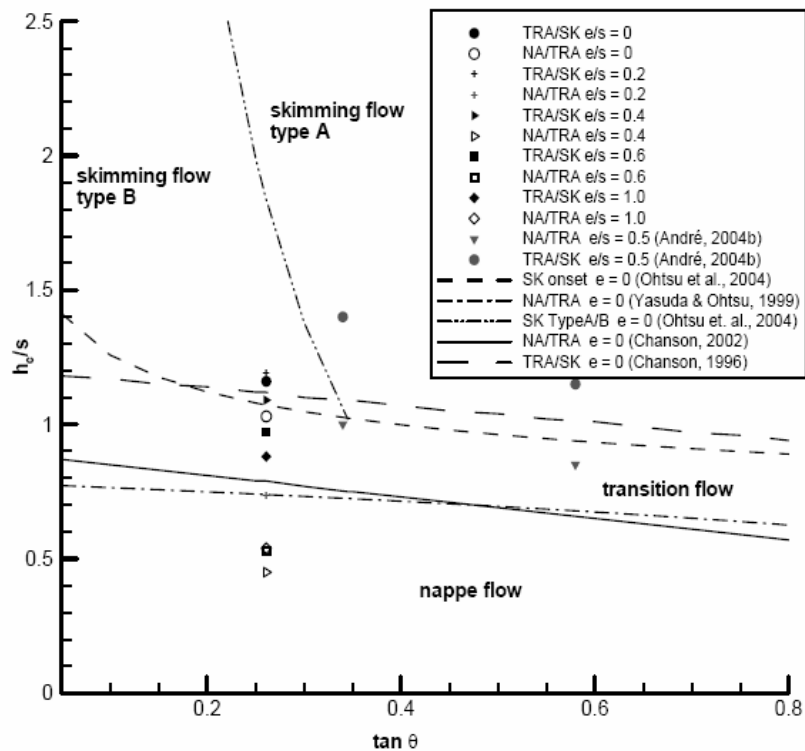


Figura 4.2.2

4.2.2. FLUJO UNIFORME

Para estimar la Resistencia al flujo, los cálculos deben ser realizados suponiendo flujo uniforme. Eso significa, que la fuerza de resistencia al flujo debe ser igual a la componente de la fuerza de gravedad en la dirección del flujo. Yasuda y Chanson (2003) propusieron medir las propiedades del flujo como velocidades, concentración media del aire C_{media} , calados en varios bordes de las gradas.

4.2.3. RESISTENCIA AL FLUJO

La Resistencia al flujo (Coeficiente de fricción de Darcy- Weisbach) es calculado con el calado neto de agua h_w usando la expresión

$$f_w = \frac{8 \cdot g \cdot b \cdot h_w^3 \cdot \sin \theta}{q^2 \cdot (b + 2 \cdot h_w)} \quad (4.2.1)$$

Con:

$$h_w = (1 - C_{media}) \cdot h_{90} \quad (4.2.2)$$

Desarrollado por Rajaratnam (1990) para flujo rasante en rápidas escalonadas; donde h_w es la profundidad de agua sin concentración de aire, y h_{90} es la profundidad característica de la mezcla con concentración local de aire $C=0.9$. El factor de fricción f_w versus profundidad crítica, para varias relaciones de e/s está representado en la figura 4.2.3. El gráfico muestra que el coeficiente de fricción es mayor para gradas con colchón de agua y es casi constante al aplicar umbrales. Para umbrales de $e/s = 0.4$, el coeficiente de fricción alcanza su máximo valor.

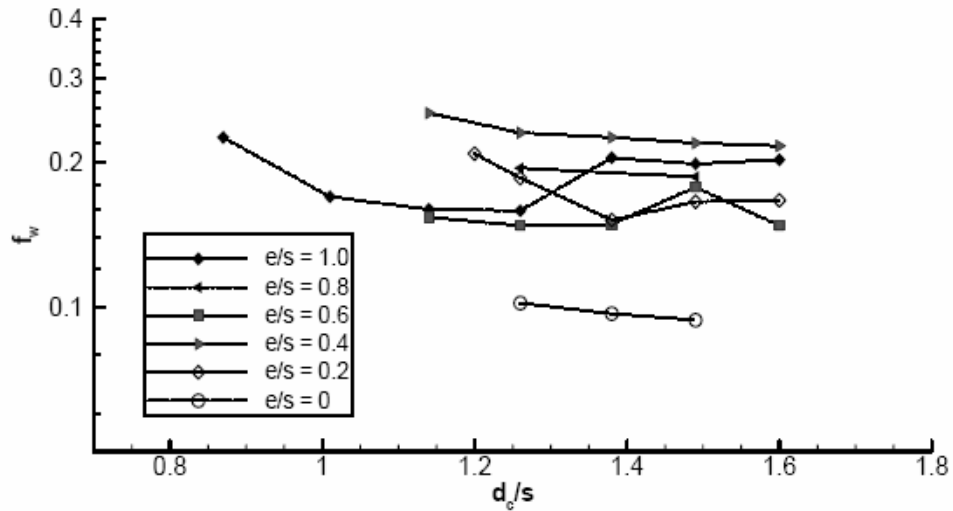


Figura 4.2.3. Resistencia al flujo para diferentes umbrales y descargas pequeñas d_e/s .

Los resultados de estudios experimentales muestran que los colchones de agua pueden aumentar significativamente la resistencia al flujo. Sin embargo, las inestabilidades de flujo se presentan a lo largo de toda la grada con umbral. Algunas presunciones, tales como el movimiento del resalto hidráulico, son sugeridas para explicar la causa de tales inestabilidades.

Ciertos autores recomiendan extender el estudio experimental de este tipo de configuración a canales con otra pendiente y diferentes umbrales para obtener una explicación precisa del fenómeno hidráulico y para proporcionar más datos que permitan calcular una fórmula empírica específica para el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach de esta nueva geometría.

4.2.4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

André, S. (2004b): High velocity aerated flows on stepped chutes with macro-roughness elements (*Communication 20*), Ed.: Prof. Dr. A. Schleiss. Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL: Lausanne. - ISSN 1661-1179

Boes, R. M.; Hager, W. H. (2003): Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. In: *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 9, pp. 661-670. - ISSN 0733-9429

Chanson, H. (1996): Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel. In: *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, Issue 3, pp. 421-429.

Chanson, H. (1988): A Study of Air Entrainment and Aeration Devices on a Spillway Model. (*Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand*).

Chanson, H. (2000): Discussion of “Characteristics of skimming flow over stepped spillways” by M. R. Chamani and N. Rajaratnam (*Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 4, 1999). In: *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 11, pp. 862-865. - ISSN 0733-9429

Chanson, H. (2002): The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways. Tokyo: Balkema. – ISBN 90-5809-352-2

Rajaratnam, N. (1990): Skimming Flow in Stepped Spillways. In: *Journal of Hydraulic*

Engineering, Vol. 116, No. 4, pp. 587-591. - ISSN 0733-9429 (Technische Normen, Nr. 109).

Yasuda, Y.; Ohtsu, I. (1999): Flow Resistance of Skimming Flow in Stepped Channels. In: *Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millenium: Proceedings of the XXVIII IAHR Biennial Congress, 22-27 August 1999, Graz, Austria*, Abstract Vol. / Ed. by M.N. Abbott [et al.]. Graz: TU, (Paper on CD-ROM). - ISBN 3-901351-34-5

4.3 PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LA ESTRUCTURA ESCALONADA CON UMBRALES UBICADOS EN EL EXTREMO DE LA CARA HORIZONTAL.

4.3.1 DISEÑO.

El análisis de la rápida escalonada de relación altura (h) / longitud (l) = 0.10 y seis gradas permitió obtener resultados sobre la capacidad de este tipo de estructuras para disipar energía. Ahora se procederá a modificar la estructura colocando umbrales en el extremo libre de la cara horizontal de cada uno de sus escalones, sin modificar las longitudes, la relación h/l, las estructuras de ingreso y salida del caudal, ni el número de gradas.

Debido a las limitaciones de altura de grada en el canal escalonado ensayado, se escogió solamente 1 altura de umbral (e) igual a la mitad de la altura de las gradas de este modelo. Figura 4.3.1.

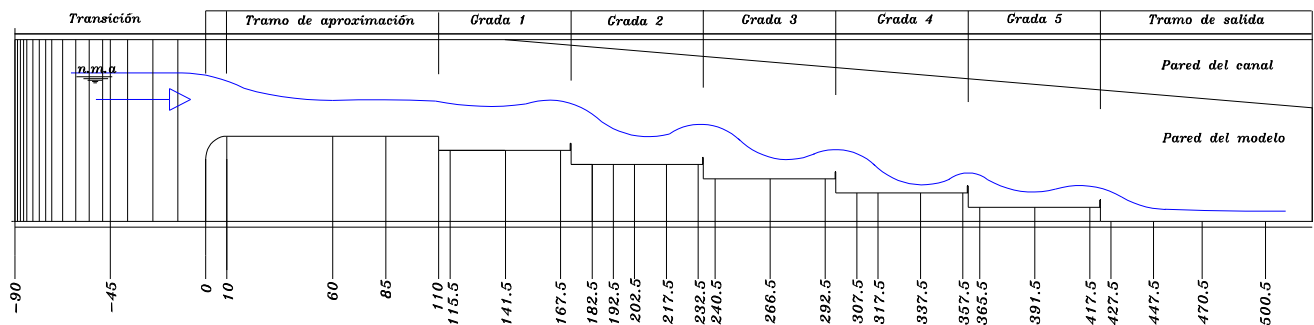


Figura 4.3.1

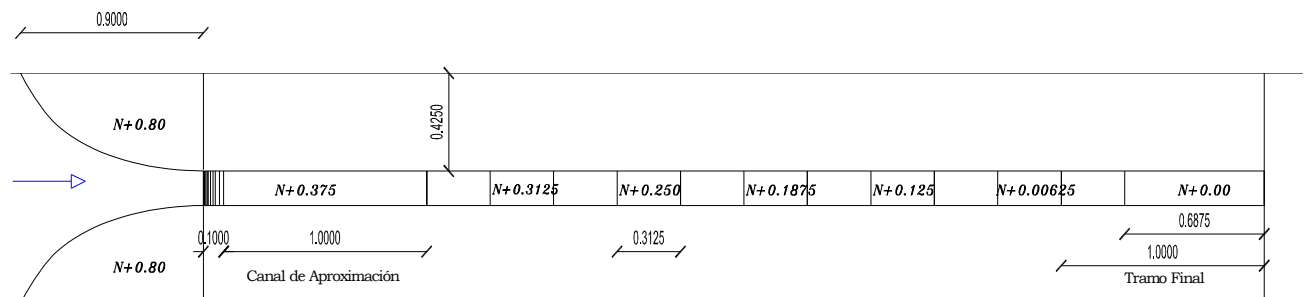


Figura 4.3.2

El prototipo tiene una relación $h/l = 0.10$, siendo h la altura del escalón (contrahuella) igual a 0.50 [m] y l la longitud (huella) igual a 5.00 [m].

Considerando la escala propuesta para el modelo de 1:8 se determina:

$$h_{\text{modelo}} = \frac{h_{\text{prototipo}}}{L} \quad (4.3.1)$$

$$h_{\text{modelo}} = 0.0625 \text{ [m]}$$

$$l_{\text{modelo}} = \frac{l_{\text{prototipo}}}{L} \quad (4.3.2)$$

$$l_{\text{modelo}} = 0.625 \text{ [m]}$$

$$e_{\text{modelo}} = 0.03125 \text{ [m]}$$

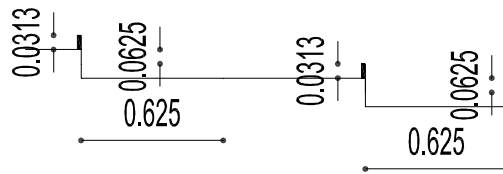


Figura 4.3.3.

El caudal máximo del prototipo (Q_p) es de 10 [m³/s], por lo tanto el caudal del modelo (Q_m) es de 0.055 [m³/s] ó 55 [lt/s]

El valor del caudal unitario (q) es: 0.3667 [m³/s/m]

El calado crítico (y_c) se mantiene con un valor de 0.24 [m]

4.3.2 CONSTRUCCIÓN

Una vez determinadas las dimensiones del modelo en la etapa de diseño, se procede a su construcción.

Materiales.

- Placas de acrílico de 0.03125 m x 0.15 m x 0,006 m.
- Silicón transparente ABRO 1200.

Equipo de mano.

- Lápiz, reglas y flexómetro.
- Nivel de mano de 50 [cm]
- Pistola para silicón.
- Acrílico líquido
- Escuadra
- Brocha.

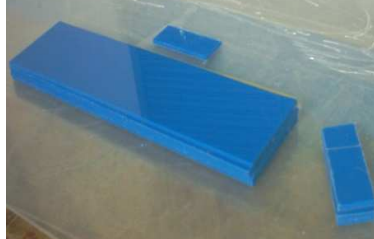
Maquinaria.

- Caladora eléctrica.

4.3.2.1 PROCEDIMIENTO

- Sobre la estructura con seis gradas se montaran los umbrales de $e = 0,03125$ [m] en el extremo libre de las mismas.

- Trazar y cortar las placas de acrílico, según las dimensiones establecidas (umbrales).



Fotografía 4.3.4

4.3.3 MONTAJE.

Construidos los elementos antes mencionados se procede al montaje sobre la estructura con seis escalones.

4.3.3.1 PROCEDIMIENTO

- Lijar los extremos libres de los escalones donde se ubicarán los umbrales para evitar posibles desprendimientos al momento que circulen los diferentes caudales de estudio.
- Con la ayuda de la escuadra y el nivel de mano montar los nuevos elementos sobre las gradas.



Fotografía 4.3.5

- Impermeabilizar las uniones con acrílico líquido y silicón para evitar filtraciones.

4.4. PLAN DE PRUEBAS PARA RÁPIDA ESCALONADA CON GRADA HORIZONTAL PARA LA RELACIÓN ALTURA (h) / LONGITUD (l), $h/l = 0.10$ CON UMBRALES UBICADOS EN EL EXTREMO DE LA CARA HORIZONTAL.

4.4.1 CAUDALES ENSAYADOS

El rango de caudales a ser ensayados para el canal hidrodinámico en posición horizontal es el mismo que se utilizó para estudiar las estructuras escalonadas anteriores. Es decir desde $1 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

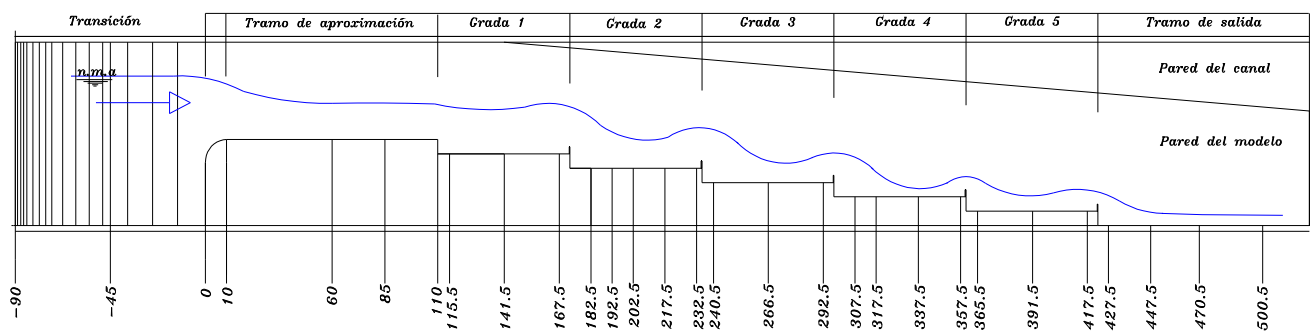
4.4.2 DETERMINACIÓN DE CALADOS Y PERFILES DE FLUJO

Al igual que en los casos anteriores se procederá a tomar datos de la altura de agua, con ayuda del limnómetro, a partir de la estructura de transición y a lo

largo de toda la rápida, tomando como cero del eje "x" al umbral del tramo de aproximación, para cada caudal.

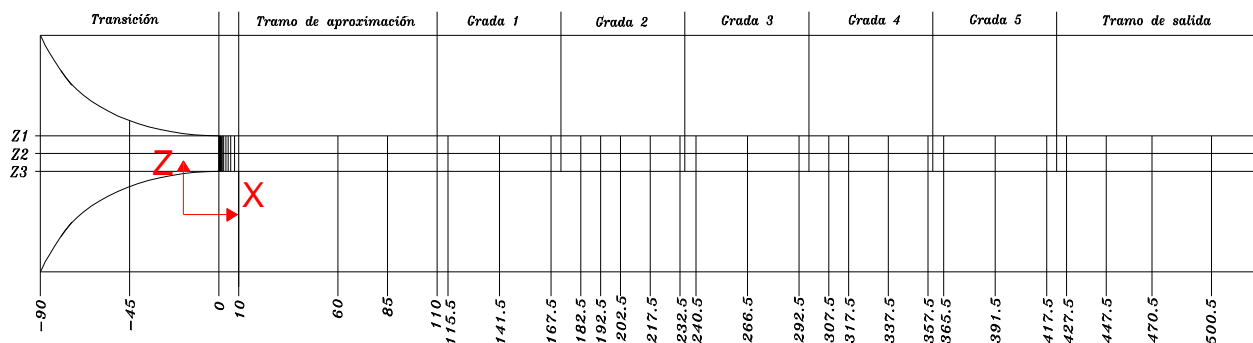
Las mediciones sobre del eje "x" serán tomadas perpendicularmente a la corriente de flujo y serán generalmente tres en cada grada, cuando estas no tengan tomas de piezómetros, e iguales al número de piezómetros ubicadas sobre la grada, cuando estés los tengan. Las secciones de medición de la altura del flujo o calados se indican en la figuras 4.4.1 y 4.4.2. Se debe insistir en que esta disposición podría variar según la necesidad de datos que se presente para un eficiente gráfico del perfil de flujo del caudal analizado.

En el eje "z", se tomarán tres mediciones de calados en el centro y en puntos cercanos a las paredes del canal, con el propósito de obtener un calado medio, cuando hay presencia de crestas significativas. (Figura 4.4.2).



VISTA EN CORTE

Figura 4.4.1



VISTA EN PLANTA

Figura 4.4.2

4.4.3 MEDICIONES DE CARGAS PIEZOMÉTRICAS

En la grada dos se colocaran cinco piezómetros, los tres primeros cada 10 cm. y a 15 cm. los dos últimos, en la grada cuatro se colocaran cuatro piezómetros la distancia para los dos primeros se mantiene y para los dos últimos cambia a 20 cm. Figura 4.4.3.

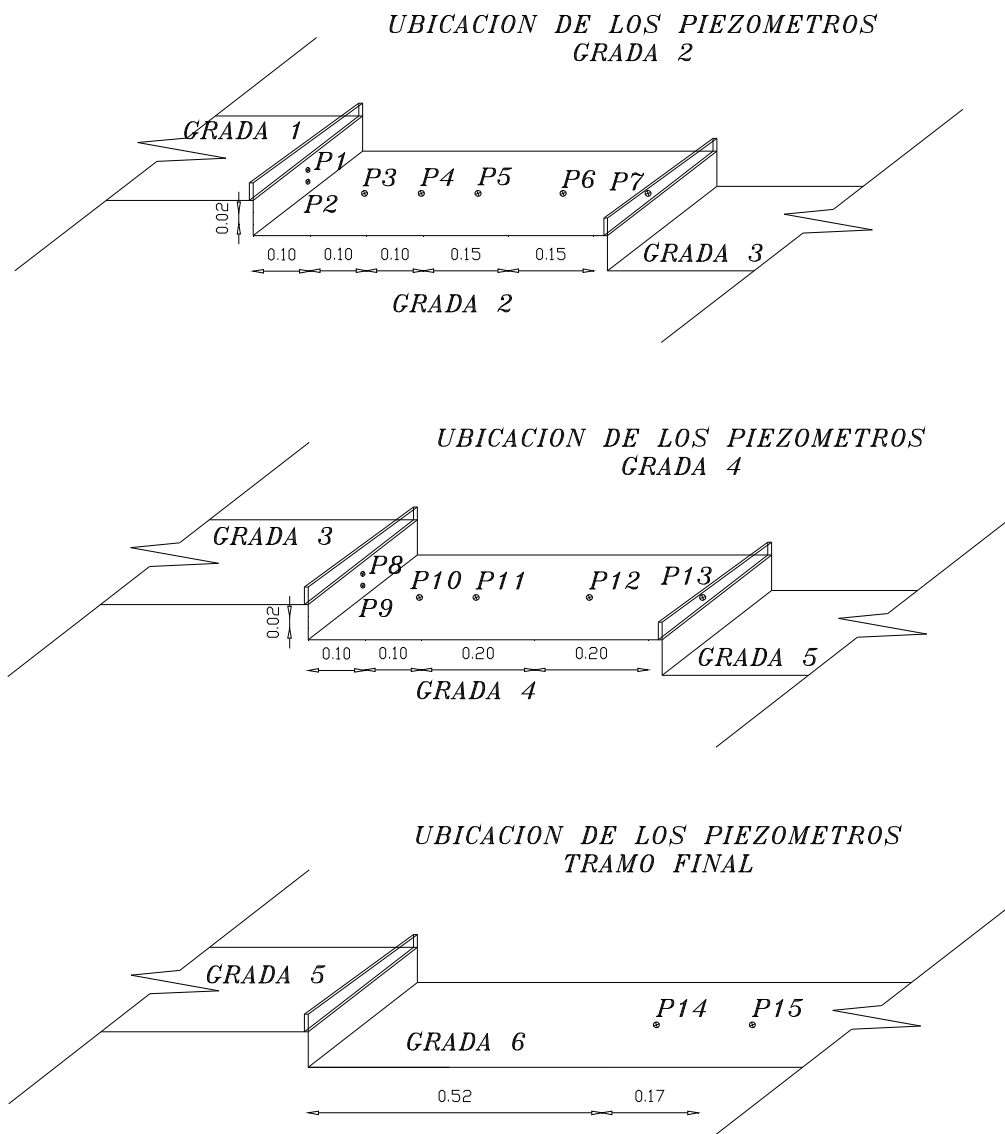


Figura 4.4.3

Sobre la contrahuella de los mismos escalones se instalaron dos tomas piezométricas a cada tercio de la altura y en la mitad del ancho de la grada. Figura 4.4.3

Se ubicaran además dos tomas piezométricas aguas abajo del extremo de la rápida, la primera en el sitio donde se puede desprender el flujo del fondo del canal y la segunda donde es flujo tienda a estabilizarse y su distribución sea hidrostática.

4.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

EXPERIMENTALES PARA GRADA HORIZONTAL CON UMBRAL.

Los nuevos datos, con sus respectivas observaciones sobre la rápida escalonada con umbrales, permiten agrupar los regímenes de flujo observados, en dos tipos: Flujo Grada a Grada para los caudales de $1\text{ m}^3/\text{s}$ a $5\text{ m}^3/\text{s}$ y Flujo Rasante desde $6\text{ m}^3/\text{s}$ hasta $10\text{ m}^3/\text{s}$.

En este capítulo se busca obtener datos que permitan comparar el grado de disipación de energía producido por la estructura escalonada de seis gradas con la disipación producida por la misma estructura pero con umbrales colocados en el extremo libre de su huella. El procesamiento de los datos para determinar los perfiles de flujo, distribución de cargas de presión y disipación de energía, es el mismo que para la estructura de seis escalones, por lo que no se realizarán ejemplos sobre los mismos sino que se presentará únicamente el análisis de los resultados obtenidos.

4.5.1. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO GRADA A GRADA

Como ya se ha indicado y justificado, para efectos del procesamiento de datos y determinar perfiles de flujo y porcentaje de disipación de energía a lo largo de la rápida escalonada, se agrupan los cinco primeros caudales ensayados como flujo grada a grada, incorporando los caudales que en la práctica corresponden al flujo en transición.

A continuación se desarrolla un ejemplo de cálculo para $Q = 2\text{ m}^3/\text{s}$, cuyo procedimiento para determinar perfiles de flujo y porcentaje de disipación de energía es similar para los caudales 1, 3, 4 y $5\text{ m}^3/\text{s}$.

4.5.1.1 PERFIL DE FLUJO

Como ya se ha mencionado el Perfil de Flujo se obtiene con la ayuda del Limnómetro, deslizándolo a lo largo del modelo y tomando medidas transversales del flujo en ambos extremos y en el centro (Figura 4.5.1). Los datos obtenidos para este caudal pueden ser observados en la Tabla 4.5.1.a.

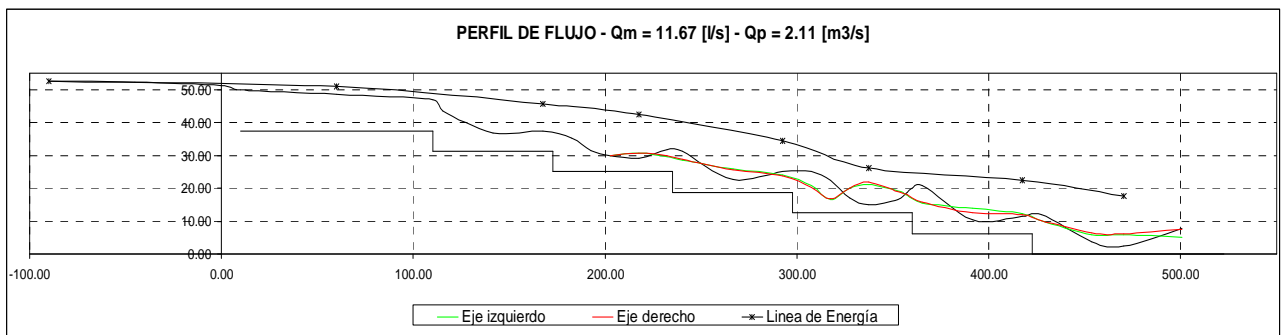


Figura 4.5.1. Perfil de Flujo para $Q_m = 11.67$ [l/s] - $Q_p = 2.11$ [m³/s]

Elemento	N°	x [cm]	y fondo	yr(izq) [cm]	yr(cent)	yr(der)	h [cm]	h [m]
			promedio				carga	carga
Transición	1	-90.00	1.94		54.27		52.33	0.523
	2	-45.00	1.94		54.19		52.25	0.523
	3	0.00	1.94		53		51.06	0.511
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	39.86		51.69		11.83	0.118
Tramo aprox. (1.0 m)	5	60.00	39.74		49.2		9.46	0.095
	6	85.00	39.74		49.1		9.36	0.094
	7	110.00	39.74		46.83		7.09	0.071
Grada 1	8	115.50	33.38		45.4		12.02	0.120
	9	141.50	33.38	38.65	38.65	38.65	5.27	0.053
	10	167.50	33.38	41.73	41.5	42.67	8.59	0.086
Grada 2	11	182.50	27.04	44.2	40.6	43.25	15.64	0.156
	12	192.50	27.04	37.85	40.74	36.7	11.39	0.114
	13	202.50	27.04	33.93	33.1	33.4	6.44	0.064
	14	217.50	27.04	32.1	30.34	35.08	5.47	0.055
	15	232.50	27.04	36.45	36.45	36	9.26	0.093
Grada 3	16	240.50	20.79	39.6	39.6	38.37	18.40	0.184
	17	266.50	20.79	29	26	26	6.21	0.062
	18	292.50	20.79	34.1	34.1	35.396	13.74	0.137
Grada 4	19	307.50	14.68	29.76	30.1	32	15.94	0.159
	20	317.50	14.68	21.7	21.8	24.58	8.01	0.080
	21	337.50	14.68	24	23.7	23.5	9.05	0.091
	22	357.50	14.68	27.9	27.4	26.93	12.73	0.127

Tabla 4.5.1.a. Calados medidos y promedio en las secciones transversales a lo largo de la rápida

Donde:

y (izq), y (cent), y (der),: Calados medidos sobre una sección transversal del flujo (eje z de la figura 4.4.2)

h: Calado promedio en una sección transversal de la rápida menos la altura del fondo (Carga de Agua)

$$h = \frac{\sum_{i=1}^3 h_i}{3} - y_{\text{fondo}} \quad (4.5.1)$$

Para efectos de cálculo se tomará como ejemplo los valores obtenidos para $x = 217.5$ cm. La totalidad de los cálculos se encuentra en el Anexo 5.a.

$$y \text{ (izq)} = 0.321 \text{ m}$$

$$y \text{ (cent)} = 0.3034 \text{ m}$$

$$y \text{ (der)} = 0.3508 \text{ m}$$

$$y \text{ fondo} = 0.2704 \text{ m}$$

Entonces:

$$h = 0.055 \text{ [m]}$$

**4.5.1.2 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA
ECUACIÓN 4.2.4.**

Donde:

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\frac{3}{2 \cdot \sqrt{2}} + \sqrt{\frac{h_{\text{escalón}}}{y_c} + \frac{3}{2}}}$$

$$h_{\text{escalón}} = 0.0625$$

$$Y_c = 0.085 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$\lambda = 0.55$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} = 1 - \frac{\lambda + \frac{1}{2} \cdot \lambda^{-2}}{\frac{h_{\text{vertedor}}}{y_c} + \frac{3}{2}}$$

Donde:

$$h_{\text{vertedor}} = 0.375$$

$$Y_c = 0.085 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} = 0.63$$

$$\Delta E[\%] = \frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} \times 100$$

$$\Delta E[\%] = 62.98$$

4.5.1.3 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.

El grado de disipación de energía que se presenta en la estructura, será calculado mediante la ecuación de Bernoulli aplicada a una línea de corriente que va por el eje del fondo del canal escalonado, siendo la sección inicial la (0) y la final la (6) de la figura 4.5.2.

Los valores calculados se indican en la tabla 4.5.2.a y se presenta un ejemplo de cálculo entre la sección (0) y la sección (6)

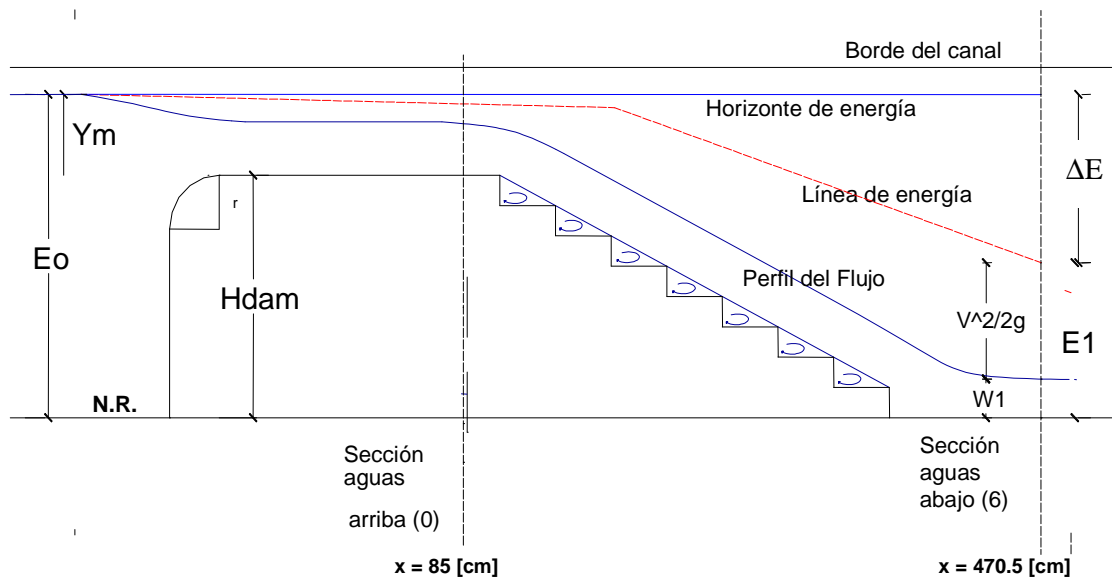


Figura 4.5.2

Elemento	x [cm]	h [m]	V [m/s]	z [m]	V ² /2g [m]	Energía	
		carga					
Transición	-90.00	0.523					
	-45.00	0.523	0.149	0.375	0.00113		0.504
	0.00	0.511					
Curva (r = 10 cm)	10.00	0.118	0.658				
Tramo aprox. (1.0 m)	60.00	0.095					
	85.00	0.094	0.831	0.375	0.035219	E0	0.504
	110.00	0.071					
Grada 1	115.50	0.120					
	141.50	0.053	1.476	0.313	0.1111	E1	0.476
	167.50	0.086					
Grada 2	182.50	0.156					
	192.50	0.114					
	202.50	0.064					
	217.50	0.055	1.423	0.25	0.10325	E2	0.408
	232.50	0.093					
Grada 3	240.50	0.184					
	266.50	0.062					
	292.50	0.137	0.566	0.188	0.016339	E3	0.341
Grada 4	307.50	0.159					
	317.50	0.080					
	337.50	0.091	0.859	0.125	0.037646	E4	0.253
	357.50	0.127					
Grada 5	365.50	0.175					
	391.50	0.063					
	417.50	0.134	0.582	0.063	0.017287	E5	0.213
Tramo salida (1.0 m)	427.50	0.180					
	447.50	0.061					
	470.50	0.057	1.367	0	0.095192	E6	0.152
	500.50	0.052					

Tabla 4.5.2.a. Cargas de agua, posición, velocidad y energía calculada (Anexo 5.a)

Sección (0), localizado en el punto x = 85 [cm], sobre el canal de aproximación:

$$E_o = z_o + h_o + \frac{v_o^2}{2g} \quad (4.5.2)$$

Donde:

E_o = carga Energética en la sección (0)

$\frac{V_o^2}{2g}$ = Carga de velocidad en la sección (0)

$$\frac{V_o^2}{2g} = 0.0352$$

h_o = carga de agua

$$h_o = 0.094 \text{ [m]}$$

Z_o = Carga de posición en la sección (0)

$$Z_o = 0.375 \text{ [m]}$$

Reemplazando:

$$E_o = 0.375 + 0.094 + 0.0352$$

$$E_o = 0.504$$

Sección (6), aguas abajo del pie de la rápida.

$$E_6 = z_6 + h_6 + \frac{V_6^2}{2g} \quad (4.5.3)$$

Donde:

h_6 = carga de agua en la sección (6)

$$h_6 = 0.057 \text{ m}$$

$$\frac{V_6^2}{2g} = \text{Carga de velocidad en la sección (6)}$$

$$\frac{V_6^2}{2g} = 0.0951 \text{ m}$$

$$Z_6 = \text{Carga de posición en la sección (0)}$$

$$Z_{61} = 0 \rightarrow \text{tramo final}$$

Reemplazando:

$$E_6 = 0.057 + 0.095$$

$$E_6 = 0.152 \text{ m}$$

Entonces el porcentaje de energía disipada es:

$$\Delta E = \left(\frac{E_0 - E_1}{E_0} \right) \cdot 100\% \quad (4.5.4)$$

$$\Delta E = 69.84\%$$

En la tabla 4.5.2.a se indican además los valores de la carga energética remanente en cada grada tomando las secciones hidráulicas en las abscisas "x" indicadas, donde se observó que el flujo tiene líneas de corriente paralelas al fondo.

4.5.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA FLUJO RASANTE

El procedimiento de cálculo, se realizará para un caudal prototipo de 7 [m³/s], el cual se aplicará de manera similar a los ensayos realizados para los caudales en régimen rasante, indicados anteriormente, en la rápida escalonada de $h/l = 0.10$

4.5.2.1 PERFIL DE FLUJO

El perfil de flujo será determinado obteniendo el calado de agua promedio a partir de las mediciones realizadas con el limnómetro. (Anexo 5.a)

Elemento	N o	x [cm]	y fondo	yr(izq)	yr(cent)	yr(der)	h	h [m]
			promedio	z [cm] =	z [cm] =	z [cm] =	carga	carg
Transición	1	-90.00	1.94		71.34		69.40	0.694
	2	-45.00	1.94		70.8		68.86	0.689
	3	0.00	1.94		67.96		66.02	0.660
Curva (r = 10 cm)	4	10.00	39.86		66.14		26.28	0.263
Tramo aprox. (1.0 m)	5	60.00	39.74		59.14		19.40	0.194
	6	85.00	39.74		57.85		18.11	0.181
	7	110.0	39.74		56.61		16.87	0.169
Grada 1	8	115.5	33.38		55.56		22.18	0.222
	9	141.5	33.38		51.66		18.28	0.183
	1	167.5	33.38	52.08	52.08	52.08	18.70	0.187
Grada 2	1	182.5	27.04	55.63	56.52	56.47	29.48	0.295
	1	192.5	27.04	56	57.84	55.26	30.80	0.308
	1	202.5	27.04	54.91	51.21	52.53	24.17	0.242
	1	217.5	27.04	50.9	49.44	48.61	22.40	0.224
	1	232.5	27.04	45.51	45.12	46.5	18.08	0.181
Grada 3	1	240.5	20.79	44.8	43.74	45.91	24.03	0.240
	1	266.5	20.79	37.78	39.74	39.12	18.09	0.181
	1	292.5	20.79	40.16	35.97	38.2	17.32	0.173
Grada 4	1	307.5	14.68	42.82	41.93	43.3	28.00	0.280
	2	317.5	14.68	42.12	43.86	43.09	28.34	0.283
	2	337.5	14.68	36.7	38.78	37.68	23.04	0.230
	2	357.5	14.68	32.87	32.1	33.47	18.13	0.181
Grada 5	2	365.5	8.49	32.08	31.36	31.65	23.21	0.232
	2	391.5	8.49	26.06	25.33	25.2	17.04	0.170
	2	417.5	8.49	26.75	25.02	27.2	17.83	0.178
Tramo salida (1.0 m)	2	427.5	1.83	29.26	27.83	29.51	27.04	0.270
	2	447.5	1.83	28.48	28.72	28.07	26.59	0.266
	2	470.5	1.83	19.61	20.02	19.38	17.84	0.178
	2	500.5	1.83	15.24	14.61	15.33	13.23	0.132

Tabla 4.5.1.b Calados medidos y promedio en las secciones transversales a lo largo de la rápida
($Q_p=7.05$ [m³/s])

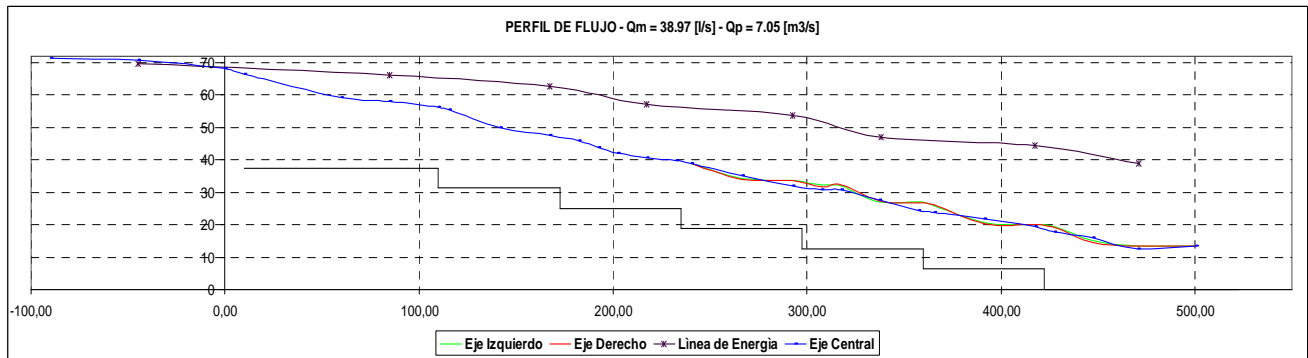


Figura 4.5.3 Perfil de Flujo para $Q_m = 38.7 \text{ [l/s]}$ - $Q_p = 7.05 \text{ [m}^3\text{/s]}$ (Anexo 5.a)

Donde:

Y_{izq} , Y_{cent} , Y_{der} : calados medidos en cada sección transversal del flujo (eje "z").

h = Calado promedio en cada sección transversal analizada de la rápida.

$$h = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i}{3} - y_{fondo}$$

► Para el ejemplo se selecciona la abscisa: $x = 337.50 \text{ cm}$

$$Y_{izq} = 0.367 \text{ m}$$

$$Y_{cent} = 0.3878 \text{ m}$$

$$Y_{der} = 0.3768 \text{ m}$$

$$Y_{fondo} = 0.1468 \text{ m}$$

$$\text{Entonces: } h = 0.23 \text{ m}$$

4.5.2.2. CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Aplicando la ecuación 4.2.5 indicada en el capítulo 4 se tiene:

$$Q_p = 7.05 \text{ [m}^3\text{/s]} \rightarrow Q_m = 0.0389 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$H_{\text{dam}} = 0.375 \text{ m}$$

$$\theta = 5.71^\circ$$

$$Y_c = 0.19 \text{ [m]}$$

$h_{\text{pie}} = 0.178 \text{ m}$ (Carga piezométrica considerando flujo uniforme en el pie de la rápida)

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Velocidad calculada: 1.47 m/s

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot Y_c \cdot \text{sen} \theta}{V^2} \quad (4.2.6)$$

Reemplazando:

$$f_{\text{pie}} (\text{calculado}) = 0.65$$

Entonces:

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{m}á\text{x}}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \text{Sen} \theta}\right)^{\frac{1}{3}} \text{Cos} \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \text{Sen} \theta}\right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{H_{\text{dam}}}{Y_c} + \frac{3}{2}} \quad (4.2.5)$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{m}á\text{x}}} \cdot 100 = \Delta E$$

Reemplazando los valores anteriores tenemos que el grado de disipación de energía es:

$$\Delta E(\text{ecuación 4.2.5}) = 56.72\%$$

4.5.2.3 CÁLCULO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.

El grado de disipación de energía que se presenta en la estructura, será calculado mediante la ecuación de Bernoulli aplicada a una línea de corriente que va por el eje del fondo del canal escalonado, siendo la sección inicial la (0) y la final la (6).

Elemento	x [cm]	h [m]	V [m/s]	z [m]	V ² /2g [m]	Energía	
		carga					
Transición	-90.00	0.694					
	-45.00	0.689	0.377	0.375	0.007256		
	0.00	0.660					
Curva (r = 10 cm)	10.00	0.263	0.989				
Tramo aprox. (1.0 m)	60.00	0.194					
	85.00	0.181	1.435	0.375	0.104908	E0	0.661
	110.00	0.169					
Grada 1	115.50	0.222					
	141.50	0.183					
	167.50	0.187	1.389	0.313	0.098393	E1	0.598
Grada 2	182.50	0.295					
	192.50	0.308					
	202.50	0.242					
	217.50	0.224	1.160	0.25	0.068573	E2	0.543
	232.50	0.181					
Grada 3	240.50	0.240					
	266.50	0.181					
	292.50	0.173	1.500	0.188	0.114697	E3	0.475
Grada 4	307.50	0.280					
	317.50	0.283					
	337.50	0.230	1.128	0.125	0.064816	E4	0.420
	357.50	0.181					
Grada 5	365.50	0.232					
	391.50	0.170					
	417.50	0.178	1.457	0.063	0.108188	E5	0.349
Tramo salida (1.0 m)	427.50	0.270					
	447.50	0.266					
	470.50	0.178	1.456	0	0.108108	E6	0.287
	500.50	0.132					

Tabla 4.5.2.b Disipación de Energía con la ecuación de Bernoulli. (Anexo 5.a)

► Sección en el Canal de Aproximación a la rápida (0):

$$E_o = z_o + h_o + \frac{V_o^2}{2g}$$

E_o = carga Energética en la sección (0)

$\frac{V_o^2}{2g}$ = Carga de velocidad en la sección (0)

$$\frac{V_o^2}{2g} = 0.105$$

h_o = carga de agua

$$h_o = 0.181$$

Z_o = Carga de posición en la sección (0)

$$z_o = 0.375$$

Reemplazando:

$$E_o = 0.375 + 0.181 + 0.105$$

$$E_o = 0.661$$

► Sección (6), aguas abajo del pie de la rápida:

$$E_6 = z_6 + h_6 + \frac{V_6^2}{2g}$$

Donde:

h_6 = carga de agua en la sección (6)

$$h_6 = 0.178$$

$\frac{V_6^2}{2g}$ = Carga de velocidad en la sección (6)

$$\frac{V_6^2}{2g} = 0.108 \text{ m}$$

Z_6 = Carga de posición en la sección (6)

$$Z_6 = 0 \rightarrow \text{tramo final}$$

Reemplazando:

$$E_6 = 0 + 0.108 + 0.178$$

$$E_6 = 0.287$$

Por lo tanto:

$$\Delta E = \left(\frac{E_0 - E_6}{E_0} \right) \cdot 100\%$$

$$\Delta E = 56.58\%$$

En la tabla 4.5.2.b se indican además los valores de la carga energética remanente en cada grada tomando las secciones hidráulicas en las abscisas x indicadas, donde se observó que el flujo tiene líneas de corriente paralelas al fondo.

4.5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA.

4.5.3.1. PERFIL DE FLUJO.

Posterior a obtener los resultados para los caudales ensayados que presentan régimen grada a grada se procede con su análisis y discusión. (Anexo 5.a)

El flujo grada a grada que se presenta en este modelo se forma desde el caudal inicial de $1.04\text{m}^3/\text{s}$ hasta $6\text{m}^3/\text{s}$. (Fotografía 4.5.4).



Fotografía 4.5.4

Para el caudal de $1.04\text{m}^3/\text{s}$, las cavidades con aire presentes entre la huella y contrahuella de cada escalón se pueden observar a lo largo de toda la estructura, las mismas que van desapareciendo poco a poco hasta aparecer solo a partir de la cuarta grada para el último caudal en régimen grada a grada ($6\text{m}^3/\text{s}$).

Las primeras crestas centrales y en paredes aparecen a partir del caudal prototipo de 2 m³/s al final de la grada 1 y se mantienen para los caudales siguientes. (Fotografía 4.5.5)

Se observa que al aplicar los umbrales sobre la cara horizontal de los escalones se producen resaltos hidráulicos claramente visibles sobre la segunda mitad de los escalones, producidos por la elevación del perfil de flujo originada por el umbral. (Fotografía 4.5.6)

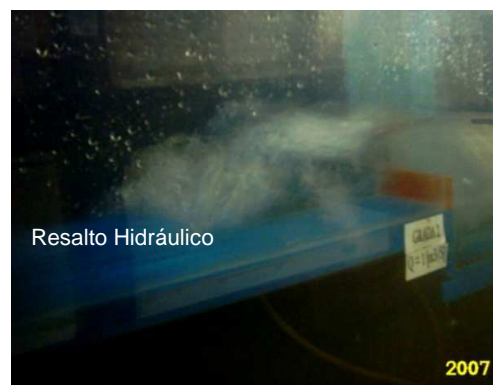
Al aumentar el caudal, los resaltos hidráulicos van desapareciendo, es decir se forman cada vez más a la salida de la estructura, a partir de la primera grada para el $Q_p=1$ m³/s hasta desaparecer totalmente para el caudal prototipo de 4 m³/s.

La presencia de salpicaduras es notoria para todos los caudales en régimen de flujo grada a grada. (Fotografía 4.5.7)

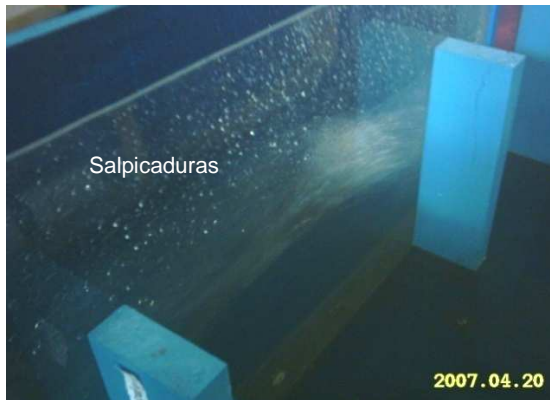
Es importante anotar que a partir del caudal prototipo de 4 m³/s hay la presencia de cavidades de aire en la huella de los escalones, además de en la contrahuella, debido a que los umbrales provocan la elevación del perfil de flujo, lo que permite el ingreso del aire. (Fotografía 4.5.8)



Fotografía 4.5.5



Fotografía 4.5.6



Fotografía 4.5.7



Fotografía 4.5.8.

4.5.3.2 DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Después de procesar los datos de la fase experimental se determinaron los siguientes valores de disipación de energía entre $x_o = 85$ cm (canal de aproximación) y $x_f = 470.5$ cm (tramo de salida) (tabla 4.5.3.a). Para este análisis se utilizaron las ecuaciones analíticas 4.2.3 y 4.2.4, correspondiente al capítulo 4, e indicadas en el anexo respectivo. (Anexo 5.b).

Q_m [lt/s]	Q_m [m ³ /s]	Q_p [m ³ /s]	q_{unitario}	y_c [m]	$E_{\text{mín}}$ [m]	λ	$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}}$	ΔE [%]	y_c / h	Régimen de Flujo
5.719	0.0057	1.04	0.038	0.053	0.079	0.524	0.727	72.70	0.85	Escalón a Escalón
11.671	0.0117	2.11	0.078	0.085	0.128	0.553	0.630	62.98	1.36	Escalón a Escalón
16.719	0.0167	3.03	0.111	0.108	0.162	0.565	0.571	57.10	1.73	Escalón a Escalón
22.612	0.0226	4.09	0.151	0.132	0.198	0.574	0.517	51.71	2.12	Escalón a Escalón
27.261	0.0273	4.93	0.182	0.150	0.225	0.578	0.482	48.20	2.40	Escalón a Escalón

Tabla 4.5.3.a Porcentaje de disipación de energía para régimen Escalón a Escalón.

Por otro lado, aplicando la ecuación de Bernoulli, en la sección aguas arriba y aguas abajo al pie de la rápida, y para las mismas relaciones de Y_c/h , se obtienen los resultados indicados en la tabla .a:

Qm	Qm	Qp	Eo	Ef	ΔE [%]
[lt/s]	[m3/s]	[m3/s]			
5.719	0.0057	1.04	0.456	0.118	74.12
11.671	0.0117	2.11	0.504	0.152	69.84
16.719	0.0167	3.03	0.537	0.2	62.76
22.612	0.0226	4.09	0.574	0.228	60.28
27.261	0.0273	4.93	0.600	0.247	58.83

Tabla 4.5.4.a Porcentaje de disipación de energía para régimen Escalón a Escalón.

Yc / h	0,85	1,36	1,73	2,12	2,40
ΔE_c . Bernoulli (%)	74,12	69,84	62,76	60,28	58,83
ΔE_c . Analítica (%)	72,70	62,98	57,10	51,71	48,20

Tabla 4.5.5.a. Comparación de la Variación del porcentaje de disipación de energía en función de la relación Yc / h para la Ecuación de Bernoulli y la Ecuación 4.2.3.

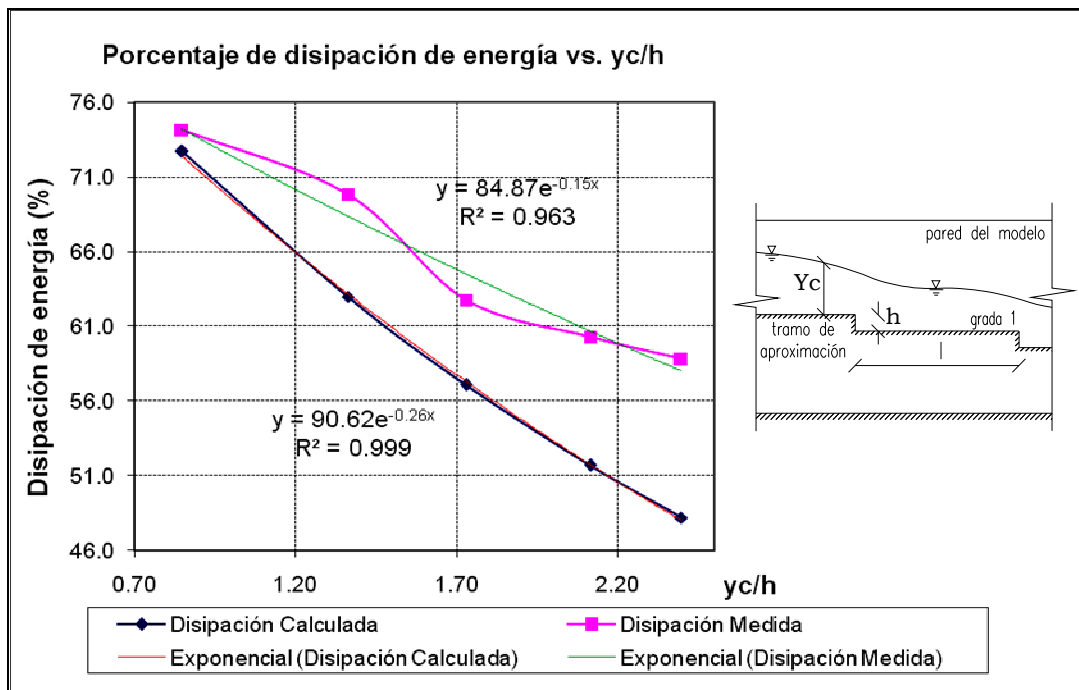


Figura 4.5.9. Comparación de la variación del porcentaje de disipación de energía en función de la relación Y_c / h para el rango de caudales mostrado en la tabla 4.5.a. Línea de tendencia de cada variación (Anexo 5b)

4.5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE

4.5.4.1 PERFIL DE FLUJO.

Posterior a las observaciones realizadas en el laboratorio y la obtención de los perfiles de flujo de cada caudal, se puede distinguir que a partir del caudal $Q_p = 6$ [m³/s] se presenta un perfil de flujo prácticamente en régimen rasante, porque se presentan pequeñas cavidades de aire hasta el final del modelo, las mismas que para el siguiente caudal ya no existen y el flujo rasante es más notorio siendo continuando así hasta el $Q_p = 10$ [m³/s] (Anexo 5.a)

En el flujo rasante se observó que las cavidades de aire que generalmente se localizan en la unión de la huella y contrahuella desaparecen completamente, y que al incrementar el caudal hasta el máximo en prototipo ($Q_p = 10$ m³/s), se forman perfiles de flujo más uniformes (Fotografía 4.5.10).



Fotografía 4.5.10

En el caudal prototipo de 6 [m³/s] se observa que el perfil de flujo tiende a estabilizarse a pesar de la influencia de los tabiques que levantan el flujo al final de las gradas 2, 4 y 6, esta variación es uniforme y no se producen crestas significativas. A partir de la grada 4 se producen pequeñas salpicaduras hasta el final del modelo y pequeñas cavidades de aire en las últimas gradas. (Fotografía 4.5.11).

Las salpicaduras para los demás caudales en flujo rasante se presentan aguas más abajo de la mitad del modelo.

Por la altura que alcanzan las crestas al final de grada, cuando chocan con el tabique, se produce el ingreso de aire al flujo y se forman vórtices de aire recirculante en la huella de la grada. (Fotografía 4.5.12).

Las crestas centrales y en paredes que se forman a lo largo del flujo no son influyentes en la configuración del perfil ya que es más notoria su uniformidad en conjunto.



Fotografía 4.5.11



Fotografía 4.5.12

Cabe señalar que a pesar que el tabique se sumerge mas a medida que el caudal aumenta, su influencia es notoria hasta el caudal prototipo máximo de 10 [m³/s], como ya se explico esto provoca el levantamiento del flujo y la formación de vórtices en la huella.

4.5.4.2. DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Después de obtener todos los datos de variables necesarias en el laboratorio, se realiza el cálculo para determinar el grado de disipación de energía que proporciona la grada. Los resultados se obtienen aplicando la ecuación de Bernoulli y la ecuaciones analíticas indicadas en el capítulo 2: 2.2.5 y 2.2.6, entre una sección en el canal de aproximación ubicada a 85 cm. desde el inicio del modelo y en el tramo de salida a 470.5 cm. (Anexo 5.c):

Qm	Qm	Qp	yc / h	ΔE [%]		Régimen de Flujo
				Ecuación	Ecuación	
				Bernoulli	Analítica	
[lt/s]	[m3/s]	[m3/s]			V. calculada	
33.17	0.03	6.00	2.73	58.07	58.13	Rasante
38.97	0.04	7.05	3.04	56.58	56.72	Rasante
44.47	0.04	8.05	3.32	54.44	54.47	Rasante
49.93	0.05	9.04	3.59	52.53	52.60	Rasante
55.77	0.06	10.10	3.86	50.00	50.11	Rasante

Tabla 4.5.3.b. Porcentaje de disipación de energía para cada caudal. Ecuación de Bernoulli y ecuación analítica utilizando velocidades calculadas con el calado para h/l = 0.1.

La ecuación 2.2.5, utilizada para el cálculo del porcentaje de disipación de energía, tiene como una de sus variables el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach “f”, que de igual manera que para los casos anteriores ya analizados, se utilizó el valor que se obtiene con los datos de calado y velocidad determinados en el último escalón (Anexo 5.c). La ecuación utilizada para obtener el “f” de este análisis es la 2.2.6 detallada en el capítulo 2, la misma que permite obtener solo valores aproximados del coeficiente de fricción ya que para obtener valores más exactos de “f” se debería aplicar la ecuación 4.2.1 del numeral 4.2.3 de este capítulo, pero dicha fórmula se basa en el valor de la profundidad de agua sin concentración de aire “ h_w ” que a su vez debe ser calculado a partir de las variables: concentración media de aire “ C_{media} ” y “ h_{90} ” que es la profundidad de la mezcla con concentración local de aire $C=0.90$ (Ecuación 4.2.2) que son parámetros que no fueron medidos en el laboratorio

ya que no se dispone del instrumental necesario. De todos modos los valores de “f” obtenidos con la ecuación 4.2.6 son lo suficientemente válidos para poder obtener la disipación de energía, lo que se demuestra al comparar sus resultados con los obtenidos a partir de la ecuación de Bernoulli con datos medidos en el laboratorio que permite observar que los resultados son muy semejantes entre sí.

La variación del coeficiente de fricción para los caudales en régimen de flujo rasante analizados en este capítulo se presenta en la siguiente tabla:

Qm	Qp	carga yp	V. Calculada	f calculado
[m³/s]	[m³/s]	[m]	[m/s]	
0.0332	6.00	0.143	1.55	0.47
0.0390	7.05	0.178	1.47	0.65
0.0445	8.05	0.192	1.54	0.63
0.0499	9.04	0.209	1.59	0.64
0.0558	10.10	0.212	1.76	0.54

Tabla 4.5.4.b. Coeficientes de fricción

A continuación se presenta gráficamente la variación del porcentaje de disipación de energía producida en esta rápida escalonada según los ensayos realizados con la variación de caudales mostrada en la tabla 4.5.3.b, para flujo rasante. (Anexo 5c.)

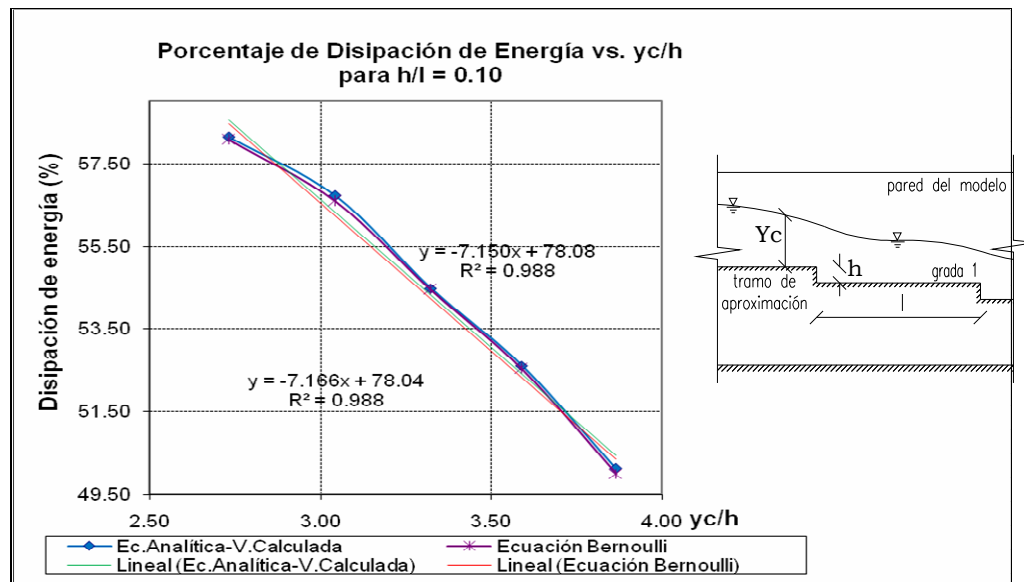


Figura 4.5.13 (Anexo 5.c)

Se observa que la tendencia de variabilidad de la disipación de energía, es semejante para los dos cálculos realizados, por lo que la variación de las líneas de tendencia también es similar. (Figura 4.5.13).

4.6 CONCLUSIONES

4.6.1 RÉGIMEN EN FLUJO GRADA A GRADA – CONCLUSIONES

- ▶ El perfil de flujo que se observa para el modelo con umbrales en el régimen de flujo grada a grada tiene características totalmente diferentes a las de los modelos anteriores, ya que presenta muchas irregularidades, con pronunciadas elevaciones en la zona donde se ubican los umbrales que originan grandes impactos sobre la huella siguiente (aguas abajo) que a la vez originan pronunciadas depresiones en el perfil. De la misma manera por la influencia del cruce de las líneas de flujo se presentan crestas centrales y laterales (en paredes), relativamente más notorias que para las estructuras anteriores, lo que provoca salpicaduras de hasta el doble de la altura de la grada más el umbral.
- ▶ Al colocar umbrales en el extremo libre de la huella de los escalones el flujo produce resaltos hidráulicos para los primeros cuatro caudales, los

que tienen gran influencia en el alto grado de disipación que se alcanza con este modelo y para estos caudales.

- ▶ Se observa la presencia de cavidades con aire y flujo recirculante tanto en la huella como en la contrahuella de los escalones para todos los caudales a partir del caudal prototipo de 4 m³/s, debido a que los umbrales provocan la elevación del perfil de flujo permitiendo el ingreso del aire. Este hecho influye en gran medida en la alta capacidad para disipar energía de este modelo, obviamente debido a la energía que pierde el flujo para sobrellevar este fenómeno.

- ▶ El grado de disipación de energía obtenido para el régimen grada a grada es bastante eficiente ya que se obtienen valores entre el 74% para el primer caudal y 59% para el quinto, la mayor disipación se presenta para el primer caudal debido a que el flujo grada a grada está casi totalmente desarrollado, y tanto los vórtices recirculantes y las crestas centrales y laterales son más influyentes; al disminuir estas características con el incremento del caudal, disminuye también la capacidad de disipación. Además, de la misma manera que para los modelos anteriores, los dos métodos utilizados para el análisis originan valores semejantes para el primer tramo y una diferencia notoria para el intervalo final. (Figura 4.5.9)

- ▶ Se concluye señalando que al incluir los umbrales en el modelo de seis escalones, se logra un mayor grado de disipación de energía para todos los caudales a partir del caudal prototipo de 4m³/s, ya que para los tres primeros es prácticamente el mismo, por lo tanto esta estructura resultaría más eficiente si va a trabajar con caudales altos.

4.6.2 RÉGIMEN EN FLUJO RASANTE - CONCLUSIONES

- ▶ Las características del flujo rasante para rápidas escalonadas con umbrales empiezan a producirse desde el caudal $Q_p = 6.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$, pero se presentan con mayor notoriedad desde el $Q_p = 7.05 \text{ (m}^3/\text{s)}$ ya que las cavidades de aire recirculantes en la unión de la huella y contrahuella desaparecen completamente, ya no se las observa como en el caudal $Q_p = 6.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$, en las dos últimas gradas.

- ▶ Para los caudales superiores se presentan vórtices recirculantes en la mitad de la huella de las gradas, esto debido a que por la influencia del umbral el flujo tiende a desprenderse de la lamina uniforme y a elevarse, esto permite el ingreso de aire que queda atrapado al interior del flujo.

- ▶ Las crestas centrales y laterales que se forman por el desprendimiento del flujo a causa del umbral no determinan la variación del perfil del flujo y más bien influyen en el ingreso de aire al mismo como ya se explicó.

- ▶ Los resultados obtenidos con la aplicación de Ecuación de Bernoulli y ecuación analítica utilizando velocidades calculadas con el calado para $h/l = 0.1$, son prácticamente los mismos para cada caudal, estos resultados son alentadores ya que indican que los resultados obtenidos en el laboratorio coinciden con la teoría desarrollada para este cálculo.

- ▶ La variación de la disipación de energía obtenida indica claramente que el umbral es más influyente para caudales menores, así para $Q_p = 6.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$ se obtiene una disipación de casi el 60%, y a medida que el caudal aumenta el umbral se sumerge más y su influencia disminuye, así, para $Q_p = 10.10 \text{ (m}^3/\text{s)}$ la disipación obtenida es del 50%. Tabla 4.1.b.

- ▶ El grado de disipación de energía depende directamente del caudal que circula por la rápida ya que si el caudal es menor, la disipación de energía también lo será y viceversa.

- ▶ Finalmente es claro que una rápida escalonada con umbrales al final de cada grada disipa mayor energía que una rápida sin umbrales.

CAPITULO 5.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA SEIS Y DOCE GRADAS

5.1 RELACIONES DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

5.1.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO GRADA A GRADA

			Ecuación Analítica 2.2.3			
			Seis Gradas	Seis Gradas	Doce Gradas	Seis Gradas
			C. Horizontal	C. Inclinado	C. Horizontal	Umbrales
Qm	Qm	Qp	$\Delta E[\%]$	$\Delta E[\%]$	$\Delta E[\%]$	$\Delta E[\%]$
[lt/s]	[m3/s]	[m3/s]				
5.719	0.0057	1.04	72.70		75.14	72.70
11.671	0.0117	2.11	62.98	63.76	65.19	62.98
16.719	0.0167	3.03	57.10		59.17	57.10
22.612	0.0226	4.09	51.71			51.71
27.261	0.0273	4.93				48.20

Tabla 5.1.1. Cuadro comparativo de los Porcentajes de Disipación de Energía calculados con la Ecuación 2.2.3 para Régimen de Flujo Grada a Grada.

			Ecuación de Bernoulli			
			Seis Gradas	Seis Gradas	Doce Gradas	Seis Gradas
			C. Horizontal	C. Inclinado	C. Horizontal	Umbrales
Qm	Qm	Qp	$\Delta E[\%]$	$\Delta E[\%]$	$\Delta E[\%]$	$\Delta E[\%]$
[lt/s]	[m3/s]	[m3/s]				
5.719	0.0057	1.04	77.68		77.14	74.12
11.671	0.0117	2.11	65.42	64.51	66.40	69.84
16.719	0.0167	3.03	62.08		65.18	62.76
22.612	0.0226	4.09	49.83			60.28
27.261	0.0273	4.93				58.83

Tabla 5.1.2. Cuadro comparativo de los Porcentajes de Disipación de Energía calculados con la Ecuación de Bernoulli para Régimen de Flujo Grada a Grada.

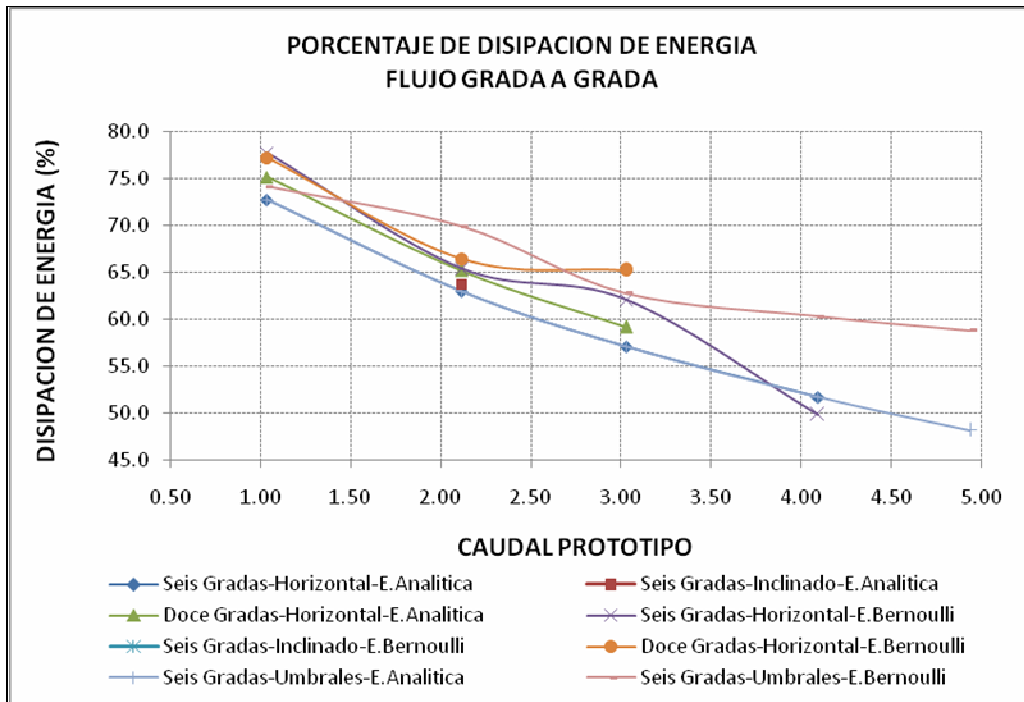


Figura 5.1.1. Porcentajes de Disipación de Energía para Régimen de Flujo Grada a Grada. (Anexo 7.1.6. a.)

- Los resultados obtenidos con la ecuación 2.2.3 (Tabla 5.1.1) tienen muy poca diferencia con los obtenidos a partir de la ecuación de Bernoulli (Tabla 5.1.2), por lo que se puede decir que las mediciones realizadas en el laboratorio son bastante precisas, y los datos obtenidos son a su vez bastante confiables, además queda demostrado que las fórmulas deducidas por los diferentes investigadores, mencionados en el numeral 2.2 del capítulo 2, pueden ser aplicadas con confianza para diseños en los que no se cuente con datos experimentales.
- Se observa, de las tablas antes mencionadas, que los resultados obtenidos con la ecuación 2.2.3 son siempre menores a los obtenidos con la ecuación de Bernoulli, por lo que con su aplicación se agrega un Factor de Seguridad a la estructura. (Figura 5.1.1)

- El porcentaje de disipación de energía en el flujo grada a grada es prácticamente el mismo para todos los modelos estudiados y para los tres primeros caudales, solo existiendo una diferencia pronunciada a partir del caudal prototipo de 4.09 m³/s, entre el modelo de seis gradas con umbrales (60.28 %) y el de seis gradas sin umbrales (49.83 %), ambos con el canal en posición horizontal. Por lo tanto para caudales que se encuentran dentro de este régimen la estructura más eficiente resulta ser la rápida escalonada libre con seis escalones debido a su facilidad constructiva y la disminución en costos que ello representa (Tabla 5.1.2)

5.1.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA RÉGIMEN DE FLUJO RASANTE

			Ecuación Analítica 2.2.5				
			Seis Gradas C. Horizontal	Seis Gradas C. Inclinado	Doce Gradas C. Horizontal	Doce Gradas C. Inclinado	Seis Gradas Umbrales
Qm [lt/s]	Qm [m ³ /s]	Qp [m ³ /s]	ΔE [%]	ΔE [%]	ΔE [%]	ΔE [%]	ΔE [%]
22.612	0.0226	4.09			56.86		
27.261	0.0273	4.93	46.40	34.59	55.37	53.19	
33.168	0.0332	6.00	42.88		49.13		58.13
38.973	0.0390	7.05	41.43		48.55		56.72
44.466	0.0445	8.05	38.99	27.57	45.01	38.42	54.47
49.928	0.0499	9.04	37.95		44.42		52.60
55.774	0.0558	10.10	37.38	27.07	41.33	36.51	50.11

Tabla 5.1.3. Cuadro comparativo de los Porcentajes de Disipación de Energía calculados con la Ecuación 2.2.5 para Régimen de Flujo Rasante.

			Ecuación de Bernoulli				
			Seis Gradas C. Horizontal	Seis Gradas C. Inclinado	Doce Gradas C. Horizontal	Doce Gradas C. Inclinado	Seis Gradas Umbrales
Qm [lt/s]	Qm [m ³ /s]	Qp [m ³ /s]	ΔE [%]	ΔE [%]	ΔE [%]	ΔE [%]	ΔE [%]
22.612	0.0226	4.09			56.79		
27.261	0.0273	4.93	46.50	33.01	55.33	53.93	
33.168	0.0332	6.00	42.88		49.05		58.07
38.973	0.0390	7.05	41.30		48.56		56.58
44.466	0.0445	8.05	38.86	28.65	44.98	39.08	54.44
49.928	0.0499	9.04	37.78		44.38		52.53
55.774	0.0558	10.10	37.40	26.91	41.19	38.04	50.00

Tabla 5.1.4. Cuadro comparativo de los Porcentajes de Disipación de Energía calculados con la Ecuación de Bernoulli para Régimen de Flujo Rasante.

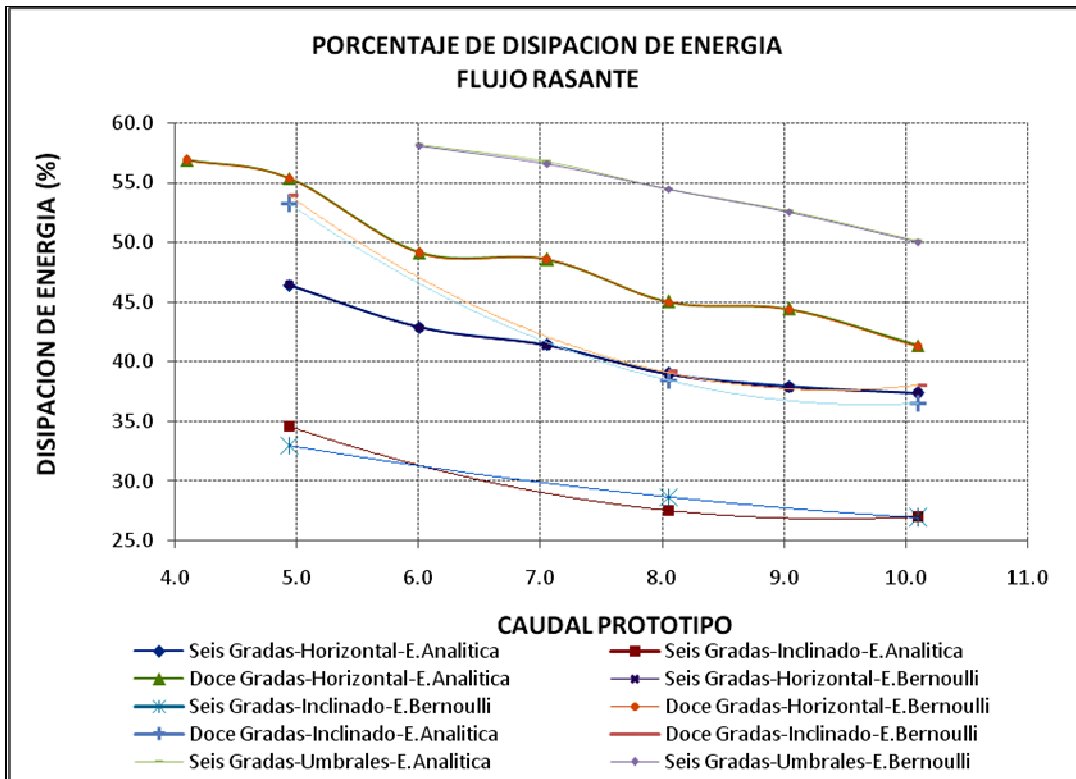


Figura 5.1.2. Porcentajes de Disipación de Energía para Régimen de Flujo Rasante. (Anexo 7.1.6. a.)

- Las Tablas 5.1.3 y 5.1.4 muestran que las Ecuaciones 2.2.5 y de Bernoulli proporcionan resultados del porcentaje de disipación de energía para caudales en régimen de flujo rasante aún más semejantes entre sí, que los obtenidos para el régimen de flujo grada a grada, por lo que la aplicación de la ecuación 2.2.5 resulta muy eficaz para los caudales que se encuentren dentro del flujo rasante. Se puede observar claramente la semejanza entre los datos de una misma estructura al mirar las curvas casi superpuestas entre sí (de dos en dos) en la figura 5.1.2.
- Para los caudales en régimen de flujo rasante la estructura que más disipación de energía produce es la rápida escalonada con umbrales y seis escalones con un porcentaje entre 58 y 50 % para caudales entre 6 y 10 m³/s respectivamente y la estructura que menos disipación produce es la conformada por seis escalones sin umbrales con una pendiente

adicional del 4% con un porcentaje total entre 33% para un caudal prototipo de 5 m³/s y 27 % para el caudal 10 m³/s (Tabla 5.1.4)

- Las rápidas con mayor probabilidad de ser construidas en la realidad son las de seis y doce escalones sin umbrales y en posición horizontal, de las cuales se puede decir que aunque el porcentaje de disipación producida por el de doce gradas es mayor que para el de seis escalones, este aumento no es el que se esperaba y resulta una rápida poco eficiente considerando dificultad constructiva se duplica.
- De todo lo antes expuesto se deduce que la rápida escalonada más eficiente es la de seis escalones con umbrales.

5.2 RELACIONES DE RESISTENCIA AL FLUJO.

5.2.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE DARCY-WEISBACH ‘f’ PARA RÉGIMEN DE FLUJO RASANTE

TENDENCIA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN				
EN LA GRADA FINAL AGUAS ABAJO				
Qp [m ³ /s]	Seis Gradas	Seis Gradas	Doce Gradas	Doce Gradas
	C. Horizontal	C. Inclinado	C. Horizontal	C. Inclinado
	f - Vcalculada	f - Vcalculada	f - Vcalculada	f - Vcalculada
4.09			0.05	
4.93	0.15	0.16	0.07	0.11
6.01	0.16		0.07	
7.05	0.17		0.09	
8.05	0.16	0.16	0.10	0.11
9.04	0.17		0.11	
10.1	0.18	0.17	0.11	0.12

Tabla 5.2.1. Cuadro comparativo del Coeficiente de Fricción para Régimen de Flujo Rasante.

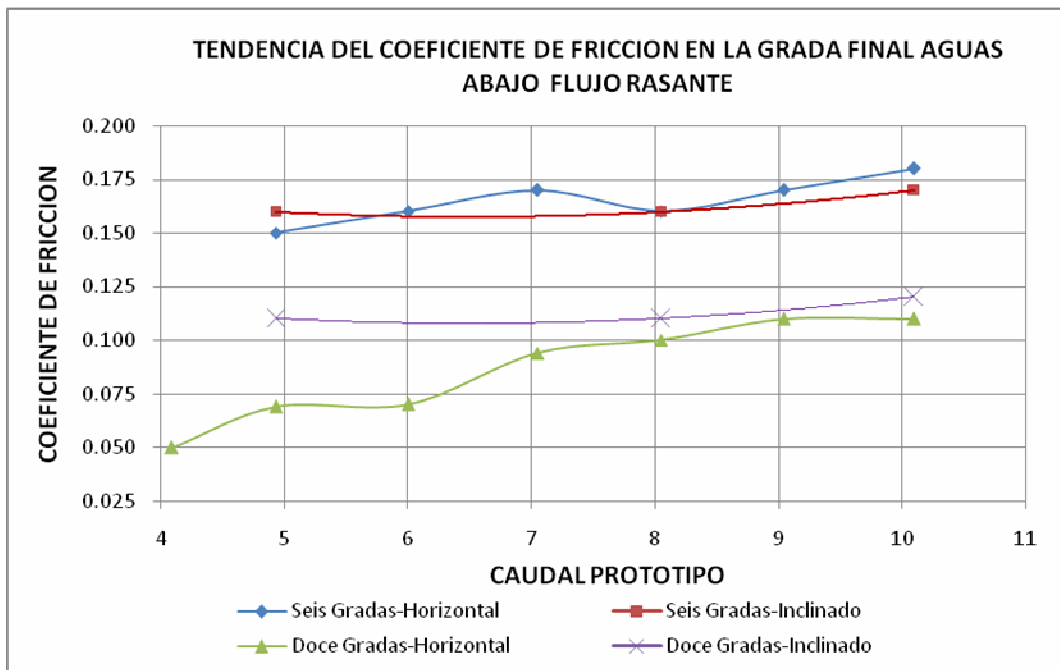


Figura 5.2.1. Coeficientes de Fricción para Régimen de Flujo Rasante. (Anexo 7.1.6. b.)

- Los coeficientes de fricción presentados en la tabla 5.2.1 muestran que estos permanecen casi constantes tanto para la rápida que se encuentra en posición horizontal como para la que tiene una inclinación del 4%, pero estos valores de “f” si presentan una notoria diferencia entre las estructuras de seis y doce escalones, siendo los “f” de la rápida con menor número de gradas prácticamente el doble de los de la rápida con el doce gradas.
- Los valores de “f” adoptados para las diferentes rápidas analizadas son los siguientes:
 - Seis escalones, canal horizontal: 0.17
 - Seis escalones, canal inclinado: 0.16
 - Doce escalones, canal horizontal: 0.11
 - Doce escalones, canal inclinado: 0.11

5.2.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING “n” PARA RÉGIMEN DE FLUJO RASANTE

COEFICIENTES DE MANNING “n”				
Qp [m ³ /s]	Seis Gradas	Seis Gradas	Doce Gradas	Doce Gradas
	C. Horizontal	C. Inclinado	C. Horizontal	C. Inclinado
	n prototipo	n prototipo	n prototipo	n prototipo
4.09			0.0310	
4.93	0.0268	0.0221	0.0317	0.0242
6.01	0.0265		0.0276	
7.06	0.0257		0.0290	
8.06	0.0242	0.0192	0.0288	0.0220
9.03	0.0236		0.0281	
10.10	0.0243	0.0196	0.0267	0.0203

Tabla 5.2.2. Cuadro comparativo del Coeficiente de Rugosidad de Manning para Régimen de Flujo Rasante.

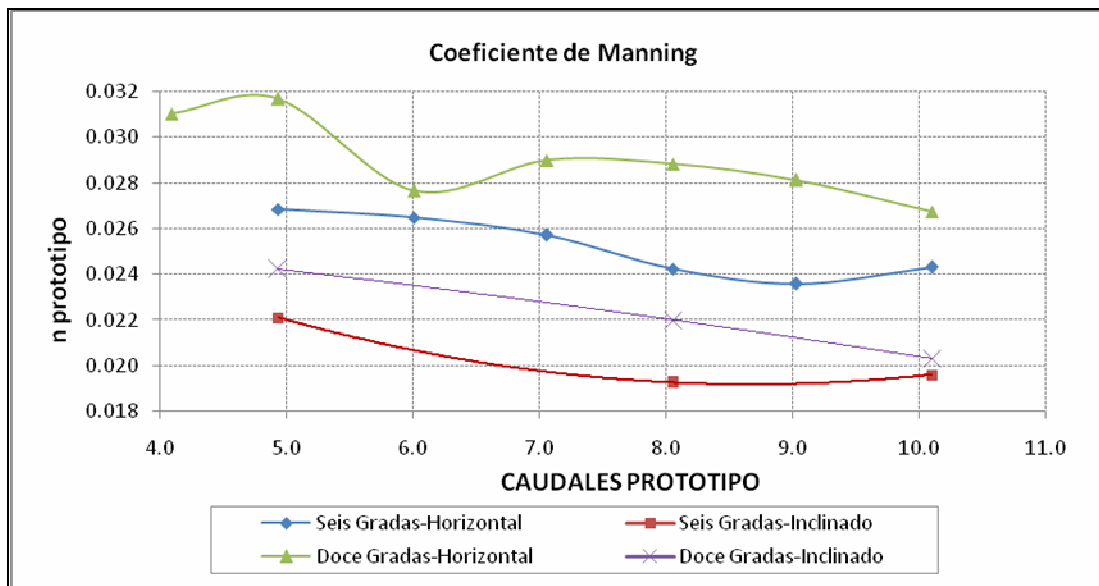


Figura 5.2.2. Coeficientes de Rugosidad de Manning para Régimen de Flujo Rasante. (Anexo 7.1.6. c.)

- Los valores del coeficiente de Manning “n” para cada una de las rápidas escalonadas estudiadas, son directamente proporcionales al porcentaje de disipación de energía que producen las mismas; por lo tanto la rápida con los valores más significativos de “n” es la conformada por doce escalones con el canal en posición horizontal. La rápida que consta de seis escalones con el canal en posición horizontal es la segunda más significativa con respecto al valor de “n”; entonces de entre estas dos opciones se debe escoger la más eficiente.
- Los valores de “n” adoptados para las diferentes rápidas analizadas son los siguientes:
 - Seis escalones, canal horizontal: 0.024
 - Seis escalones, canal inclinado: 0.020
 - Doce escalones, canal horizontal: 0.028
 - Doce escalones, canal inclinado: 0.022

5.3 RELACIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

El siguiente análisis comparativo considera la carga de presión (P/h) que se desarrolla sobre la rápida escalonada a lo largo de la dirección X , (X/l), el objetivo de dividir la presión para la altura del escalón y la distancia de ubicación de cada piezómetro en sentido X para la longitud de la rápida comprendida entre la sección $x=0$ y la sección $x= 6.125$ es el de obtener valores adimensionales para futuras comparaciones con modelos de similares características.

Es necesario aclarar que la rápida escalonada no cambia su longitud a lo largo de la dirección X, solamente varia el número de escalones, de 6 a 12, ya que la longitud total del modelo no varía, el número de piezómetros instalados si lo hace, así para el modelo con 6 gradas horizontal e inclinado se instalaron 15 piezómetros, y para el modelo con 12 gradas horizontal e inclinado el número instalado de piezómetros es de 14, claro está que se ubican en diferente posición a lo largo de la dirección X.

Cabe señalar que los puntos más altos en las figuras obtenidas, corresponden a los piezómetros ubicados en el primer tercio de la grada en donde se recibe directamente una carga de impacto del chorro que cae de la grada anterior, por esta razón los valores de carga piezométrica se incrementan, mientras que los valores más bajos son debido a que el piezómetro está ubicado en la contrahuella o cara vertical del escalón, donde se producen fenómenos de recirculación de aire o cavidades de aire que influyen directamente en la medición de la presión.

La comparación está sujeta a relacionar flujos de similares características.

Comparación de la rápida escalonada con Flujo Rasante para seis y doce escalones:

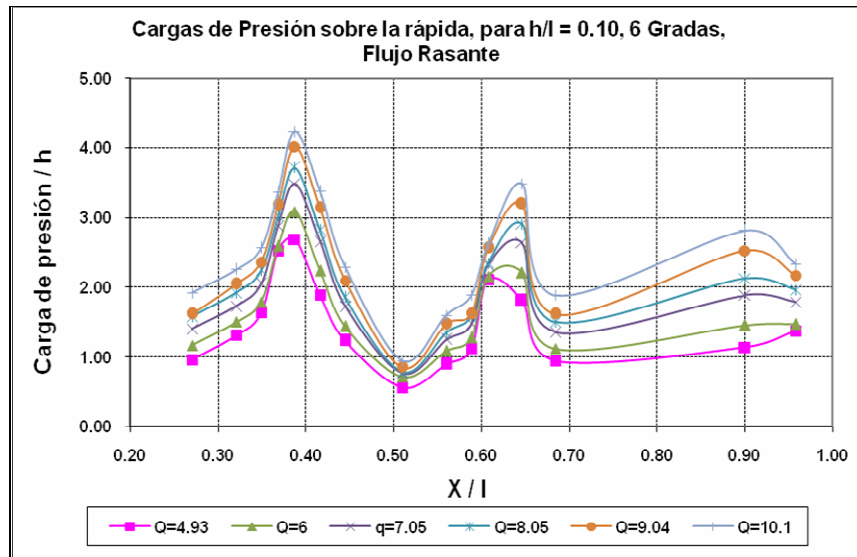


Figura 5.3.1 (Anexo 7.1.7. a.2)

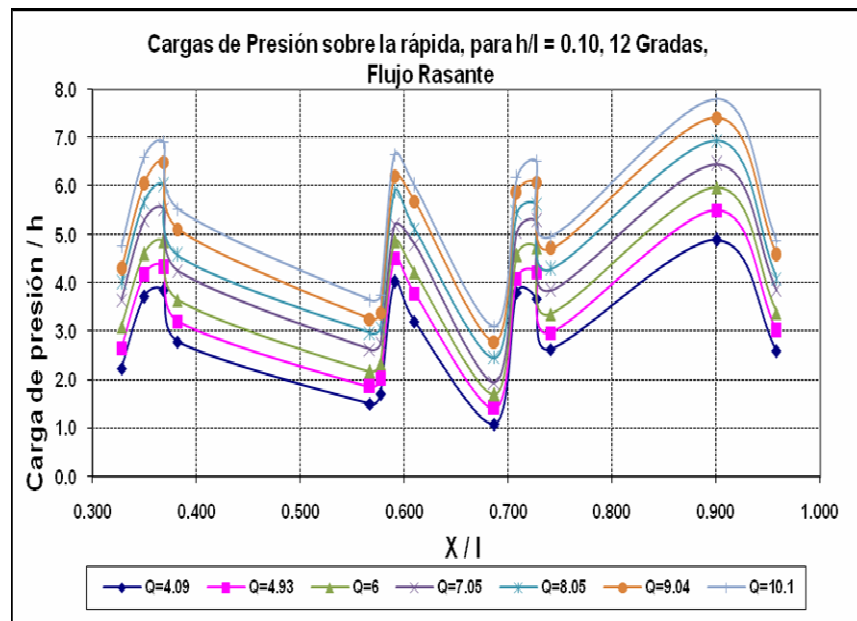


Figura 5.3.2 (Anexo 7.1.7. c.2)

En la figura 5.3.1 y 5.3.2 se observa la variación de la carga piezométrica a lo largo de rápida escalonada para los diferentes caudales considerados, de esta manera se determina que la presión sobre la rápida con 12 gradas en flujo rasante es mayor que en la rápida con 6 gradas en el mismo régimen de flujo,

se observa además que pocos puntos coinciden en valor de presión y ubicación, pero diferente caudal, así por ejemplo para el punto ($x/l = 0.4$; $P/h = 4$) en la rápida con 6 gradas coincide con el caudal de $10.1 \text{ m}^3/\text{s}$, y para el modelo con 12 gradas coincide con el caudal de $7.05 \text{ m}^3/\text{s}$.

Comparación de la rápida escalonada con Flujo Grada a Grada para seis y doce escalones:

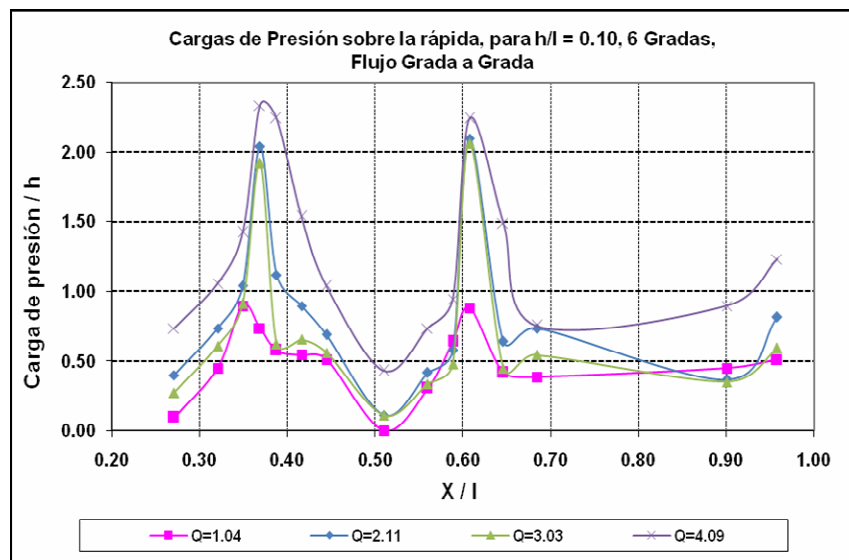


Figura 5.3.3 (Anexo 7.1.7. a.1)

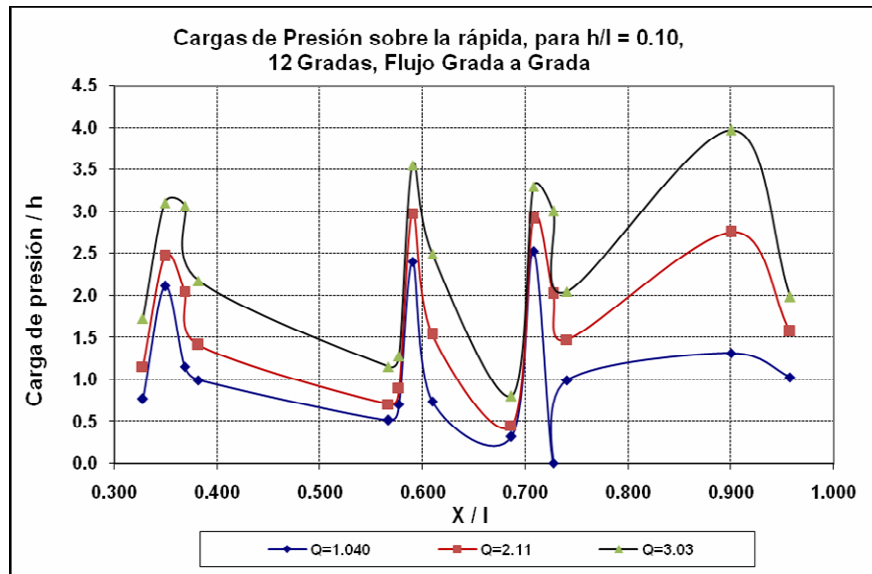


Figura 5.3.4 (Anexo 7.1.7. c1)

La variación de la carga de presión en este caso no es tan notoria como en el caso anterior, es decir, existen mas puntos de carga y ubicación que coinciden entre un modelo y otro, pero de igual manera la carga de presión es mayor para la rápida con 12 gradas.

Una vez comparado el régimen de flujo grada a grada y el régimen de flujo rasante tanto para el modelo con seis y doce gradas, se observa que la carga de presión es mayor en la rápida escalonada con 12 gradas para ambos regímenes de flujo; esta diferencia entre las dos alternativas es debido a que en el modelo con seis gradas el flujo tiene una mayor longitud para uniformizarse horizontalmente en la grada (longitud de la cara horizontal = 0.625m) antes de volver a caer en la grada siguiente, siendo la presión menor para esta alternativa; en cambio en la rápida escalonada con doce gradas, la longitud del escalón es menor (longitud de la cara horizontal = 0.3125m), por lo que el flujo no tiene una distancia suficiente para uniformizarse horizontalmente y pasa rápidamente de un escalón a otro.

Comparación de la rápida escalonada con gradas inclinadas el 4% con Flujo Rasante para seis y doce escalones:

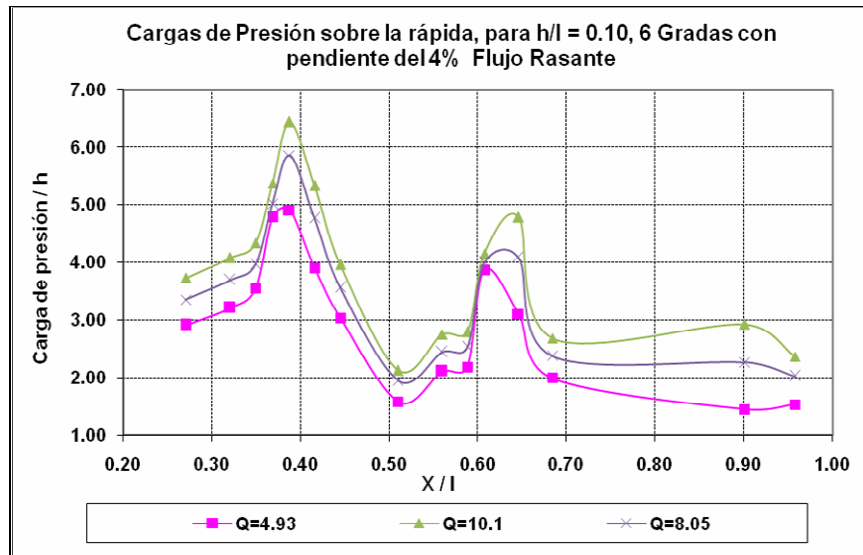


Figura 5.3.5 (Anexo 7.1.7. b.)

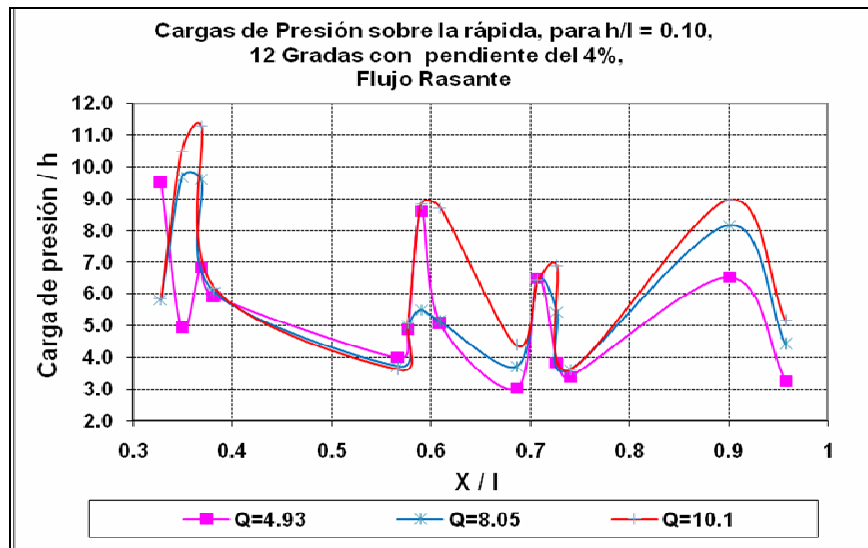


Figura 5.3.6 (Anexo 7.1.7.d.)

De igual manera que en las comparaciones anteriores, es notorio que la carga de presión sobre la rápida escalonada de doce gradadas es mayor que sobre la rápida con seis gradadas, se mantiene la congruencia de los valores máximos en el primer tercio de las gradadas y los valores menores en los piezómetros que se ubican en la cara vertical del escalón.

Los valores para el modelo con 12 gradas varían entre 3 y 11.5 de la carga de presión / h, y para la rápida con 6 escalones los valores oscilan entre 1.5 y 6.5 de la carga de presión / h, lo que indica que existen pocos puntos de coincidencia de carga y ubicación pero de diferente caudal.

CAPITULO 6.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES.

El Programa de Saneamiento Ambiental PSA de la Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito EMAAP-Q, conjuntamente con el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional EPN, llevaron adelante la suscripción de un convenio EMAAPQ-EPN, para realizar investigaciones experimentales sobre las características hidráulicas del tránsito del flujo en colectores con fondo escalonado; estudios que se realizaron en un canal de laboratorio de 25 m de largo, 1m de ancho y 0.80 m de altura y de pendiente variable instalado en el CIERHI de la EPN, y que sirvió de soporte para el montaje de las estructura hidráulica a ser investigada.

Para la realización de los estudios experimentales, se planteó tomar como prototipo una de las rápidas escalonadas del Plan Maestro de Alcantarillado

del Centro Histórico de Quito, de altura de grada $h = 0.50 \text{ m}$, longitud $l = 5.0 \text{ m}$, es decir $h/l = 0.10$, con ancho de grada de 1.20 m y caudal máximo Q de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que para efectos de diseño de la estructura a ser experimentada se propuso una escala de longitudes $1: 8$ y la ley de similitud de Froude, dadas las limitaciones en la altura de la sección transversal del canal hidrodinámico que es de apenas de 0.80 m . De acuerdo al plan de investigación aprobado por el PSA, el estudio comprendió dos fases: fase 1 y 2.

FASE 1 DEL ESTUDIO

- Para la fase 1 de estudio, el modelo tuvo una longitud total de desarrollo de 6.83 m . de largo y de 0.15 m de ancho, con una altura total o desnivel de la rápida de 0.375 m , limitando la rápida a 6 gradas, cada una de ellas de $h = 0.0625 \text{ m}$ y $l = 0.625 \text{ m}$. Hacia aguas arriba del inicio de la rápida se dispuso de un tramo de 1.0 m de longitud y 0.15 m de ancho para el flujo de aproximación a las gradas, y una transición en curva con perfil elíptico de relación $1:2$ para unir el ancho del canal hidrodinámico de 1.0 m con el ancho del canal del modelo de 0.15 m . Hacia el extremo inferior de la rápida, luego de la última grada, se dispuso de un tramo recto de canal de sección rectangular de $0,15 \text{ m}$. de ancho y 1.00 m . de longitud. Figura 1.



Figura 1

- Los caudales que se ensayaron en esta fase 1 fueron en número de 10, con un rango entre 1 y 10 m³/s con incrementos de 1 m³/s, lo que en el proceso investigativo de acuerdo a la escala fue entre 5.7 y 55.8 litros/seg.
- Durante los ensayos, los tipos de regímenes de flujo que se presentaron, variaron desde régimen de flujo grada a grada (nappe flow) y en transición (transition flow) para caudales entre 1 y 4 m³/s y flujo rasante (skimming flow) para caudales entre 5 y 10 m³/s, cada uno con sus características de flujo propia de estos regímenes; es decir, flujo en cascada con cavidades de aire entre la pared vertical y horizontal de la grada y salpicaduras para los flujos grada a grada, estructura caótica del flujo con incorporación de aire y salpicaduras más intensas para régimen en transición, y flujo con perfil gradualmente variado en régimen supercrítico para el flujo rasante. Para el procesamiento de los datos se agruparon como flujo grada a grada para el rango de caudales entre 1 y 4 m³/s, y como rasante para caudales entre 5 y 10 m³/s.
- *Para el régimen de flujo grada a grada con huella horizontal,* el valor del porcentaje de disipación de energía ΔE lograda al pie del canal escalonado estudiado, aplicando la respectiva ecuación (2.2.3 y 2.2.4) se tiene que varía entre $51.7 \leq \Delta E(\%) \leq 72.7$ para rangos de yc/h entre $0.85 \leq yc/h \leq 2.12$; y con la ecuación de Bernoulli para el mismo rango de yc/h el porcentaje de energía disipada varía entre $52 \leq \Delta E(\%) \leq 78$,

donde y_c es el respectivo calado crítico y h la altura de la grada. Estos valores se indican en la tabla 2.8.8.a.

- *En lo que respecta al porcentaje de disipación de energía para el flujo rasante*, con huellas horizontales, el valor del porcentaje de disipación de energía según la ecuación 2.2.5 varía entre $37.4 \leq \Delta E(\%) \leq 46.4$, y con la ecuación de la energía de Bernoulli entre $37.4 \leq \Delta E(\%) \leq 46.5$ para un rango de variación de y_c/h entre $2.40 \leq y_c/h \leq 3.9$; lo que demuestra concordancia entre lo medido y lo calculado. Estos valores se indican en la tabla 2.8.6.b.
- *Los Coeficientes de Manning* para un canal escalonado de las características ensayadas en el laboratorio, correspondiente a un prototipo de: $h/l = 0.10$, $b = 1.20$ m., $h = 0.50$ m., seis gradas y $2.4 \leq y_c/h \leq 3.9$ (Tabla 2.9.4), se encuentran entre $0.024 \leq n \leq 0.027$ (Tabla 2.9.5); lo que permite sugerir un valor para n de 0.024, según la tendencia que presentan los valores de la Figura 2.9.3, y para flujo rasante, tomando como criterio el que en el tramo final de la curva correspondiente a los últimos caudales, esta empieza a estabilizarse alrededor del valor antes mencionado.
- *En lo que respecta al coeficiente de fricción de Darcy- Weisbach f* , dada la tendencia de los valores calculados según la ecuación 4.2.6, se tomaron los valores de f para cada y_c/h a los correspondientes en el tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 2.9.4. y en la figura 2.9.2; lo que permite recomendar un valor de " f " igual a 0.17 para las características de este tipo de rápida investigada, cuyo prototipo corresponde a $h/l = 0.10$, seis gradas, $h = 0.50$ m y $2.4 \leq y_c/h \leq 3.9$.
- *Los ensayos experimentales en el canal escalonado con seis gradas, también se realizaron para una inclinación del 4% de la huella de la*

grada, y los resultados obtenidos de porcentaje de disipación para flujo rasante varían según la ecuación 2.2.5 entre $27\% \leq \Delta E(\%) \leq 35\%$ y para la ecuación de Bernoulli entre $27\% \leq \Delta E(\%) \leq 33\%$, valores que resultan menores a los obtenidos para grada con huella horizontal.

- *En cuanto a los coeficientes de Manning* para un rango de yc/h entre $2.4 \leq yc/h \leq 3.9$ (Tabla 2.11.4), se encuentran entre $0.020 \leq n \leq 0.022$ (Tabla 2.5.b); lo que permite sugerir un valor para n de 0.020, según la tendencia que presentan los valores de la Figura 2.11.14, ya que en el tramo final de la curva correspondiente a los últimos caudales, esta empieza a estabilizarse alrededor del valor anterior; y para el coeficiente de fricción f , este resultó ser del orden de $f=0.16$ de acuerdo a la figura 2.11.13.

- **FASE 2 DEL ESTUDIO**

- Para la fase 2 del estudio, el modelo tuvo una longitud total de desarrollo similar al de la fase 1 es decir, de 6.83 m de largo y de 0.15 m de ancho en su tramo de ensayo, y una altura total o desnivel de la rápida de 0.375 m, duplicando el número de gradas a 12 gradas, cada una de ellas de $h = 0.03125\text{m}$ y $l = 0.3125\text{ m}$. Figura 2.

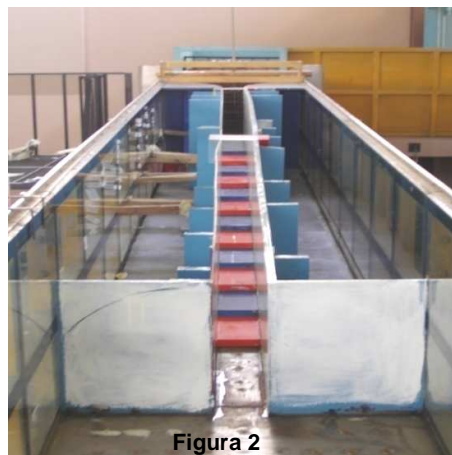


Figura 2

- El rango de caudales ensayados fue el mismo que para la fase 1, es decir con 10 caudales, entre 1 y 10 m³/s, visualizándose flujo grada a grada para caudales entre 1 y 3 m³/s, y rasante para flujos entre 4 y 10 m³/s, con características similares de patrones de flujo a los observados en la fase 1.
- *Para el régimen de flujo grada a grada con huella horizontal*, el valor del porcentaje de disipación de energía ΔE lograda al pie del canal escalonado estudiado, aplicando la respectiva ecuación (2.2.3 y 2.2.4) se tiene que varía entre $59.17 \leq \Delta E(\%) \leq 75.14$ para rangos de yc/h entre $1.7 \leq yc/h \leq 3.5$; y con la ecuación de Bernoulli para el mismo rango de yc/h el porcentaje de energía disipada varía entre $65.18 \leq \Delta E(\%) \leq 77.14$, donde yc es el respectivo calado crítico y h la altura de la grada.
- *En lo que respecta al porcentaje de disipación de energía para el flujo rasante*, con las huellas horizontales, el valor del porcentaje de disipación de energía según la ecuación 2.2.5 estos varían entre $41.33 \leq \Delta E(\%) \leq 56.86$, y con la ecuación de la energía de Bernoulli entre $41.2 \leq \Delta E(\%) \leq 56.8$ para un rango de variación de yc/h entre $2.40 \leq yc/h \leq 3.9$; lo que demuestra concordancia entre lo medido y lo calculado.
- *Los Coeficientes de Manning* para un canal escalonado de las características ensayadas en el laboratorio, correspondiente a un prototipo de: $h/l = 0.10$, $b = 1.20$ m., $h = 0.25$ m., 12 gradas y $4.23 \leq yc/h \leq 7.74$, se encuentran entre $0.027 \leq n \leq 0.031$; lo que permite sugerir un valor para n de 0.024, y para flujo rasante, tomando como criterio el que en el tramo final de la curva correspondiente a los últimos caudales, esta empieza a estabilizarse alrededor del valor antes mencionado.
- *En cuanto al coeficiente de fricción de Darcy- Weisbach f* , dada la tendencia de los valores calculados según la ecuación 4.2.6, se tomaron los valores de f para cada yc/h a los correspondientes en el

tramo final de la rápida, los mismos que se indican en la tabla 5.5.3.b. y en la figura 5.5.25; lo que permite recomendar un valor de “f” igual a 0.11 para las características de este tipo de rápida investigada, cuyo prototipo corresponde a $h/l = 0.10$, doce gradas, $h = 0.250$ m y $4.23 \leq yc/h \leq 7.74$

- *Los ensayos experimentales en el canal escalonado con doce gradas, también se realizaron para una inclinación del 4% de la huella de la grada, y los resultados obtenidos de porcentaje de disipación para flujo rasante varían según la ecuación 2.2.5 entre $36.5 \leq \Delta E(\%) \leq 53.9\%$ y para la ecuación de Bernoulli entre $38\% \leq \Delta E(\%) \leq 53.9\%$, valores que resultan un poco menores a los obtenidos para grada con huella horizontal. El rango de valores indicados se encuentran indicados en la tabla 3.7.1. En cuanto a los coeficientes de Manning para un rango de yc/h entre $4.8 \leq yc/h \leq 7.73$, se encuentran entre $0.020 \leq n \leq 0.024$ (Tabla 3.7.4); lo que permite sugerir un valor para n de 0.020, según la tendencia que presentan los valores de la Figura 3.7.12, ya que en el tramo final de la curva correspondiente a los últimos caudales, y para el coeficiente de fricción f , este resultó ser del orden de $f=0.11$ de acuerdo a la figura 3.7.11.*
- En general el grado de disipación de energía del flujo, los coeficientes de resistencia como son el de Manning y de fricción de Darcy-Weisbach, con grada horizontal e inclinada, de acuerdo a los resultados del proceso investigativo llevado a cabo en un canal escalonado con relación $h/l = 0.10$, con 6 y 12 gradas, va a depender del número de gradas, de la altura h de cada grada y del caudal a ser transitado por la estructura, variable que se encuentra representada en forma implícita en la relación yc/h . Desde luego los resultados alcanzados son aplicables para el rango de yc/h estudiados e indicado en los párrafos anteriores.
- En cuanto a la distribución de cargas de presión tanto sobre la cara vertical como sobre la cara horizontal e inclinada de la grada, en todos

los ensayos realizados, no se registraron presiones negativas que induzcan a un fenómeno de cavitación, que ocasionaría la destrucción de la estructura. La distribución de presiones con cargas mayores se registraron en los piezómetros ubicados en la primera mitad de la longitud de la huella de la grada, causado por el impacto del chorro que produce la caída especialmente para el flujo grada a grada, alcanzándose una distribución casi hidrostática en un corto tramo hacia la segunda mitad aguas abajo de la grada, anterior al borde de la misma y con dependencia del caudal circulante.

6.2 RECOMENDACIONES

Promover dentro de la formación académica de la Ingeniería Civil la realización de proyectos de investigación entre los estudiantes de pregrado y postgrado, para de esta manera fortalecer los conocimientos obtenidos y formar sólidos criterios de diseño en obras hidráulicas y estructurales.

Después de realizar esta investigación, queda claro que el estudio sobre rápidas escalonadas es un tema muy amplio, por lo que sería un gran aporte continuar con el estudio de este tipo de estructuras, variando la longitud y la altura de los escalones como también el ancho del canal de circulación, para de esta manera formar conceptos claros acerca del funcionamiento de estas obras y su diseño óptimo.

Preferiblemente diseñar este tipo de estructuras en régimen de flujo rasante ya que como se observó en esta investigación este tipo de régimen es el que tiende a desarrollarse a lo largo de la rápida a medida que aumenta el caudal y mejor características presenta para el estudio además que los conceptos y la teoría a utilizarse está más desarrollada.

Es necesario para este tipo de estudios contar con un equipo adecuado para la medición de velocidades, presiones, altura de agua, es por eso que se hace urgente la modernización de todos los instrumentos con los que cuenta el CIERHI para la realización de un mejor trabajo de investigación.

Como se explico al inicio de este estudio, esta rápida escalonada forma parte del sistema de recolección de agua servida del centro histórico de Quito, siendo esta alternativa optima para este tipo de descarga ya que por el proceso de aireación que se produce a lo largo de su estructura se produce la disipación de gases disueltos en el agua, pero la alternativa de la rápida escalonada con umbrales en el borde del escalón no es aplicable cuando existen este tipo flujos, ya que el material que transporta quedaría atrapado en el umbral provocando así que este ya no cumpla su función hidráulica de disipar energía.

CAPITULO 7.

7. ANEXOS.

Todo el proceso experimental realizado para las diferentes rápidas escalonadas libres y con umbrales (Fotografías, videos y el procesamiento de datos), se encuentra detallado en el cd de anexos.

7.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

7.1.1. (a-e) RÁPIDA ESCALONADA LIBRE, CANAL HORIZONTAL Y SEIS ESCALONES.

7.1.2. (a-e) RÁPIDA ESCALONADA LIBRE, CANAL INCLINADO Y SEIS ESCALONES.

7.1.3. (a-e) RÁPIDA ESCALONADA LIBRE, CANAL HORIZONTAL Y DOCE ESCALONES.

7.1.4. (a-e) RÁPIDA ESCALONADA LIBRE, CANAL INCLINADO Y DOCE ESCALONES.

**7.1.5. (a-c) RÁPIDA ESCALONADA CON UMBRALES, CANAL HORIZONTAL
Y SEIS ESCALONES.**

**7.1.6. (a-c) COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTE
ESTUDIO.**

7.1.7. (a-d) COMPARACIÓN DE PRESIONES

CAPITULO 8.

8. BIBLIOGRAFÍA

- **Chanson, H.** (1994). *Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways*. Pergamon, Oxford, UK.
- **Chanson, H.** (1994). “Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes”. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 32, No.2, pp. 213-218.
- **Chanson, H. and Toombes, L.** (2004) “Hydraulics of stepped chutes: The transition flow”. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.42, No.1, pp.43 – 54.
- **Ohtsu, I. and Yasuda, Y.** (1995). “Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes – Discussion”. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.33, No.1, pp. 115-117.
- **Ohtsu, I. and Yasuda, Y.** (1997). “Characteristic of flow conditions on stepped channels”. *Proc. 27th IAHR Congress, San Francisco, USA*, Theme D, pp. 583 – 588.

- **Rajaratnam, N. (1990).** “Skimming flow in stepped spillways”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.116, No.4, April 1990, pp. 587-591.
- **Sorensen,R.M. (1985).** “Stepped spillway hydraulic model investigation”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No.12, December 1985, pp. 1461-1472.
- **Stephenson, D. (1991).** “Energy Dissipation down stepped spillways”. *International Water Power & Dam Construction*, Vol.43, No.9, pp. 27-30.
- **Yasuda, Y. and Ohsu, I. (1999).** “Flow resistance of skimming flows in stepped channels”. *Proc. 28th IAHR Congress, Graz, Austria*, Session B14 (CD-ROM).
- **Menéndez, Ciro Galo (2006).** “*Caracterización de la estructura del flujo y disipación de energía en una rápida escalonada instalada en un canal de laboratorio*”. Memorias del XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, Edición en CD.
- **Menéndez, Ciro Galo (2006).** “*Characterization of the flow structure and energy dissipation on stepped chutes installed in a laboratory channel*”. Memorias del Simposio Internacional de Estructuras Hidráulicas, Ciudad Guayana, Venezuela, Edición CD y Texto Impreso.
- **Menéndez, Ciro Galo (2007).** “*Experimental results of flow energy dissipation on stepped chutes using vanes at the step cavity*”. Memorias del XXXII Congreso de la IAHR, Venecia, Italia, Edición CD.

8.1 REFERENCIAS

REF. 1: Becerra, E. y García, A. (2006). Estudio comparativo de la disipación de energía y distribución de presiones del flujo en rápidas escalonadas libres y con tabiques. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

REF. 2: Andrade, P. y Lucio, E. (2005). Análisis de las características del flujo y la disipación de energía en rápidas escalonadas instaladas en un canal de laboratorio. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

REF. 3: Chanson, H. (2002). *Hidráulica del flujo en canales abiertos* . University of Queensland, Australia. McGraw-Hill.

REF. 4: Hidalgo, M. (2006). “*Introducción a la teoría de Modelos Hidráulicos y aplicaciones básicas*”. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

REF. 5: Fonseca, J y Merino, L. (2005). *Análisis de Estructuras Hidráulicas en un canal de Laboratorio*”. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

REF. 6: Hidalgo, X. y Castro, M. (1997) “*Sobre la disipación de energía y la aireación natural en los vertederos de perfil escalonado*”. Memorias del VII Congreso Nacional de Hidráulica, Quito, Ecuador.

REF. 7: Haro, P. y Jara, M. (2006). “*Manual Básico de Diseño de estructuras de cambio de nivel y cambio de dirección con flujo a gravedad*”. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.