

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO RASANTE, CON LA
IMPLEMENTACIÓN DE ESTRUCTURAS ADICIONALES SOBRE EL
PERFIL ESCALONADO PARA INCREMENTAR LA DISIPACIÓN
CONTINUA DE ENERGÍA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MENCION HIDRÁULICA**

KATHERINE XIOMARA GUACHAMÍN PALADINES
katty_mia9317@hotmail.com

ANGÉLICA GRACIELA SIMBAÑA PUMISACHO
angelica.simbana@outlook.com

DIRECTOR: ING. MSc. XIMENA DEL ROCÍO HIDALGO BUSTAMANTE
ximena.hidalgo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. MSc. PATRICIO RUBÉN ORTEGA LARA
patricio.ortega@epn.edu.ec

QUITO, octubre 2018

DECLARACIÓN

Nosotros, Katherine Xiomara Guachamín Paladines y Angélica Graciela Simbaña Pumisacho, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**KATHERINE XIOMARA
GUACHAMÍN PALADINES**

**ANGÉLICA GRACIELA
SIMBAÑA PUMISACHO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Katherine Xiomara Guachamín Paladines y Angélica Graciela Simbaña Pumisacho, bajo nuestra supervisión.

Ing. MSc. XIMENA HIDALGO B.
DIRECTORA DEL PROYECTO

Ing. MSc. PATRICIO ORTEGA L.
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mi directora de tesis Ing. MSc. Ximena Hidalgo, por la confianza brindada para el desarrollo de este proyecto, por su tiempo, conocimientos y paciencia invertidos.

A los Ing. MSc. Patricio Ortega, Ing. MSc. Edwin Casa, Ing. MSc. Pablo Vera, Ing. MSc. Darío Calderón e Ing. Jorge Santamaría por su acogida en el Centro de Investigación y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) y por aportar con sus conocimientos desde el inicio hasta la finalización de la presente investigación.

A Manuel, Wilson y Juan Carlos por el trabajo y la colaboración brindada durante nuestra permanencia en el CIERHI.

A mis amigos Luchito, Elvis, Michu, Angy, Carlos, Guillo, Dennys y Stefy por hacer más placentera mi vida universitaria y por haber compartido juntos momentos agradables e inolvidables.

Katherine

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a la Escuela Politécnica Nacional, a los docentes y personal administrativo, por formarme no solamente en el ámbito profesional, sino también en el ámbito personal.

A mi directora de tesis, Ing. Ximena Hidalgo, por toda su colaboración, su confianza y predisposición, al Dr. Marco Castro, por su asesoramiento, por compartir sus conocimientos y por su cordialidad.

Al Centro de Investigación y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) y su personal técnico Ing. MSc. Patricio Ortega, Ing. MSc. Pablo Vera, Ing. MSc. Edwin Casa, Ing. MSc. Darío Calderón e Ing. Jorge Santamaría por su apoyo incondicional.

A Manuel, Wilson y Juan Carlos, su ayuda y experiencia fue fundamental en el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Agradezco a Kathy, mi compañera de tesis y mi amiga, le auguro éxitos en cada etapa de su vida.

A mis amigos, porque sin su ayuda no hubiera aprendido tantas lecciones valiosas.

Angelica

DEDICATORIA

A ti madre, pues has sido tu quien sentó en mi las bases de responsabilidad y deseos de superación. Fuiste mi motivación más grande para concluir este proyecto.

Katherine

DEDICATORIA

Angela y Susana, mi fuerza y mi guía.

Angélica

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	VI
CONTENIDO	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE CUADROS	XVIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XXII
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	XXIV
NOTACIÓN	XXX
RESUMEN	XXXIII
ABSTRACT	XXXIV
PRESENTACIÓN	XXXV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 ALCANCE EXPERIMENTAL	4
1.4 ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE LAS RÁPIDAS ESCALONADAS	5
1.5 MARCO CONCEPTUAL DE TRABAJO	7
CAPÍTULO 2	8
BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO. ESTADO DEL ARTE EN	
RÁPIDAS ESCALONADAS	8
2.1 INTRODUCCIÓN	8
2.2 CRESTA DEL ALIVIADERO	8
2.3 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL AGUA SOBRE UNA	
RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO	10
2.3.1 FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN (NAPPE FLOW)	12

2.3.1.1	FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN AISLADO.....	12
2.3.1.2	FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN PARCIAL.....	14
2.3.2	FLUJO EN TRANSICIÓN.....	15
2.3.3	FLUJO RASANTE (SKIMMING FLOW).....	17
2.3.3.1	FLUJO RASANTE CON CAVIDAD PARCIALMENTE OCUPADA (SK1).....	18
2.3.3.2	FLUJO RASANTE CON CAVIDAD CASI-TOTALMENTE OCUPADA POR FLUJO SECUNDARIO (SK2).....	18
2.3.3.3	FLUJO RASANTE CON RECIRCULACIÓN ESTABLE (SK3).....	19
2.4	DESCRIPCIÓN DEL FLUJO RASANTE.....	22
2.4.1	ZONAS DE FLUJO RASANTE EN RÁPIDAS ESCALONADAS.....	22
2.4.1.1	FLUJO NO AIREADO.....	23
2.4.1.2	FLUJO PARCIALMENTE AIREADO.....	24
2.4.1.3	FLUJO COMPLETAMENTE AIREADO.....	26
2.4.1.4	FLUJO AIREADO EN ESTADO DE EQUILIBRIO O UNIFORME.....	26
2.4.2	DIFERENCIAS ENTRE FLUJO AIREDO Y NO AIREADO.....	27
2.5	CARACTERÍSTICAS HIDRAULICAS DEL FLUJO RASANTE.....	28
2.5.1	CAPA LÍMITE TURBULENTA.....	28
2.5.2	UBICACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN.....	30
2.5.3	ALTURA EQUIVALENTE Y_w , ALTURA CARACTERÍSTICA Y_{90}	33
2.5.4	MECANISMO DE TRANSPORTE DE AIRE.....	35
2.5.5	CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE EN EL FLUJO.....	36
2.5.6	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.....	39
2.5.7	RESISTENCIA AL MOVIMIENTO.....	41
2.5.8	DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	44
2.5.9	PRESIONES SOBRE LOS ESCALONES.....	48
2.5.9.1	PRESION EN CARAS HORIZONTALES (HUELLA).....	49
2.5.9.2	PRESION EN CARAS VERTICALES (CONTRAHUELLA).....	49
2.5.10	RIESGO DE CAVITACIÓN.....	50
2.6	ESTRUCTURAS ADICIONALES PARA INCREMENTAR LA TASA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	50
2.7	ESTADO DEL ARTE.....	53
2.8	CONCLUSIONES.....	55

CAPÍTULO 3	57
BASE TEÓRICA SOBRE MODELACIÓN HIDRÁULICA.	
DESCRIPCIÓN, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA INSTALACIÓN	
EXPERIMENTAL	57
3.1 INTRODUCCIÓN	57
3.2 BASE TEÓRICA: MODELACIÓN HIDRÁULICA	58
3.2.1 MODELOS FÍSICOS	58
3.2.2 MODELOS NUMÉRICOS	61
3.2.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL	62
3.2.3.1 MAGNITUDES FÍSICAS EN EL ANÁLISIS DIMENSIONAL	63
3.2.3.2 PRINCIPIO DE HOMOGENEIDAD DIMENSIONAL	63
3.2.3.3 TEOREMA PI (π) O DE BUCKINGHAM	64
3.2.3.4 NÚMEROS ADIMENSIONALES FUNDAMENTALES	66
3.2.4 CRITERIOS DE SIMILITUD	71
3.2.4.1 TEORÍA DE LA SEMEJANZA MECÁNICA	72
3.2.4.2 SEMEJANZA HIDRÁULICA	75
3.2.4.3 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA	75
3.2.5 LIMITACIONES EN LA MODELACIÓN FÍSICA	79
3.2.5.1 RESTRICCIÓN EXTERNA	79
3.2.5.2 EFECTOS DE ESCALA	79
3.3 DESCRIPCIÓN, CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y	
CALIBRACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL. PROYECTO PIMI 16-	
06	82
3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	82
3.3.1.1 COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	83
3.3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	94
3.3.2.1 DETALLE CONSTRUCTIVO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	94
3.3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIDA USADOS EN LA INSTALACIÓN	
EXPERIMENTAL	95
3.3.3.1 ESTACIÓN TOTAL Y NIVEL TOPOGRÁFICO	95
3.3.3.2 VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED DELGADA CON	
CONTRACCIONES LATERALES	96
3.3.3.3 LIMNÍMETROS	101

3.3.3.4	PROBETAS Y ENVASES PARA AFORO.....	102
3.3.3.5	REGLAS GRADUADAS Y CINTAS MÉTRICAS.....	102
3.3.3.6	DISTANCIÓMETRO LASER.....	103
3.3.4	CALIBRACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	103
3.3.4.1	CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA.....	103
3.3.4.2	CALIBRACIÓN DEL VERTEDERO DE AFORO EN EL CANAL DE SALIDA.....	110
3.3.5	PLAN DE PRUEBAS	120
3.3.6	SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA, EFECTOS DE ESCALA	121
3.4	CONCLUSIONES	129
CAPÍTULO 4	132
	ANÁLISIS EXPERIMENTAL: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	132
4.1	INTRODUCCIÓN.....	132
4.2	RESULTADOS OBTENIDOS: DISEÑO ORIGINAL	133
4.2.1	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL FLUJO.....	133
4.2.2	CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE EN LA REGIÓN UNIFORME: DISEÑO ORIGINAL	152
4.2.3	FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY – WEISBACH EN LA REGIÓN UNIFORME: DISEÑO ORIGINAL	155
4.2.4	DISIPACIÓN DE ENERGÍA: DISEÑO ORIGINAL	156
4.2.5	CURVAS ADIMENSIONALES: DISEÑO ORIGINAL	158
4.3	PROPUESTA DE MODIFICACIÓN AL DISEÑO ORIGINAL	167
4.3.1	DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN	168
4.3.2	DIMENSIONAMIENTO DE LOS TABIQUES TRIANGULARES	169
4.3.3	CONSTRUCCIÓN DE LA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN	171
4.3.4	PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL CON DISEÑO MODIFICADO	172
4.4	RESULTADOS OBTENIDOS: DISEÑO MODIFICADO.....	172
4.4.1	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO	172
4.4.2	CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE EN LA REGION UNIFORME: DISEÑO MODIFICADO.....	191

4.4.3	FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY – WEISBACH EN LA REGIÓN UNIFORME: DISEÑO MODIFICADO.....	192
4.4.4	DISIPACIÓN DE ENERGÍA: DISEÑO MODIFICADO.....	193
4.4.5	CURVAS ADIMENSIONALES: DISEÑO MODIFICADO.....	195
4.5	COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	201
4.5.1	FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY – WEISBACH EN LA REGIÓN UNIFORME.....	201
4.5.2	CURVAS ADIMENSIONALES	205
4.6	CONCLUSIONES	210
4.6.1	CARACTERIZACIÓN HIDRAULICA CON DISEÑO ORIGINAL Y DISEÑO MODIFICADO.....	210
4.6.1.1	COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL FLUJO BIFÁSICO “AGUA – AIRE”	210
4.6.1.2	CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE.....	211
4.6.1.3	FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY – WEISBACH EN LA REGIÓN UNIFORME	211
4.6.2	TASA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	212
	CAPITULO 5	213
	SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	213
5.1	SÍNTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	213
5.2	CONCLUSIONES	214
5.2.1	RESULTADOS OBTENIDOS CON DISEÑO ORIGINAL	214
5.2.2	RESULTADOS OBTENIDOS CON DISEÑO MODIFICADO	215
5.2.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	216
5.2.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES, INCLUYE LITERATURA TECNICA	219
5.3	RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	220
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	222
	ANEXOS	226
	ANEXO N° 1	227

REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO CON DISEÑO ORIGINAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	227
ANEXO N° 2	239
REGISTRO DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	239
ANEXO N° 3	242
REGISTRO DE DATOS Y CÁLCULOS RESPECTIVOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED DELGADA CON CONTRACCIONES LATERALES	242
ANEXO N° 4	246
ANÁLISIS DIMENSIONAL INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	246
ANEXO N° 5	263
REGISTRO DE DATOS: PRUEBAS CON DISEÑO ORIGINAL.....	263
ANEXO N° 6	276
REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA MODIFICACION AL DISEÑO ORIGINAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA	276
ANEXO N° 7	281
REGISTRO DE DATOS: PRUEBAS CON DISEÑO MODIFICADO	281
ANEXO N° 8	294
PLANOS: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	294

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1.1: Arkananian, vertedero escalonado más antiguo del mundo.....	2
Figura No. 1.2: Vertedero del río Khajoun.....	2
Figura No. 1.3: Vertedero escalonado en una presa de tierra	6
Figura No. 1.4: Marco Conceptual del trabajo de investigación	7
Figura No. 2.1: Rápidas escalonadas (A) Presa Gold Creek, Australia; (B) Represa inferior Siah-Bishe, Irán; (C) Aliviadero escalonado de la presa Pedrógão, Portugal	8
Figura No. 2.2: Esquema típico de un perfil de cresta para un aliviadero escalonado empinado	10
Figura No. 2.3: Tipos de vertido en una rápida escalonada.....	11
Figura No. 2.4: Flujo escalón a escalón con resalto hidráulico totalmente desarrollado	13
Figura No. 2.5: Flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado	14
Figura No. 2.6: Flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado	14
Figura No. 2.7: Flujo en transición	16
Figura No. 2.8: Flujo rasante.....	17
Figura No. 2.9: Flujo rasante tipo SK1	18
Figura No. 2.10: Flujo rasante tipo SK2	19
Figura No. 2.11: Flujo rasante tipo SK3	19
Figura No. 2.12: Flujo bifásico (aire – agua) en flujo rasante.....	23
Figura No. 2.13: Ondulación de la lámina libre cerca del punto de inicio de aireación.....	25
Figura No. 2.14: Desarrollo de la capa límite en un canal abierto con condición de entrada ideal.....	30
Figura No. 2.15: Esquema de un vertedero escalonado	45

Figura No. 2.16: Ejemplos de configuraciones con estructuras adicionales sobre el perfil escalonado, para mejorar la tasa de disipación de energía en flujo rasante	51
Figura No. 2.17: Ejemplo de configuraciones para analizar la tasa de disipación de energía en flujo escalón-escalón.....	52
Figura No. 3.1: Proyección lineal del sistema modelo – prototipo.....	59
Figura No. 3.2: Regímenes de flujo según el número de Reynolds. (a) Laminar, bajos Re . (b) Transición, intermedios Re . (c) Turbulento, Altos Re	68
Figura No. 3.3: Condición de similitud en modelo (Similitud de Froude) incluyendo efectos de viscosidad y de rugosidad	80
Figura No. 3.4: Esquema de la Implantación de la Instalación Experimental de la Rápida Escalonada en el Laboratorio del CIERHI – EPN.....	82
Figura No. 3.5: Esquema de los componentes de la Instalación Experimental de la Rápida Escalonada	83
Figura No. 3.6: Esquema tridimensional de la Instalación Experimental de la Rápida Escalonada. A) Vista lateral derecha, B) Vista lateral izquierda	84
Figura No. 3.7: Vista tridimensional del tanque de abastecimiento y uniformización	87
Figura No. 3.8: Vista tridimensional de la rápida escalonada	90
Figura No. 3.9: Vista tridimensional del canal de salida.....	91
Figura No. 3.10: Principales componentes de la instalación Experimental de la rápida escalonada.....	94
Figura No. 3.11: A) Estación total (marca Topcon), B) Nivel topográfico (marca Wild Heerbrugg Switzerland).....	96
Figura No. 3.12: Vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales.....	96
Figura No. 3.13: Detalle de la pared del vertedero rectangular.....	98
Figura No. 3.14: Valores de δL , para el ajuste de la longitud de la cresta del vertedero	99

Figura No. 3.15: Coeficientes de descarga para vertederos rectangulares con contracciones laterales.....	99
Figura No. 3.16: Esquema del vertedero rectangular, con sus respectivas dimensiones	100
Figura No. 3.17: Probeta graduada de plástico.....	102
Figura No. 3.18: Distanciómetro láser.....	103
Figura No. 3.19: Esquema de los puntos donde se tomó lecturas con el nivel y estación total, para elaboración del levantamiento de la Instalación Experimental (Vista lateral izquierda).....	104
Figura No. 3.20: Esquema de los puntos donde se tomó lecturas con la estación total para elaboración del levantamiento de la Instalación Experimental (Vista en planta)	105
Figura No. 3.21: Esquema de los puntos donde se tomó lecturas con el distanciómetro y calibrador en los escalones de la Instalación Experimental (Vista en planta)	109
Figura No. 3.22: Esquema del vertedero con las dimensiones consideradas para su construcción	111
Figura No. 3.23: Abaco para encontrar el valor de δL	112
Figura No. 3.24: Abaco para determinar el coeficiente de descarga (C_e)	113
Figura No. 4.1: Volumen de control y secciones de frontera para el cálculo de la disipación de energía.	157
Figura No. 4.2: Esquema para la identificación de variables que intervienen en el fenómeno hidráulico, zona no aireada.....	159
Figura No. 4.3: Esquema de identificación de variables que intervienen en el fenómeno hidráulico en la zona aireada.....	164
Figura No. 4.4: Modificaciones y propuestas de optimización para rápidas escalonadas, en cuanto a disipación de energía se refiere.....	168
Figura No. 4.5: Esquema tridimensional de la configuración tipo zigzag implementada en la rápida escalonada a 45°	169

Figura No. 4.6: Dimensionamiento de la propuesta de optimización con tabiques triangulares	169
Figura No. 4.7: Dimensiones del tabique triangular	170
Figura No. 4.8: Esquema en planta de la distribución en zigzag de los tabiques triangulares	171
Figura No. 4.9: Factor de fricción de Darcy – Weisbach para flujo rasante sobre una rápida escalonada en función de la rugosidad relativa del escalón ($h \cos \alpha / D_h$). (Para: $\alpha > 10^\circ$; $h > 0.02$ m ; $Re > 1.105$)	204

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No. 2.1: Ecuaciones para identificar los límites del flujo escalón a escalón	14
Cuadro No. 2.2: Ecuaciones para identificar los límites del flujo en transición	16
Cuadro No. 2.3: Ecuaciones para identificar el inicio del flujo rasante	20
Cuadro No. 2.4: Relaciones para identificar el punto de inicio del arrastre de aire	31
Cuadro No. 2.5: Profundidad del flujo autoaireado al 90% de concentración de aire	34
Cuadro No. 2.6: Concentración media de aire	37
Cuadro No. 2.7: Distribución de velocidades	40
Cuadro No. 2.8: Relaciones experimentales del coeficiente de fricción y factor de fricción para flujo agua–aire.	43
Cuadro No. 2.9: Relaciones experimentales para el cálculo de la energía residual	47
Cuadro No. 2.10: Estudios en modelo físico	53
Cuadro No. 3.1: Clasificación de los modelos físicos según sus características	60
Cuadro No. 3.2: Proceso del desarrollo de obtención de soluciones de un determinado problema, con modelación física y numérica.....	62
Cuadro No. 3.3: Magnitudes homogéneas para diferentes sistemas de unidades, según sus dimensiones	64
Cuadro No. 3.4: Similitudes restringidas según el tipo de fuerza predominante	76
Cuadro No. 3.5: Relaciones entre las escalas de diferentes magnitudes, para la similitud restringida de Froude	78
Cuadro No. 3.6: Dimensiones geométricas del canal de aproximación	87
Cuadro No. 3.7: Dimensiones geométricas de la rápida escalonada.....	89
Cuadro No. 3.8: Dimensiones geométricas del canal de salida	90
Cuadro No. 3.9: Dimensiones geométricas del tanque y canal de descarga	92

Cuadro No. 3.10: Dimensiones geométricas del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales	100
Cuadro No. 3.11: Comparación entre las coordenadas del plano con las coordenadas construidas en la instalación experimental	106
Cuadro No. 3.12: Comparación entre las cotas medidas en la instalación experimental construida y las cotas establecidas en los planos previos a la construcción	107
Cuadro No. 3.13: Comparación entre el ángulo de la rápida escalonada construida y el ángulo establecido en los planos previos a la construcción	107
Cuadro No. 3.14: Comparación entre las pendientes con las cuales se construyeron el canal de aproximación y el canal de salida y las pendientes establecidas en los planos previos a la construcción	108
Cuadro No. 3.15: Valor promedio de las mediciones de longitud realizadas con distanciómetro al fondo escalonado	110
Cuadro No. 3.16: Valores promedios de las mediciones de huella y contrahuella realizadas con calibrador al fondo escalonado	110
Cuadro No. 3.17: Restricciones para vertederos rectangulares parcialmente contraídos y verificación de los mismos para las condiciones de diseño	111
Cuadro No. 3.18: Datos experimentales obtenidos del aforo volumétrico del vertedero rectangular	115
Cuadro No. 3.19: Desviación porcentual entre los valores de caudal obtenidos a partir de las ecuaciones de las curvas de descarga teórica y experimental	119
Cuadro No. 3.20: Plan de pruebas Diseño Original	121
Cuadro No. 3.21: Números adimensionales de Froude para el tramo de aproximación	122
Cuadro No. 3.22: Números adimensionales de Reynolds para el tramo de aproximación	123
Cuadro No. 3.23: Números adimensionales de Weber para el tramo de aproximación	124
Cuadro No. 3.24: Números adimensionales de Froude para la rápida de fondo escalonado. Región uniforme del flujo rasante.	125

Cuadro No. 3.25: Números adimensionales de Reynolds para la rápida de fondo escalonado.....	126
Cuadro No. 3.26: Números adimensionales de Weber para la rápida escalonada	126
Cuadro No. 3.27: Números adimensionales de Froude para el canal de salida	127
Cuadro No. 3.28: Números adimensionales de Reynolds para el canal de salida	128
Cuadro No. 3.29: Números adimensionales de Weber para el canal de salida	129
Cuadro No. 4.1: Resultados de la modelación numérica en ANSYS CFX y los resultados experimentales para el diseño original.....	153
Cuadro No. 4.2: Concentración media de aire con diseño original	154
Cuadro No. 4.3: Factor de Fricción de Darcy - Weisbach para flujo bifásico con diseño original	156
Cuadro No. 4.4: Porcentaje de disipación de energía en la rápida escalonada para condiciones de flujo rasante con diseño original	157
Cuadro No. 4.5: Parámetros adimensionales para la zona no aireada. Diseño original.....	161
Cuadro No. 4.6: Parámetros adimensionales para la zona aireada, región uniforme. Diseño original.....	165
Cuadro No. 4.7: Distancias a las cuales son colocados los tabiques triangulares (Vista en Planta).....	170
Cuadro No. 4.8: Plan de pruebas Diseño Modificado	172
Cuadro No. 4.9: Resultados obtenidos a partir de la modelación numérica en ANSYS y comparación con los resultados obtenidos mediante el análisis experimental para el diseño modificado	191
Cuadro No. 4.10: Determinación de la concentración media de aire con diseño modificado.....	192
Cuadro No. 4.11: Factor de Fricción de Darcy - Weisbach para flujo bifásico con diseño modificado	193
Cuadro No. 4.12: Porcentaje de disipación de energía en la rápida escalonada para condiciones de flujo rasante. Diseño modificado	194

Cuadro No. 4.13: Parámetros adimensionales para la zona no aireada. Diseño modificado.....	196
Cuadro No. 4.14: Parámetros adimensionales para la zona aireada. Diseño modificado.....	199
Cuadro No. 4.15: Datos para elaborar la gráfica de Factor de Fricción de Darcy – Weisbach vs Parámetro adimensional $h \cos \alpha / Dh$	201

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico No. 3.1: Curva de descarga experimental y ecuación de tendencia obtenidas a partir del aforo volumétrico	116
Gráfico No. 3.2: Curva de descarga teórica y ecuación de tendencia obtenidas a partir de la ecuación de Kindsvater–Carter	117
Gráfico No. 3.3: Comparación entre las curvas de descarga obtenidas a partir de la literatura técnica y datos experimentales para el vertedero rectangular de pared delgada instalado en el canal de descarga	118
Gráfico No. 4.1: Porcentajes de disipación de energía para cada uno de los caudales establecidos en el plan de pruebas con diseño original	158
Gráfico No. 4.2: Grafico adimensional para la zona no aireada $q/\sqrt{ks^3 * g}$ vs Li/ks	161
Gráfico No. 4.3: Curva adimensional para la zona no aireada $q/\sqrt{ks^3 * g}$ vs yi/ks	162
Gráfico No. 4.4: Curva adimensional para la zona aireada Hd/yc vs $\Delta E/Et$ (%), región uniforme.	165
Gráfico No. 4.5: Curva adimensional para la zona aireada ks/yc vs yu/be , región uniforme	166
Gráfico No. 4.6: Porcentajes de disipación de energía para cada uno de los caudales establecidos en el plan de pruebas. Diseño modificado	194
Gráfico No. 4.7: Curva adimensional para la zona no aireada $q/\sqrt{ks^3 * g}$ vs Li/ks	196
Gráfico No. 4.8: Curva adimensional para la zona no aireada $q/\sqrt{ks^3 * g}$ vs yi/ks	197
Gráfico No. 4.9: Curva adimensional para la zona aireada Hd/yc vs $\Delta E/Et$ (%)	199
Gráfico No. 4.10: Curva adimensional para la zona aireada ks/yc vs yu/be	200
Gráfico No. 4.11: Factor de Fricción de Darcy – Weisbach vs Parámetro adimensional $h \cos \alpha / Dh$	202

Gráfico No. 4.12: Comparación de curvas adimensionales para la zona no aireada, entre el diseño original y modificado	205
Gráfico No. 4.13: Comparación de curvas adimensionales para la zona no aireada, entre el diseño original y modificado	206
Gráfico No. 4.14: Comparación de curvas adimensionales para la zona aireada, entre el diseño original y modificado	207
Gráfico No. 4.15: Comparación de curvas adimensionales para la zona aireada, entre el diseño original y modificado	209
Gráfico No. 5.1: Curvas adimensionales de la zona no aireada (x: diseño original; Δ : diseño modificado).....	218
Gráfico No. 5.2: Curvas adimensionales de la zona aireada (x: diseño original; Δ : diseño modificado).....	218

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía No. 2.1: Zona no aireada.....	24
Fotografía No. 2.2: Flujo parcialmente aireado.....	25
Fotografía No. 2.3: Flujo completamente aireado.....	26
Fotografía No. 2.4: Flujo aireado (zona uniforme)	27
Fotografía No. 3.1: Tanque de abastecimiento, tubería y accesorios.....	86
Fotografía No. 3.2: Estructura de soporte tanque de abastecimiento y accesorios	86
Fotografía No. 3.3: Tramo de aproximación construido en acrílico.....	88
Fotografía No. 3.4: Tramo de aproximación en el interior del tanque de abastecimiento	88
Fotografía No. 3.5: Rápida escalonada construida en acrílico	89
Fotografía No. 3.6: Canal de salida construido en acrílico	91
Fotografía No. 3.7: Tanque y canal de descarga.....	93
Fotografía No. 3.8: Vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales en funcionamiento	101
Fotografía No. 3.9: Limnímetros usados en la instalación experimental A) limnímetros fijos en el canal de descarga, B) limnómetro móvil en el canal de aproximación	101
Fotografía No. 3.10: Reglas y cintas métricas ubicadas en la instalación experimental.....	102
Fotografía No. 3.11: Longitud, huella y contrahuella del escalón	109
Fotografía No. 3.12: Aforo volumétrico para vertedero rectangular de pared delgada, medición de caudales.....	114
Fotografía No. 3.13: Aforo volumétrico para vertedero rectangular de pared delgada, medición de cargas sobre el vertedero.....	115
Fotografía No. 3.14: Canal de aproximación	122
Fotografía No. 3.15: Rápida de fondo escalonado	125
Fotografía No. 3.16: Canal de salida al pie de la rápida escalonada.....	127

Fotografía No. 4.1: Prueba 0. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	133
Fotografía No. 4.2: Prueba 0. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	133
Fotografía No. 4.3: Prueba 0. (A) Vista frontal y (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada	134
Fotografía No. 4.4: Prueba 0. Vista lateral izquierda. Identificación de la presencia de vórtices	134
Fotografía No. 4.5: Prueba 0. Vista lateral izquierda. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	134
Fotografía No. 4.6: Prueba 0. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	135
Fotografía No. 4.7: Prueba 1. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	136
Fotografía No. 4.8: Prueba 1. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	136
Fotografía No. 4.9: Prueba 1. (A) Vista frontal y (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada	137
Fotografía No. 4.10: Prueba 1. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	137
Fotografía No. 4.11: Prueba 1. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	137
Fotografía No. 4.12: Prueba 1. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	138
Fotografía No. 4.13: Prueba 2. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	139
Fotografía No. 4.14: Prueba 2. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	139
Fotografía No. 4.15: Prueba 2. (A) Vista frontal, (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (C) Identificación del inicio de autoaireación	140
Fotografía No. 4.16: Prueba 2. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	140

Fotografía No. 4.17: Prueba 2. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	141
Fotografía No. 4.18: Prueba 2. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	141
Fotografía No. 4.19: Prueba 3. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	142
Fotografía No. 4.20: Prueba 3. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	143
Fotografía No. 4.21: Prueba 3. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	143
Fotografía No. 4.22: Prueba 3. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	144
Fotografía No. 4.23: Prueba 3. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	144
Fotografía No. 4.24: Prueba 3. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	144
Fotografía No. 4.25: Prueba 4. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	146
Fotografía No. 4.26: Prueba 4. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	146
Fotografía No. 4.27: Prueba 4. Prueba 3. (A) Vista frontal, (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (C) Identificación del inicio de autoaireación	147
Fotografía No. 4.28: Prueba 4. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	147
Fotografía No. 4.29: Prueba 4. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	148
Fotografía No. 4.30: Prueba 4. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	148
Fotografía No. 4.31: Prueba 5. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	149
Fotografía No. 4.32: Prueba 5. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	150

Fotografía No. 4.33: Prueba 5. (A) Vista frontal y (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada	150
Fotografía No. 4.34: Prueba 5. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	150
Fotografía No. 4.35: Prueba 5. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	151
Fotografía No. 4.36: Prueba 5. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	151
Fotografía No. 4.37: Colocación de tabiques triangulares a lo largo de toda la rápida escalonada	171
Fotografía No. 4.38: Prueba 0. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	173
Fotografía No. 4.39: Prueba 0. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	173
Fotografía No. 4.40: Prueba 0. Vista superior del inicio de la rápida escalonada.....	173
Fotografía No. 4.41: Prueba 0. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	174
Fotografía No. 4.42: Prueba 0. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	174
Fotografía No. 4.43: Prueba 0. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	174
Fotografía No. 4.44: Prueba 1. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	176
Fotografía No. 4.45: Prueba 1. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	176
Fotografía No. 4.46: Prueba 1. Vista superior del inicio de la rápida escalonada.....	176
Fotografía No. 4.47: Prueba 1. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	177
Fotografía No. 4.48: Prueba 1. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	177
Fotografía No. 4.49: Prueba 1. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	177

Fotografía No. 4.50: Prueba 2. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	179
Fotografía No. 4.51: Prueba 2. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	179
Fotografía No. 4.52: Prueba 2. (A) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (B) Identificación del inicio de autoaireación	179
Fotografía No. 4.53: Prueba 2. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	180
Fotografía No. 4.54: Prueba 2. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	180
Fotografía No. 4.55: Prueba 2. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	180
Fotografía No. 4.56: Prueba 3. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	182
Fotografía No. 4.57: Prueba 3. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	182
Fotografía No. 4.58: Prueba 3. (A) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (B) Identificación del inicio de autoaireación	182
Fotografía No. 4.59: Prueba 3. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	183
Fotografía No. 4.60: Prueba 3. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	183
Fotografía No. 4.61: Prueba 3. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	183
Fotografía No. 4.62: Prueba 4. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	185
Fotografía No. 4.63: Prueba 4. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	185
Fotografía No. 4.64: Prueba 4. (A) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (B) Identificación del inicio de autoaireación	185
Fotografía No. 4.65: Prueba 4. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices	186

Fotografía No. 4.66: Prueba 4. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	186
Fotografía No. 4.67: Prueba 4. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	186
Fotografía No. 4.68: Prueba 5. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.....	188
Fotografía No. 4.69: Prueba 5. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire	188
Fotografía No. 4.70: Prueba 5. (A) Vista frontal y (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada	188
Fotografía No. 4.71: Prueba 5. Vista lateral derecha. Identificación del inicio de la formación de vórtices	189
Fotografía No. 4.72: Prueba 5. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme	189
Fotografía No. 4.73: Prueba 5. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida	189
Fotografía No. 5.1: Prueba 1. $Q = 23$ l/s. Vista lateral derecha de los escalones No. 38 a No. 42. (A) Diseño original. (B) Diseño Modificado.....	216
Fotografía No. 5.2: Prueba 5. $Q = 78$ l/s. Vista lateral derecha de los escalones No. 78 a No. 82. (A) Diseño original. (B) Diseño Modificado.....	216

NOTACIÓN

Símbolo	Definición	Unidad
a, b	Coeficiente para el ajuste potencial de la distribución del caudal específico.	Adimensional
f_e	Factor de fricción de Darcy-Weisbah para flujo bifásico	Adimensional
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
h	Altura del escalón (contrahuella)	m
k_s	Rugosidad de forma; $k_s = h \cdot \cos \alpha$	m
l	Longitud del escalón (huella)	m
q	Caudal unitario	$m^3/s \cdot m$
Fr	Número de Froude	Adimensional
Re	Numero de Reynolds	Adimensional
ρ	Densidad del agua	Kg/m^3
μ	Viscosidad dinámica del agua	$N \cdot s/m^2$
R_h	Radio hidráulico de la sección transversal	m
ν	Viscosidad cinemática del agua	m^2/s
We	Número de Weber	Adimensional
σ	Tensión superficial del agua	N/m
E_u	Numero de Euler	Adimensional
Ca	Numero de Cauchy	Adimensional
Ma	Número de Mach	Adimensional
α	Angulo de inclinación de la rápida escalonada	°
H_d	Altura de la rápida escalonada	m

B	Base (ancho) de la rápida escalonada y canales de aproximación y salida	m
Q	Caudal	l/s
y_c	Profundidad crítica	m
Q_{min}	Caudal mínimo de operación para obtener flujo rasante en la rápida escalonada	l/s
y	Profundidad de flujo	cm
v	Velocidad de flujo	m/s
C_m	Concentración media de aire	Adimensional
y_w	Profundidad de agua clara	cm
v_w	Velocidad de agua clara	m/s
E_1, E_t	Energía total en el canal de aproximación	m
E_2, E_r	Energía residual en el canal de salida	m
ΔE	Perdida de energía	m
$\Delta E/E_t$	Porcentaje de disipación de energía	%
π_n	Números adimensionales correspondientes al análisis dimensional	Adimensional
L_i	Longitud medida desde la cresta de la rápida escalonada hasta el punto aguas abajo donde se inicia la introducción natural de aire	m
y_i	Profundidad de flujo en el punto de inicio de introducción natural de aire	cm
b_e	Ancho efectivo en el cual se desarrolla el vórtice de eje horizontal	m
y_u	Profundidad de flujo en la zona uniforme	m
b	Distancia de separación entre tabiques triangulares	cm
t	Espesor de tabiques triangulares	cm

n	Numero de tabiques triangulares colocados a lo largo de toda la rápida escalonada	Adimensional
V_m	Velocidad media al pie de la rápida escalonada obtenida mediante la Modelación Numérica	m/s
Y_u	Profundidad del flujo bifásico (Modelo Numérico)	m

RESUMEN

Los vertederos escalonados son estructuras hidráulicas cuyo sistema constructivo es muy utilizado desde la antigüedad hasta nuestros días, a menudo se utilizan como disipadores de energía en canales y ríos, como aireadores en plantas de tratamiento o como vertedores y/o canales para peces en presas y diques.

El presente trabajo de investigación se enfoca en el análisis del comportamiento de flujo rasante sobre una rápida escalonada con pendiente ($\alpha = 45^\circ$) y alturas de escalón simétricas ($h = 0.05$ m y $l = 0.05$ m), a la cual posteriormente se le implementará tabiques triangulares, colocados sobre el fondo escalonado.

Para cumplir con el propósito deseado, la investigación se ha dividido en dos partes: la primera parte consiste en entender el comportamiento hidráulico del flujo para un canal escalonado convencional, con flujo de aproximación de ingreso subcrítico y evaluar la tasa de disipación de energía; mientras que la segunda parte consiste en estudiar el comportamiento hidráulico del flujo al implementar a dicho sistema, estructuras triangulares con el fin de determinar la relación existente entre la geometría del fondo escalonado y la tasa de disipación de energía.

En lo que corresponde a la etapa de diseño original, se inicia con la revisión de la literatura técnica, el diseño y la construcción de la instalación experimental, para seguidamente desarrollar el plan de pruebas dentro de un rango de caudales establecido. En la etapa de diseño modificado se realiza la construcción de las estructuras adicionales, respetando los parámetros de diseño considerados previamente para el diseño original, finalizado el proceso constructivo se procede a la implantación y ejecución de las pruebas con los mismos caudales del diseño inicial.

Finalmente, se realiza el análisis y la comparación de los resultados experimentales sobre la disipación de energía a lo largo de la rápida escalonada entre el diseño original y el diseño modificado. De esto se destaca que con los tabiques triangulares no se consiguió incrementar la tasa de disipación de energía y, por el contrario, estas estructuras ocasionaron una disminución en la misma.

ABSTRACT

The stepped spillways are physical structures whose construction system is used since antiquity to present days, they are often used as energy dissipators in channels and rivers, as aerators in treatment plants or as spouts and/ or channels for fish in dams and dykes.

The present research works focuses in the analysis of the behavior of skimming flow on stepped spillways with slope ($\alpha = 45^\circ$) and heights of step symmetrical ($h = 0.05$ m and $l = 0.05$ m), that later will be implemented with triangular vanes, placed on the stepped bottom.

To achieve this purpose, the research has been divided into two parts: the first consists in understanding the flow behavior for a conventional stepped channel, with subcritical flow approximation income and evaluate the energy dissipation rate; while the second part consists of studying the hydraulic behavior of the flow when implementing said system, triangular structures to determine the relationship between the geometry of the stepped bottom and the energy dissipation rate.

In original design stage, it begins with the review of the technical literature, design and construction of the experimental installation, to then develop the test plan within a range of established flow. In the modified design stage, the modified design stage, the construction of the additional structures is carried out, respecting the design parameter previously considered for the original design. Once, the construction process is completed, the tests are started and run with the same initial design flows.

Finally, the analysis and comparison of the experimental results on the dissipation of energy along the stepped spillways between the original design and the modified design is performed. However, it is emphasized that with the triangular vanes it wasn't possible to increase the rate of dissipation of energy and on the contrary, these structures caused a decrease in it.

PRESENTACIÓN

Esta investigación consta de 5 capítulos, donde se detalla detenidamente el estado del arte, criterios de diseño, la construcción de la instalación experimental en diseño original y diseño modificado, el plan de pruebas a ejecutarse con 6 diferentes caudales, el análisis de los resultados y finalmente las conclusiones y futuras investigaciones. El trabajo está organizado como se muestra a continuación:

CAPÍTULO 1: Introducción General

En este capítulo se presenta una introducción sobre la rápida escalonada, antecedentes del uso y aplicación de esta estructura, objetivo general y objetivos específicos que se han propuesto para el presente trabajo de titulación y el alcance que se tendrá de la investigación.

CAPÍTULO 2: Bases y criterios de diseño. Estado del arte en rápidas escalonadas.

Se resume el estado del arte sobre las rápidas escalonadas, las propiedades del flujo bifásico “agua – aire”, arrastre de aire, distribución de velocidades, factor de fricción, así como la disipación de energía. Se presenta además una breve revisión de la literatura técnica sobre investigaciones recientes, referentes a la incorporación de estructuras adicionales sobre el perfil escalonado.

CAPÍTULO 3: Base teórica sobre Modelación Hidráulica. Descripción, construcción y calibración de la Instalación Experimental.

En este capítulo se describe la construcción tanto en diseño original como diseño modificado correspondiente a la instalación experimental, se incluye registro fotográfico, equipos de medición y calibración.

CAPÍTULO 4: Análisis Experimental: Resultados y Discusión.

En este capítulo se detalla cada uno de los ensayos a realizarse en la rápida escalonada tanto sin tabiques triangulares como con la incorporación de estos. Además, se presenta los resultados de las pruebas realizadas, (profundidad de flujo equivalente y característico, velocidad media, factor de fricción y disipación de energía), posteriormente se analizará y comparará estos resultados con los mencionados en la literatura técnica consultada.

CAPÍTULO 5: Síntesis, Conclusiones y Trabajos Futuros.

En este último capítulo se presenta las conclusiones de los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo de titulación y recomendaciones para futuros trabajos de investigación.

Finalmente se presenta un conjunto de anexos, donde se encuentran los reportes de las pruebas realizadas, planos correspondientes al diseño y registro fotográfico de la construcción del modelo y del desarrollo del plan de pruebas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

En este capítulo se presentan generalidades sobre los antecedentes de uso y aplicación de rápidas escalonadas, los objetivos generales, específicos y el alcance que tendrá el presente trabajo de titulación.

1.1 INTRODUCCIÓN

Los vertederos escalonados son estructuras hidráulicas empleadas desde la antigüedad, existen referencias de hace 3300 años, siendo Arkanania en Grecia, 1300 A.C uno de los primeros en utilizarlos (Chanson,2002). Esta técnica fue aplicada con frecuencia hasta finales del siglo XIX por contribuir a la disipación de energía y a la estabilidad de la presa. A partir del siglo XX se evidenció una disminución en la construcción de este tipo de estructuras hidráulicas, debido al creciente uso de cuencos de disipación, que al igual que las rápidas escalonadas tienen la función de disipar la energía.

Sin embargo, en los años 70 se incorporan nuevas tecnologías constructivas como el hormigón compactado con rodillo HCR y los gaviones, retomando el enfoque en el estudio del comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados.

La construcción de aliviaderos escalonados ha presentado un importante crecimiento, relacionado especialmente con la aplicación de presas de hormigón compactado con rodillo (HCR), permitiendo una construcción mucho más barata, rápida y eficaz. La presencia de los escalones incrementa de manera considerable la resistencia al flujo y la disipación de energía, lo cual permite reducir las dimensiones de las estructuras disipadoras ubicado aguas abajo de la rápida y la posibilidad de evitar la construcción de estas (Boes & Hager, 2003b).

Diversos estudios realizados sobre vertederos escalonados analizan el flujo, no obstante, estudios previos a 1993 no consideran los efectos de la autoaireación por cuanto a partir de dicha fecha, la mayoría de los estudios se han enfocado en vertederos escalonados con pendientes pronunciadas ($\alpha \approx 45^\circ$), características de presas a gravedad.

Figura No. 1.1: Arkananian, vertedero escalonado más antiguo del mundo
(Grecia A.C 1.300)



Fuente: Gonzalez, C. (2005).

Figura No. 1.2: Vertedero del río Khajoun
(Persia Grecia D.C 1.650)



Fuente: Gonzalez, C. (2005).

En la actualidad existe un abierto interés por ampliar el conocimiento hidráulico de los aliviaderos escalonados, lo cual permite generar nuevas tendencias de diseño.

De la literatura se pueden mencionar algunas investigaciones como: Felder & Chanson (2011b) quienes estudian la disipación de energía en relación con la variación del tamaño del escalón; Hunt (2008), analiza el comportamiento hidráulico de rápidas escalonadas con cajeros convergentes; Gonzales & Chanson (2005), fijan su estudio en el comportamiento de flujos agua-aire con presencia de tabiques triangulares, entre otros.

Con el fin de mejorar la eficiencia de aliviaderos escalonados, el presente trabajo de investigación fija su estudio experimental en el efecto de los tabiques triangulares simétricos incorporados a lo largo de un fondo escalonado inclinado a 45 grados y su relación con la disipación de energía.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Se establece como objetivo general del presente trabajo de titulación, analizar experimentalmente el flujo rasante y la eficiencia en la disipación de energía de una rápida escalonada, incorporando tabiques triangulares con una distribución de zigzag sobre el perfil escalonado.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

En función del objetivo general planteado, los objetivos específicos considerados para este trabajo son los siguientes:

- Analizar experimentalmente el comportamiento hidráulico del flujo y las características hidrodinámicas del flujo rasante, tanto para el diseño original como para el diseño modificado, el cual incorpora estructuras triangulares en los escalones.
- Evaluar el grado de disipación de energía al pie de la rápida escalonada con flujo rasante para el diseño original y el diseño modificado.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados experimentales incluyendo información actualizada disponible en la literatura técnica.

1.3 ALCANCE EXPERIMENTAL

La presente investigación estará enfocada en el estudio de rápidas escalonadas a 45° (relación huella – contrahuella 1:1) mediante el diseño convencional y con la incorporación de tabiques triangulares (diseño modificado), a fin de conocer el comportamiento del flujo y la eficiencia en la disipación de energía; dado a su aplicabilidad no solo en la evacuación de avenidas en presas, estas estructuras han sido con frecuencia utilizadas como una alternativa de conducción de flujo en canales y ríos y de manera importante en cambios fuertes de nivel, contribuyendo no solo con la disipación de energía, sino también mitigando el riesgo por cavitación.

La Instalación Experimental será desarrollada en el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI-EPN. Con base en la literatura técnica se procede al diseño de la rápida de fondo escalonado con pendiente de 45 grados, seguidamente se procede a la construcción de esta, para continuar con el plan de pruebas, inicialmente no se incorporan estructuras triangulares.

Las pruebas que se ejecutaran en diseño original corresponden a 6 tipos de caudales: 79 l/s, 56l/s, 44l/s, 34l/s, 22l/s y 14l/s; el comportamiento hidráulico bajo estos caudales será analizado para el flujo rasante.

En la segunda etapa del proyecto se incorporan las estructuras adicionales que corresponde a tabiques triangulares los mismos que serán parte esencial para el estudio en cuanto a la disipación de energía.

Las pruebas realizadas de igual manera corresponden a 6 tipos de caudales: 79 l/s, 56l/s, 44l/s, 34l/s, 22l/s y 14l/s. Luego se procede al análisis y a la comparación de la tasa de disipación de energía, ver en el **Capítulo 4**.

1.4 ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE LAS RÁPIDAS ESCALONADAS

Una rápida escalonada es una estructura hidráulica constituida por gradas o escalones donde adicionalmente a la función de descargar agua a lo largo de grandes desniveles, introduce aire de manera natural y genera disipación continua de energía cinética del flujo por el impacto del mismo con los escalones llegando este al pie de la rápida con menor intensidad, razón por la cual se puede omitir la construcción de estructuras que receptan al flujo aguas abajo de la rápida escalonada o la vez en el caso de que sea necesaria su colocación, reduce las dimensiones de las mismas, disminuyendo costos y tiempos de construcción.

Dependiendo de la inclinación de la rápida, las dimensiones de los escalones pueden variar entre los 60 cm a 1 m de contrahuella y la huella del escalón entre 50 cm a 75 cm, siempre que se considere el sistema constructivo.

En la actualidad los caudales de descarga suelen ser sumamente grandes alcanzando los 20 m³/s.m, por lo que resulta importante realizar un correcto diseño de este tipo de estructuras hidráulicas, las mismas que con frecuencia presentan velocidades altas generando problemas por el descenso considerable de la presión y desencadenando graves deterioros de las estructuras.

Para una geometría dada del canal escalonado, el comportamiento general del flujo puede caracterizarse por diferentes regímenes, flujo escalón a escalón, transitorio y rasante (Ohtsu & Yasuda, 1997; Chanson, 2002).

Dentro de las aplicaciones de rápidas escalonadas, se pueden mencionar:

- Control de flujos hiperconcentrados (torrentes de alta montaña), se construyen las denominadas presas de control (caídas sucesivas con alturas comprendidas entre 0.5 a 5 m), con el objetivo de reducir la pendiente, de favorecer la disipación de energía y de prevenir el inicio del flujo hiperconcentrado.
- En presas de materiales sueltos, es común su uso a fin de aumentar la capacidad de desagüe de la presa.
- Disminución de los efectos generados por flujos con alto contenido de sedimento.
- Canales de peces en diques.

- Disipadores de energía en canales y ríos.
- En plantas de depuración, cursos de agua artificiales o naturales, para reoxigenación de aguas con bajo índice de oxígeno disuelto.
- En obras fluviales de regulación, se los construye con gaviones, cuya permeabilidad confiere características especiales.
- Los canales con escalones son usados en estructuras de drenaje pluvial en zonas con elevada pendiente.

Figura No. 1.3: Vertedero escalonado en una presa de tierra



Fuente: Woolbright, R. (2006).

1.5 MARCO CONCEPTUAL DE TRABAJO

Figura No. 1.4: Marco Conceptual del trabajo de investigación



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

CAPÍTULO 2

BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO. ESTADO DEL ARTE EN RÁPIDAS ESCALONADAS

En este capítulo, se presenta un conjunto de criterios hasta la fecha, sobre el comportamiento hidráulico de los vertederos escalonados, el mismo que se ha incorporado como base teórica para el desarrollo del presente proyecto.

2.1 INTRODUCCIÓN

Los estudios iniciales de aliviaderos escalonados en modelo físico empezaron aproximadamente en el año 1980 (Hager y Pfister,2013), paralelo al creciente número de escalones construidos en vertederos, el número de estudios relacionados también incrementó por lo que estudios sobre el comportamiento hidráulico en aliviaderos escalonados permanecen vigentes (Chanson,1994; Chanson & Toombes,2002).

Figura No. 2.1: Rápidas escalonadas (A) Presa Gold Creek, Australia; (B) Represa inferior Siah-Bishe, Irán; (C) Aliviadero escalonado de la presa Pedrógão, Portugal



2.2 CRESTA DEL ALIVIADERO

El objetivo del perfil de la cresta del aliviadero es asegurar una correcta transición del flujo desde el embalse al canal del aliviadero. Un perfil de cresta adecuado debe evitar la presencia de presiones negativas y atender a requerimientos como máxima eficiencia hidráulica, estabilidad y economía.

Muchos estudios realizados para el diseño de la geometría de la cresta en aliviaderos escalonados (Sorensen, Houston, Bayat, Diez-Cascón, entre otros) coinciden en el riesgo de deflexión de la lámina de agua para ciertos caudales o si la altura de los peldaños es muy grande, por tanto, se recomienda que los primeros escalones deben tener un incremento de altura gradual adaptado a un perfil convencional.

Los requisitos para la forma de la cresta varían dependiendo de si la pendiente de la cara aguas arriba del aliviadero es empinada para una presa a gravedad o más plana, como es lo habitual en presas de terraplén. La expresión estándar para determinar la forma de la cresta del aliviadero propuesta por la US Army Corps of Engineers, en base a datos de la US Bureau of Reclamation (Chow, 1999), es:

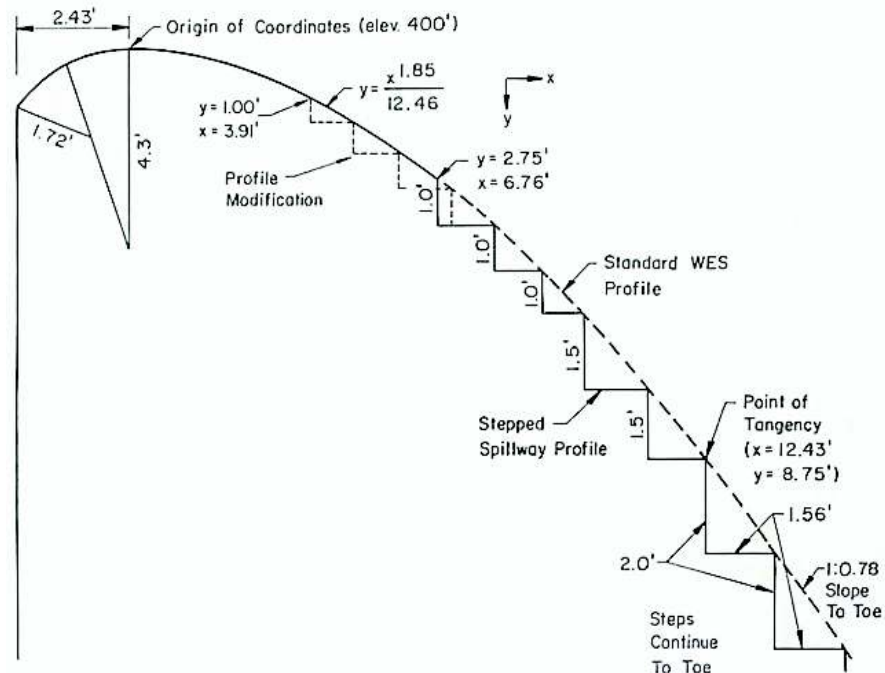
$$x^n = k (H_o)^{n-1} y \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Dónde: x e y , son las coordenadas del perfil de la cresta con su origen en el punto más alto de ésta, H_o es la altura de diseño excluida la altura de velocidad del flujo de aproximación, k y n son parámetros que dependen de la pendiente de la cara aguas arriba. Los valores de k y n son los siguientes:

Pendiente de la cara aguas arriba	k	n
Vertical	2.000	1.850
3 en 1	1.936	1.836
3 en 2	1.939	1.810
3 en 3	1.873	1.776

La **Figura No. 2.2** muestra un típico ejemplo de perfil de cresta para un aliviadero escalonado empinado.

Figura No. 2.2: Esquema típico de un perfil de cresta para un aliviadero escalonado empinado



Fuente: Research State of the Art and Needs for Hydraulic Design of Stepped Spillways. Denver, Colorado, 2006.

De acuerdo con el esquema, el perfil consiste en una porción lisa para una distancia corta hasta cuando el flujo gira, seguido por una serie de pequeños escalones con diferentes alturas de escalón. Los escalones hacia abajo del resto del vertedero desde el punto de tangencia con el perfil están diseñados con una altura constante.

2.3 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL AGUA SOBRE UNA RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO

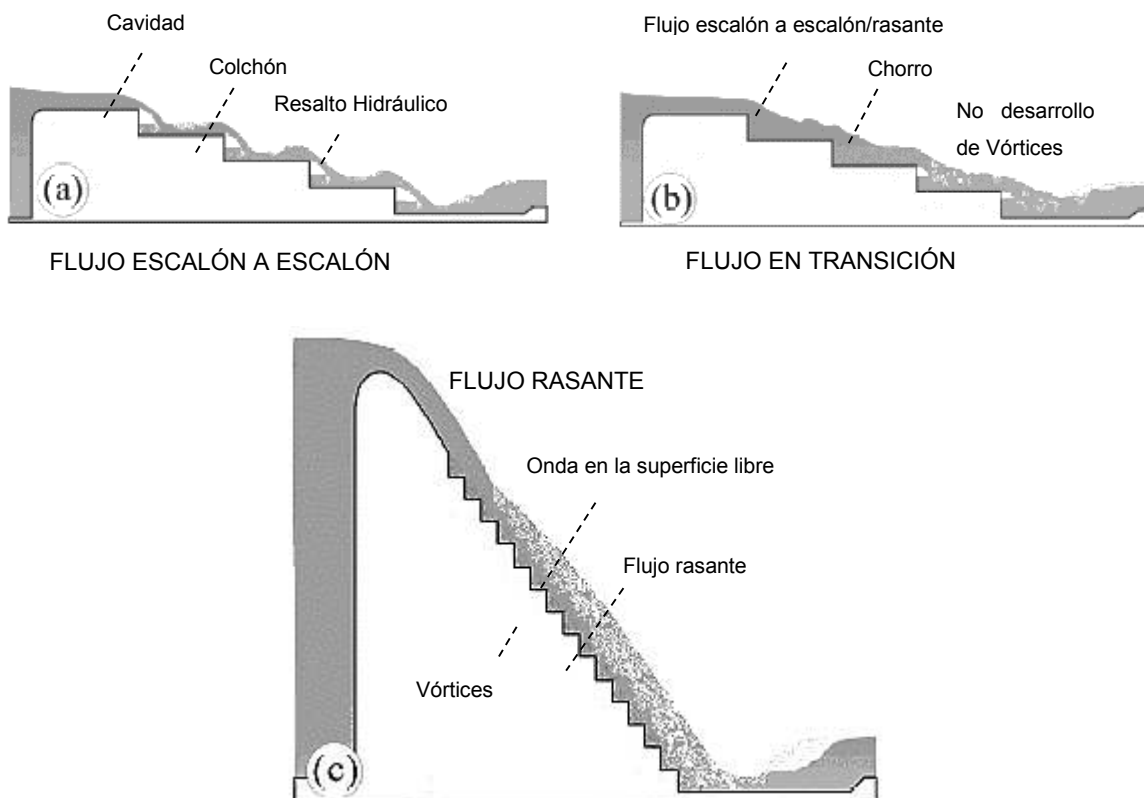
En vertederos escalonados, la alta turbulencia del flujo en la proximidad de los escalones provoca el acortamiento de la zona de flujo irrotacional si se compara con un vertedor de rápida lisa una vez que alcanza el punto donde se inicia la aireación natural, manteniéndose de forma permanente un alto contenido de aire en la masa fluida.

El comportamiento del flujo en aliviaderos escalonados se puede caracterizar por tres diferentes regímenes, estos son escalón a escalón, transitorio y rasante.

Gracias a trabajos de diversos autores (Marines et al., 2001; Chanson, 2001a.; Meireles 2004 y Amador, 2005) se ha podido establecer ecuaciones que permiten identificar los límites de ocurrencia de cada tipo de flujo, sin embargo, la ocurrencia de uno u otro, siempre van a depender de la geometría del escalón y del caudal que circula (Estrella, 2013).

Para caudales pequeños y pendientes bajas se presenta flujo escalón a escalón (nappe flow); mientras que en caudales mayores y pendientes elevadas se establece el flujo rasante (skimming flow). Para el caso de caudales intermedios se presenta flujo de transición.

Figura No. 2.3: Tipos de vertido en una rápida escalonada



Fuente: Andrade, A. & Schulz, H. (2012).

2.3.1 FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN (NAPPE FLOW)

El régimen de flujo escalón a escalón o flujo en láminas; se caracteriza por un proceso continuo de caídas libres del chorro de agua de un escalón a otro. La disipación de energía es producida por el efecto de fragmentación del flujo en el aire, el impacto del flujo contra la superficie horizontal del siguiente escalón y a veces por la formación de un resalto hidráulico en el escalón.

Su presencia es característica en caudales bajos, o bien para rápidas de pendientes bajas (Chanson H, 2015). Estudios realizados por (Essery & Horner, 1978), mencionan la subdivisión de este régimen en dos tipos de flujo, que parten de la forma en que el chorro golpea al escalón.

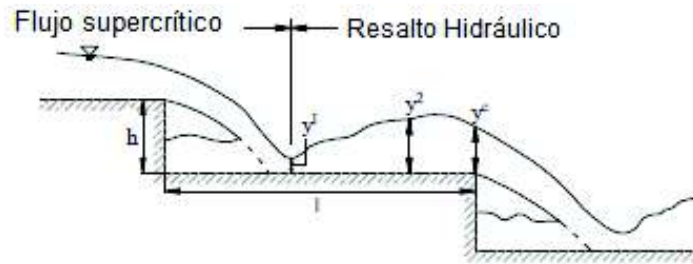
- Flujo escalón a escalón aislado (Isolated nappe flow).
- Flujo escalón a escalón parcial (Partial nappe flow or nappe interference flow).

2.3.1.1 FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN AISLADO

Se presenta cuando la lámina de agua impacta completamente en la huella, dando como resultado la formación de un resalto hidráulico en la huella de cada escalón, el mismo que puede ser totalmente desarrollado o parcialmente desarrollado (tipo NA1 o NA2) dependiendo directamente de la longitud y la altura del escalón.

El flujo escalón a escalón con resalto hidráulico totalmente desarrollado (Isolated nappe flow with fully developed hydraulic jump NA1) se presenta en obras de regularización fluvial pues el diseño requiere bajas caídas. Para caudales unitarios de hasta $1\text{m}^3/\text{s.m}$ y peldaños largos.

Figura No. 2.4: Flujo escalón a escalón con resalto hidráulico totalmente desarrollado



Fuente: Amador, A. (2005)

Basados en estudios experimentales, (Chanson, 1994) propone una expresión considerando el máximo caudal en que ocurre el resalto hidráulico completamente desarrollado, en función de la altura y la longitud de los escalones:

$$\frac{y_c}{h} \leq 0.0916 \left(\frac{h}{l} \right)^{-1.276} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Para el intervalo de: $0.2 \leq \frac{h}{l} \leq 0.6$

Dónde:

y_c : Calado crítico

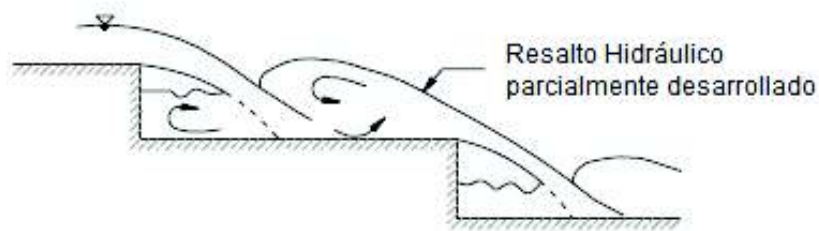
h : Altura de la contrahuella del escalón

l : Longitud de la huella de un escalón

El flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico parcialmente desarrollado (Isolated nappe flow with partially developed hydraulic jump NA2) ocurre únicamente cuando el flujo es supercrítico, existiendo turbulencia aguas abajo de la zona de impacto; en éste una parte cercana a la contrahuella presenta una cavidad de aire (consecuencia del impacto del chorro en el colchón de agua receptor) y un colchón de agua recirculando (Amador, 2005).

En este tipo de flujos escalón a escalón la disipación de energía se da gracias a la fragmentación del chorro en la atmosfera; al impacto y mezcla del chorro en el escalón y a la formación del resalto hidráulico.

Figura No. 2.5: Flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado

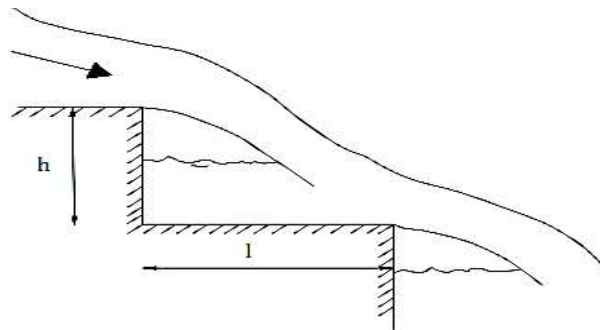


Fuente: Amador, A. (2005).

2.3.1.2 FLUJO ESCALÓN A ESCALÓN PARCIAL

Flujo escalón a escalón tipo NA3 o flujo saltante sin resalto hidráulico, está dado para mayores caudales y/o pendientes más pronunciadas, en los cuales apenas una parte del chorro que impacta en la huella del peldaño. El flujo es siempre supercrítico en el aliviadero. Resulta complejo el comportamiento hidráulico, dado a la presencia de fenómenos tridimensionales en el flujo por ejemplo ondas de choque (Chanson, 2002).

Figura No. 2.6: Flujo escalón a escalón con resalto hidráulico parcialmente desarrollado



Fuente: Amador, A. (2005).

Los límites que determinan la formación del flujo escalón a escalón, se describen en las siguientes ecuaciones.

Cuadro No. 2.1: Ecuaciones para identificar los límites del flujo escalón a escalón

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Ohtsu & Yasuda (1999)	$\left(\frac{h}{Y_c}\right) = 0.57(\tan \theta)^3 + 1.3$	Define el límite inferior para la formación del flujo escalón a escalón: $0.1 \leq \tan \theta \leq 1.43$

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Ohtsu & Yasuda (1999)	$\frac{Y_c}{h} = \frac{\left(1.4 - \frac{h}{l}\right)^{0.26}}{1.4}$	Define el límite superior para la formación del flujo escalón a escalón.
Ohtsu & Yasuda (1997), Chanson (2002) y Amador (2005), se realiza el ajuste de Mínimos cuadrados	$\frac{y_c}{h} = 0.649 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.175}$	Define el límite superior para la formación del flujo escalón a escalón.
Matos (1999)	$\frac{y_c}{h} = 0.634 + 0.446 \exp^{-2.884 \frac{h}{l}}$	Define el límite superior del flujo escalón a escalón.

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

θ : Ángulo de inclinación de la rápida escalonada en grados

y_c : Calado crítico

h : Altura de la contrahuella del escalón

l : Longitud de la huella del escalón

Para obtener este régimen de flujo, las consideraciones prácticas de diseño sugieren que la altura del escalón debe ser considerablemente mayor a la profundidad crítica del flujo (Chanson, 2015).

El flujo saltante o escalón a escalón no se incluyen en el presente estudio. Estudios referentes se pueden encontrar en Peyras et al. (1992), Chamani & Rajarathnam (1994), Toombes & Chanson (2000) y Toombes (2002).

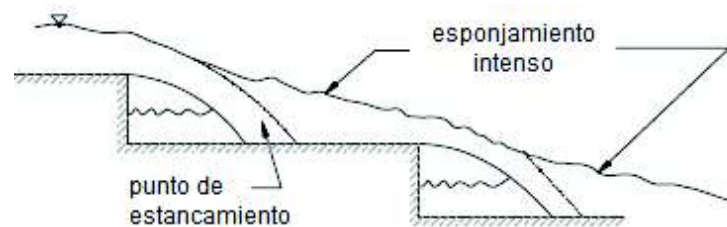
2.3.2 FLUJO EN TRANSICIÓN

El flujo en transición o transitorio se observa cuando el vertedero opera con caudales intermedios (entre flujo escalón a escalón y flujo rasante), este flujo se caracteriza por un comportamiento caótico y movimientos de flujo violentos (salpiqueo), 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 (Mera, 2007).

El comportamiento caótico está asociado a la presencia de cavidades de aire de diferentes formas por debajo de la lámina de agua en algunos escalones, mientras que en otros el flujo secundario presenta recirculación estable, pudiendo ocurrir interacciones flujo – estructura (Amador, 2005).

A pesar de no haberlo estudiado a fondo, Elviro & Mateos (1995), y Ohtsu & Yasuda (1997) fueron los primeros en escribirlo. Chanson & Toombes (2004) realizaron una de las pocas caracterizaciones de flujo transitorio.

Figura No. 2.7: Flujo en transición



Fuente: Amador, A. (2005).

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

Cuadro No. 2.2: Ecuaciones para identificar los límites del flujo en transición

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Chanson & Toombes (2004)	$\frac{Y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \frac{h}{l}$	Límite inferior para la formación del flujo en transición: $0 < \frac{h}{l} < 1.7$
Chanson & Toombes (2004)	$\frac{Y_c}{h} < \frac{0.9821}{\left(\frac{h}{l} + 0.388\right)^{0.384}}$	Límite superior para la formación del flujo en transición: $0 < \frac{h}{l} < 1.5$

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

y_c : Calado crítico

h: Altura de la contrahuella del escalón

l: Longitud de la huella del escalón

El régimen transitorio presenta grandes variaciones longitudinales en su comportamiento hidráulico en cada escalón y entre escalones sucesivos, así como irregularidades en el flujo. Se recomienda evitar este régimen de flujo para el transporte de caudales de volúmenes medianos y grandes (Chanson, 2015).

2.3.3 FLUJO RASANTE (SKIMMING FLOW)

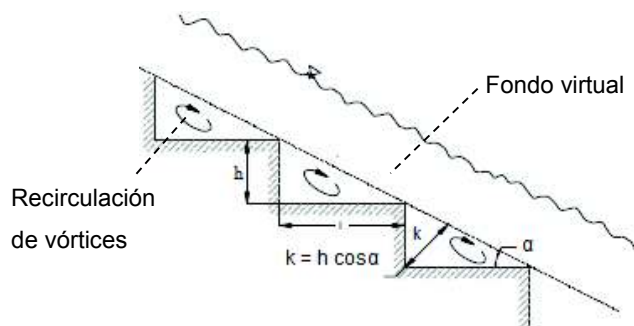
El flujo rasante se caracteriza por el completo sumergimiento de los escalones, y en donde se puede distinguir claramente dos zonas en el vertido.

Una región superior caracterizada por una corriente con elevada concentración de aire que fluye rasante a los vértices de los escalones. Una zona inferior, formada por celdas casi triangulares en las que el agua permanece atrapada (flujo secundario), salvo que se intercambie con el flujo superior gracias a la elevada turbulencia, este flujo secundario, se considera una zona de separación del flujo, y es responsable de la disipación de energía a lo largo del aliviadero (Latessa & Sabarots, 2014).

Una vez se ha desarrollado un flujo rasante sobre la estructura, en cada celda limitada por dos aristas contiguas, tanto si hay entrada de aire como si no, se presenta un vórtice de eje horizontal. De esta manera, el flujo rasante no solo se ve soportado por las aristas de los escalones, sino también por los propios vórtices.

Se crea de esta manera un fondo virtual sobre el cual fluye el vertido, apoyado sobre las aristas de los escalones, siendo la fricción con dicho fondo virtual, la que proporciona la energía suficiente a los vórtices atrapados en las celdas, los cuales al girar frenan el flujo rasante, disipando parte de su energía cinética.

Figura No. 2.8: Flujo rasante



Fuente: Frizell, K. (2006).

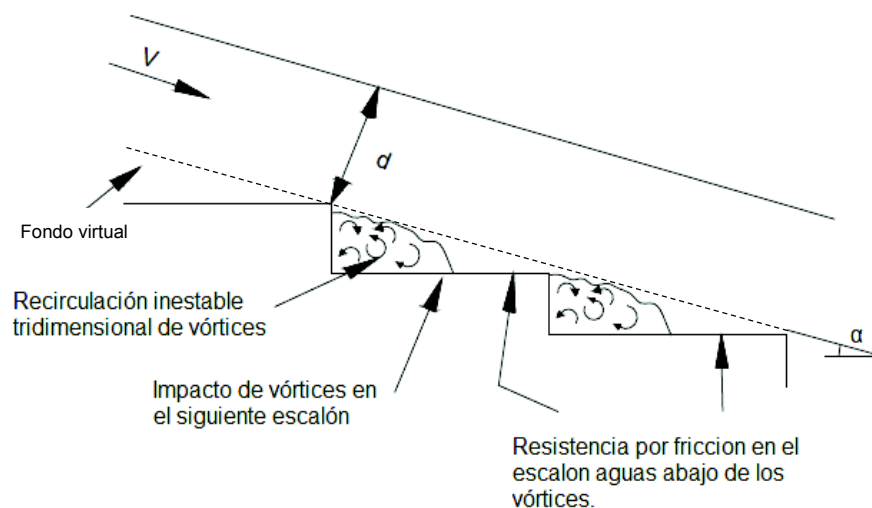
El flujo rasante puede subdividirse, Chanson (1997a) propone tres sub-regímenes, basado en el comportamiento de los vórtices debajo de la corriente principal del flujo.

- Flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario.
- Flujo rasante con cavidad casi - totalmente ocupada por flujo secundario.
- Flujo rasante con una recirculación estable del flujo secundario.

2.3.3.1 FLUJO RASANTE CON CAVIDAD PARCIALMENTE OCUPADA (SK1)

El subrégimen SK1, se presenta en canales no tan pronunciados ($\theta < 12^\circ$), se forma para caudales bajos con presencia de formación de una región de vórtices recirculantes aguas abajo del borde del escalón. Este flujo no se extiende en toda la huella. Los patrones de flujo dentro del flujo son inestables y de naturaleza tridimensional, provocando fricción entre el flujo y la huella.

Figura No. 2.9: Flujo rasante tipo SK1

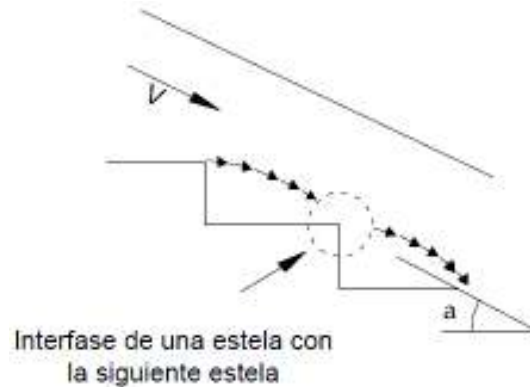


Fuente: Flores, W. (2015).

2.3.3.2 FLUJO RASANTE CON CAVIDAD CASI-TOTALMENTE OCUPADA POR FLUJO SECUNDARIO (SK2)

Subrégimen SK2, aparece con caudales mayores y pendientes bajas ($12^\circ < \theta < 25^\circ$), la región de estela o vórtices de recirculación se extiende en casi toda la huella del escalón e interfiere con la estela siguiente.

Figura No. 2.10: Flujo rasante tipo SK2



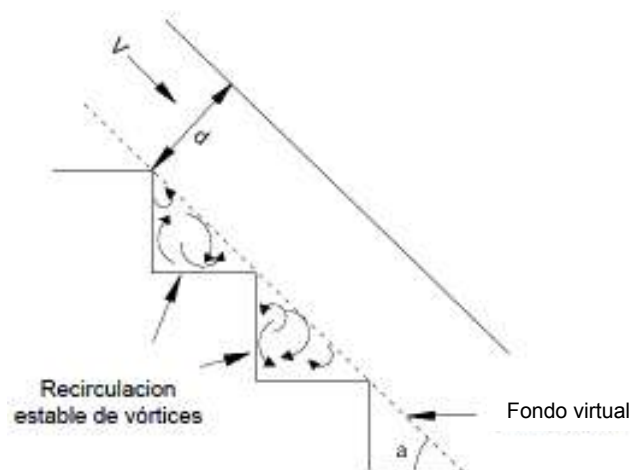
Fuente: Flores, W. (2015).

2.3.3.3 FLUJO RASANTE CON RECIRCULACIÓN ESTABLE (SK3)

El subrégimen SK3, es característico en canales con pendientes altas ($\theta > 25^\circ$, $\frac{h}{l} > 0.5$), el flujo presenta vórtices de recirculación casi-estable, la recirculación cubre totalmente la cavidad delimitada por los vértices exteriores de los escalones (Gonzalez, 2005).

El fondo virtual que separa el flujo superior y el secundario no siempre está definido por los vértices de los peldaños, ya que puede variar dependiendo del peldaño; además los vórtices principales no están siempre en la misma posición y eso se refleja en las mediciones de presión en el centro de asimetría de las huellas en los escalones (Sanchez, 2001).

Figura No. 2.11: Flujo rasante tipo SK3



Fuente: Flores, W. (2015).

Mateos & Elviro 1992, en sus observaciones experimentales introduciendo colorante aprecian que el tiempo estimado de permanencia de éste en la cavidad del escalón, es de 0.25 segundos.

Los parámetros con los cuales se puede identificar la presencia de flujo rasante, según algunos autores se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro No. 2.3: Ecuaciones para identificar el inicio del flujo rasante

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Rajaratnam (1990)	$\frac{y_c}{h} \geq 0.8$ <p>para: $0.4 \leq \frac{h}{l} \leq 0.9$</p>	Define el inicio de flujo rasante
Diez – Cascón (1991)	$\frac{y_c}{h} = 0.9$	Define el inicio de flujo rasante para: $\frac{h}{l} = 1.333$
Degoutte et al. (1992)	$\frac{y_c}{h} = 0.74$ <p>para $\frac{h}{l} = 0.33$</p> $\frac{y_c}{h} = 0.62$ <p>para $\frac{h}{l} = 1$</p>	Define el inicio de flujo rasante para aliviaderos escalonados formados por gaviones.
Chanson (1994)	$\frac{y_c}{h} = 1.057 - 0.465 \frac{h}{l}$	Inicio del flujo rasante para pendientes de $11.3^\circ < \alpha < 38.7^\circ$
Chanson (1996)	$\frac{y_c}{h} = \frac{F_{ri}^{2/3} \sqrt{1 + \frac{1}{F_{ri}^2}}}{\sqrt{1 + 2F_{ri}^2 \left(1 + \frac{1}{F_{ri}^2}\right)^3 \left(1 - \frac{\cos \alpha_i}{\sqrt{1 + \frac{1}{F_{ri}^2}}}\right)}}$	Considerando en el estudio de trayectorias de chorros mencionado en Amador, 2005 pag.13
Ohtsu & Yasuda (1997)	$\frac{y_c}{h} = 0.862 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.165}$	Define el límite inferior de flujo rasante: $0.10 \leq \frac{h}{l} \leq 1.42$

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Ohtsu & Yasuda (1997)	$\frac{h}{y_c} = 1.16(\tan \theta)^{0.165}$ Para: $0.10 \leq \tan \theta \leq 1.42$	Define el límite superior de la altura de escalón para la formación de flujo rasante
Matos (1999)	$\frac{y_c}{h} = 0.634 + 0.446 \exp^{-2.623 \frac{h}{T}}$	Define el inicio del flujo rasante
Ohtsu & Yasuda (1997), Chanson (2002) y Amador (2005), se realiza el ajuste de mínimos cuadrados	$\frac{y_c}{h} = 0.854 \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.169}$	Inicio de flujo rasante
Boes y Hager (2003b)	$\frac{y_c}{h} = 0.91 - 0.14 \frac{h}{l}$	Define el inicio del flujo rasante para pendientes de: $25^\circ < \theta < 55^\circ$
Chanson (2015)	$\frac{y_c}{h} = \frac{0.881}{\left(\frac{h}{T} + 0.149\right)^{0.317}}$	Define el límite inferior del flujo rasante paso de transición a rasante, no debe ser aplicado para flujos rápidamente variados.

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

θ : Ángulo de inclinación de la rápida escalonada en grados

y_c : Calado crítico

h : Altura de la contrahuella del escalón

l : Longitud de la huella del escalón

F_{ri} : Número de Froude en el vértice del escalón $F_{ri} = \frac{U_i}{\sqrt{g d_i}}$

α_i : Ángulo de las líneas de corriente del chorro inmediatamente aguas abajo del vértice del escalón.

2.4 DESCRIPCIÓN DEL FLUJO RASANTE

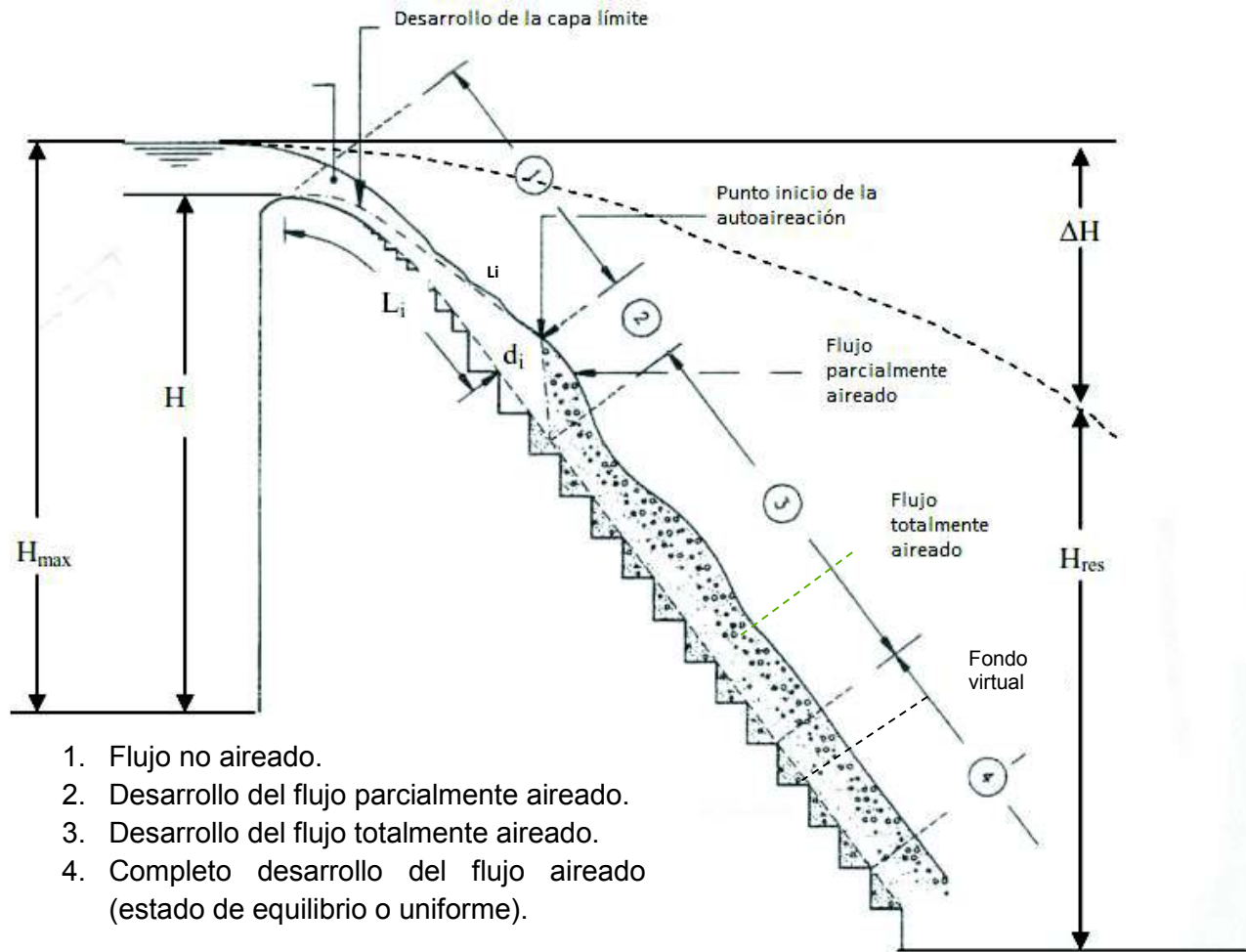
Los aliviaderos escalonados se caracterizan por la entrada natural de aire, la cual consiste en la captura de cierto volumen de aire en la superficie del fluido, quedando disgregado como burbujas que se transportan a través del flujo, originada principalmente por la macro rugosidad del escalón que ocasiona un aumento en el grosor de la capa límite turbulenta.

Cuando la capa límite alcanza la superficie libre se produce una inestabilidad en el flujo facilitando el ingreso de aire; momento en el cual se da inicio a un flujo bifásico (agua-aire) turbulento. En otras palabras, este fenómeno se da cuando la energía cinética turbulenta supera la tensión superficial y los efectos de la gravedad (Amador, 2005; Estrella, 2013).

2.4.1 ZONAS DE FLUJO RASANTE EN RÁPIDAS ESCALONADAS

Según los reportes de la literatura técnica, se identifican cuatro zonas predominantes presentes en un tipo de flujo rasante: (1) Flujo no aireado. Se presenta el crecimiento de la capa límite hasta la superficie libre del flujo. (2) Desarrollo del flujo parcialmente aireado. (3) Desarrollo del flujo completamente aireado. (4) Flujo en estado de equilibrio, uniforme y completamente aireado. En la **Figura No. 2.12**, se muestra el esquema de la rápida escalonada con flujo rasante.

Figura No. 2.12: Flujo bifásico (aire – agua) en flujo rasante



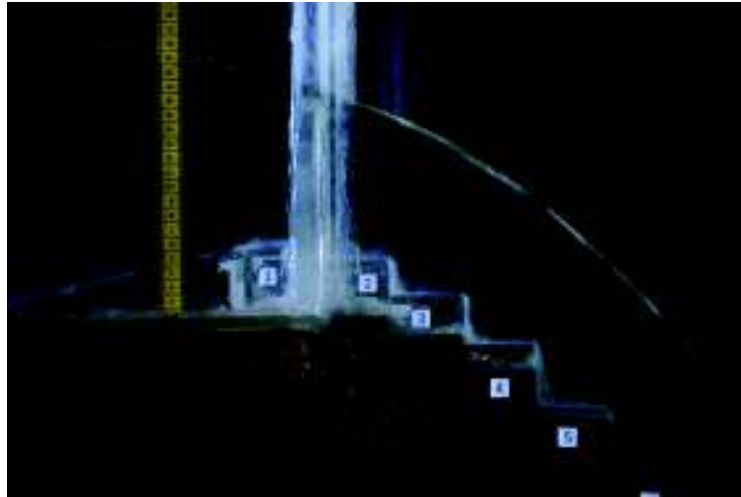
Fuente: Frizell, K. (2006).

2.4.1.1 FLUJO NO AIREADO

El comportamiento hidráulico del flujo rasante sobre una rápida escalonada inicia con presencia de flujo transparente, cristalino y no se aprecia entrada de aire, la superficie libre del flujo es lisa y da paso a la formación de la capa límite cerca de los escalones. Una vez que el borde exterior de la capa límite en desarrollo interactúa con la superficie libre, la turbulencia en esta región provoca el inicio de la aireación natural del flujo. El punto de inyección en los vertederos escalonados es una función del caudal, del diseño de la cresta, rugosidad, geometría de los escalones y del canal.

Chanson (1994), determinó que al aplicar las ecuaciones de vertederos lisos se sobreestima la localización de aparición de las “aguas blancas” en vertederos escalonados, debido a que el porcentaje de crecimiento de la capa límite en vertederos escalonados es aproximadamente 2.8 veces mayor que en vertederos lisos, esto quiere decir que la aireación ocurre mucho antes en vertederos escalonados.

Fotografía No. 2.1: Zona no aireada



Fuente: Proyecto PIMI 16-06 – CIERHI EPN

2.4.1.2 FLUJO PARCIALMENTE AIREADO

Aguas abajo del punto de inicio de la autoaireación, se tiene una región en la cual la aireación en el flujo aún no ocupa la totalidad de la sección transversal. Se presenta una importante y característica deflexión de la lámina libre, propagándose e influenciando en las características hidráulicas del flujo, para el caso de rápidas lisas aguas abajo del punto de inicio de aireación el flujo es gradualmente variado.

Matos (1999) observó una fuerte curvatura en las líneas de corriente, lo cual inicialmente favorece a la aireación en la zona convexa y en la zona cóncava se observa una caída de la concentración de aire.

Según Matos (1999) se puede diferenciar la zona de flujo rápidamente variado en el rango de $0 < s' < 30$ y la región de flujo gradualmente variado entre $30 < s' < 100$.

$$s' = \frac{L - L_i}{y_i} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Dónde:

s' : Variable adimensional

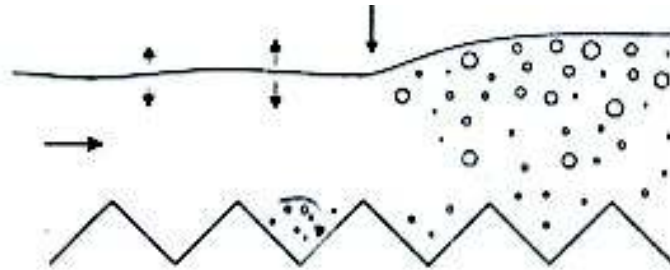
L : Longitud desde el umbral del aliviadero

L_i : Posición del punto de inicio de entrada de aire desde el umbral

y_i : Calado en el punto de inicio de la aireación

Investigadores como Boes & Hager (2003) no identifican la región de flujo rápidamente variado. Su expresión para la evolución de la concentración media del aire a lo largo de la rápida muestra un crecimiento gradual hasta alcanzar las condiciones del flujo uniforme. Sin embargo, Amador (2005), confirma la presencia de la ondulación de la lámina libre cerca del punto de inicio de aireación.

Figura No. 2.13: Ondulación de la lámina libre cerca del punto de inicio de aireación



Fuente: Amador, A. (2005).

Fotografía No. 2.2: Flujo parcialmente aireado



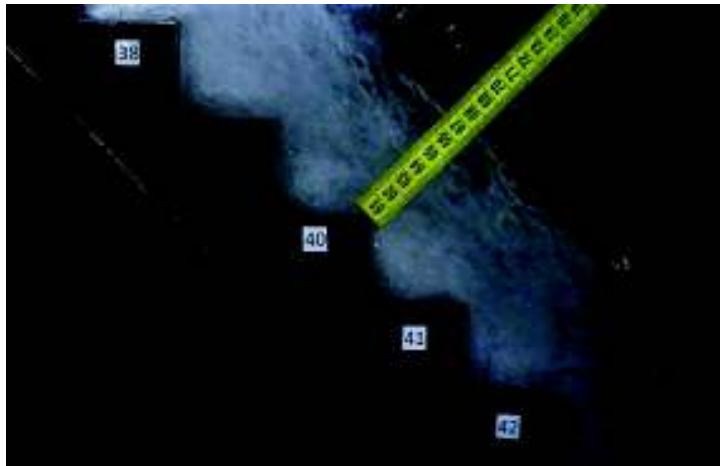
Fuente: Proyecto PIMI 16-06 – CIERHI EPN

2.4.1.3 FLUJO COMPLETAMENTE AIREADO

Seguido de la zona de flujo parcialmente aireado se tiene una región de flujo gradualmente variado donde la aireación del flujo ocupa toda la sección transversal.

Debido a que el flujo gradualmente variado involucra cambios pequeños de profundidad, este flujo está relacionado con longitudes grandes del canal.

Fotografía No. 2.3: Flujo completamente aireado

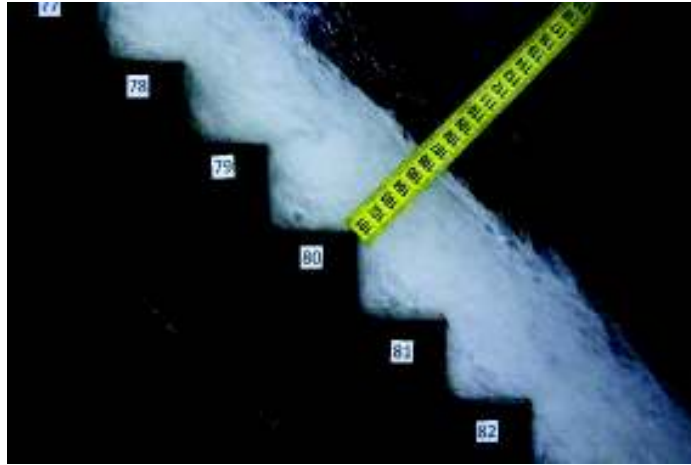


Fuente: Proyecto PIMI 16-06 – CIERHI EPN

2.4.1.4 FLUJO AIREADO EN ESTADO DE EQUILIBRIO O UNIFORME

Se establece flujo uniforme cuando, a una distancia alejada del umbral del aliviadero, se alcanza el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y fricción. El flujo será completamente desarrollado y para un caudal dado no existirá variación en la concentración media de aire, calado o altura de agua, velocidad media y la energía específica residual, es decir permanecerán constantes.

Es importante resaltar la importancia de la concentración de aire en el diseño, dado que es un parámetro que puede afectar a la altura de la pared del canal del aliviadero.

Fotografía No. 2.4: Flujo aireado (zona uniforme)

Fuente: Proyecto PIMI 16-06 – CIERHI EPN

Dada la complejidad para determinar el régimen uniforme en consideración con las curvas de evolución de las características del flujo a lo largo de la rápida. Matos (2000a) recomienda una altura relativa mínima del aliviadero para alcanzar el régimen uniforme (H_u) igual a:

$$\frac{H_u}{y_c} \approx 30 \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Por otra parte, Boes & Hager (2003a) sugieren la siguiente expresión:

$$\frac{H_u}{y_c} \approx 24 (\sin \alpha)^{2/3} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

$$\frac{H_u}{y_c} > 15 \text{ a } 20 \quad \text{Ec. (2.6)}$$

2.4.2 DIFERENCIAS ENTRE FLUJO AIREDO Y NO AIREADO

El ingreso de aire tiene diversos efectos en el comportamiento de las estructuras hidráulicas. A continuación, se mencionan algunas diferencias que se obtienen entre un flujo aireado con respecto al no aireado.

- En el flujo aireado existe un aumento del calado, debido a la emulsión agua-aire.
- En el flujo aireado existe una reducción de las presiones negativas elevadas, debido a la modificación de la turbulencia del flujo y la entrada de aire a presión atmosférica, lo cual a su vez reduce el riesgo de cavitación.
- En el flujo aireado existen cambios en el campo de velocidades, debido a que las burbujas de aire agregan una componente vertical en la cantidad de movimiento debido a la flotación de estas.
- En el flujo aireado existe un aumento de los niveles de oxígeno y nitrógeno.

2.5 CARACTERÍSTICAS HIDRAULICAS DEL FLUJO RASANTE

Es importante identificar ciertas características hidráulicas dentro del estudio de flujo rasante:

2.5.1 CAPA LÍMITE TURBULENTA

En vertederos escalonados la región no aireada se compone de la capa límite turbulenta cerca de los escalones que va aumentando progresivamente su espesor y una zona superior a ella donde se tiene un flujo irrotacional.

La distribución de velocidades en la capa límite sigue una ley potencial.

$$\frac{U(y)}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/N} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Dónde:

U: Velocidad media a la distancia

Y: Altura de la solera

U_0 : Velocidad del flujo irrotacional

δ : Espesor de la capa límite (definido como la distancia del pseudo-fondo al punto donde la velocidad es el 99% de la correspondiente al flujo irrotacional).

N: Parámetro que depende de la distribución de velocidades, igual a 5 (Ohtsu & Yasuda, 1997) o 3.3 según (Matos, 1999).

Amador et al. (2006b), propone una expresión que permite estimar para el vertedero escalonado objeto de estudio la evolución del espesor de la capa límite aguas arriba del punto de inicio de aireación.

$$\frac{\delta}{L} = 0.112 \left(\frac{L}{k_s} \right)^{-0.309} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

$$\text{Para: } 10 < \frac{L}{k_s} < 25$$

La ecuación antes mencionada concuerda con la obtenida por Meireles (2004), con la diferencia de que esta, está dada para un rango más extenso.

$$\frac{\delta}{L} = 0.114 \left(\frac{L}{k_s} \right)^{-0.311} \quad \text{Ec. (2.9)}$$

$$\text{Para: } 10 < \frac{L}{k_s} < 140$$

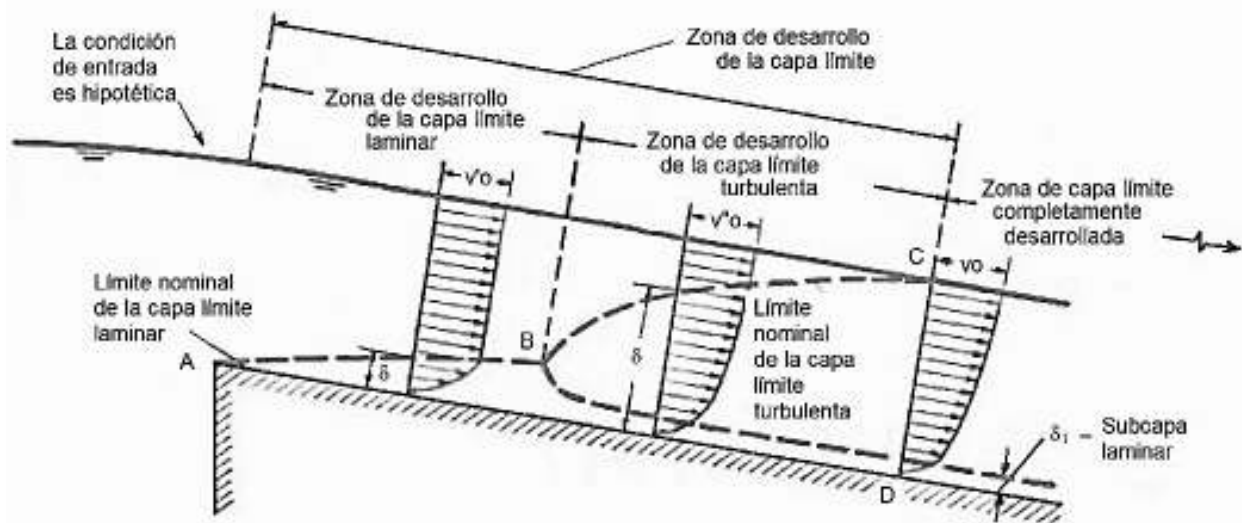
Dónde: L es la distancia al umbral del aliviadero y k_s la rugosidad de forma.

El calado aguas arriba del inicio de la aireación, se puede determinar partiendo de la altura de agua del flujo irrotacional (f_i) y del espesor de desplazamiento (δ^*).

$$y = y_{f_i} + \delta^* \quad \text{Ec. (2.10)}$$

$$\delta^* = 0.23 \delta \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Figura No. 2.14: Desarrollo de la capa límite en un canal abierto con condición de entrada ideal



Fuente: Ven Te Chow. (2004).

Cuando el espesor de la capa límite iguala a la altura de agua, las fluctuaciones turbulentas son suficientes para superar las fuerzas debidas a la viscosidad y tensión superficial del fluido, generando las perturbaciones necesarias para la entrada de aire en el flujo.

2.5.2 UBICACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE LA AUTOAIREACIÓN

La ubicación del punto de inicio del flujo autoaireado puede obtenerse analizando el desarrollo de la capa límite, cuyo conocimiento es importante, pues permite limitar el potencial riesgo de cavitación.

El inicio de entrada de aire en un vertedero se define como el punto donde el espesor de la capa límite iguala a la altura de agua (Wood, 1991). Varios autores describen expresiones para el cálculo teórico del inicio de introducción y arrastre de aire en un flujo rasante, las cuales son mostradas en el siguiente cuadro:

Cuadro No. 2.4: Relaciones para identificar el punto de inicio del arrastre de aire

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Matos (2000b)	$\frac{L_i}{k_s} = 6.289 F_r^*{}^{0.734}$ $\frac{y_i}{k_s} = 0.361 F_r^*{}^{0.606}$ $k_s = h \cos \alpha$ $F_r^* = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \alpha} (h \cos \alpha)^3}$	Define la ubicación y profundidad en el punto de inicio para una pendiente de: $\alpha = 53^\circ$
Chamani (2000)	$\frac{L_i}{k_s} = 8.29 F_r^*{}^{0.85}$ $F_r = \frac{q}{\sqrt{g \left(\frac{h}{T}\right) k_s^3}}$	Con ayuda de una secuencia de video de alta velocidad se determinó la longitud hasta el punto de inicio para pendientes en el rango: $51.3^\circ \leq \alpha \leq 59^\circ$
Matos et al.(2001), Chanson (1994,202c) y Renna et al. (2005)	$F_r^* = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \alpha} (h \cos \alpha)^3}$ $\frac{L_i}{h \cos \alpha} = 9.719 (\sin \alpha)^{0.0796} F_r^*{}^{0.713}$ $\frac{y_i}{h \cos \alpha} = 0.4034 \frac{F_r^*{}^{0.592}}{(\sin \alpha)^{0.04}}$	Define la ubicación y profundidad de flujo en el punto de inicio para una pendiente entre: $6.8^\circ \leq \alpha \leq 59^\circ$
Boes & Hager (2003)	$L_i = \frac{5.9 y_c^{1.2}}{(\sin \alpha)^{1.4} h^{0.2}}$	Define el punto de inicio de aireación (punto donde la concentración de aire en la pseudo solera es de 0.01) para pendientes en el rango: $26^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$
Boes & Hager (2003a)	$\frac{L_i}{k_s} = 5.90 (\cos \alpha)^{0.2} (\sin \alpha)^{-1} F_r^*{}^{0.80}$	Define la ubicación a lo largo de la pendiente en el punto de inicio para pendientes de: $26^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$
Boes & Hager (2003a)	$\frac{y_i}{k_s} = 0.40 (\cos \alpha)^{-0.1} F_r^*{}^{0.6}$	Define la profundidad de flujo en el punto de inicio

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
		para pendientes en el rango: $26^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$
Amador et al. (2006b)	$\frac{L_i}{k_s} = 5.982 F_r^{*0.840}$ $\frac{y_i}{k_s} = 0.383 F_r^{*0.580}$ $F_r^* = \frac{q}{\sqrt{g(\sin \alpha)k_s^3}}$ $k_s = h (\cos \alpha)$	Define el punto de inicio de aireación.
Hunt & Kadavy (2011)	$\frac{L_i}{k_s} = 6.1(\sin \alpha)^{0.08} F_r^{*0.86}$ $F_r^* = \frac{q}{\sqrt{g(\sin \alpha)k_s^3}}$	Define el punto de inicio de aireación.
Meireles et al. (2012)	$\frac{L_i}{k_s} = 6.75 F_r^{*0.76}$ $\frac{y_i}{k_s} = 0.35 F_r^{*0.59}$	Define el punto de inicio de aireación.

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

α : Ángulo de inclinación de la rápida escalonada en grados

y_c : Calado crítico

h : Altura de la contrahuella del escalón

l : Longitud de la huella del escalón

y_i : Profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación

F_r^* : Número de Froude rugoso

k_s : Rugosidad de forma

L_i : Distancia medida desde el ingreso a la rápida hasta el inicio de introducción y arrastre de aire

De las expresiones mostradas en el **Cuadro No. 2.4** se concluye que el punto de inicio de aireación depende principalmente del Número de Froude rugoso, es decir, del caudal y de la macrorugosidad. Por tanto, para caudales altos la longitud del punto de inicio de la autoaireación se desplaza hacia aguas abajo de la rápida y para rápidas con pendiente alta y macrorugosidad alta (altura del escalón) la autoaireación se inicia más hacia aguas arriba.

2.5.3 ALTURA EQUIVALENTE y_w , ALTURA CARACTERÍSTICA y_{90}

En la definición de la profundidad de la mezcla agua – aire, se introducen dos magnitudes importantes: la altura característica y_{90} que es medida perpendicular al fondo del canal, en donde la concentración de aire C es igual a 90%; y la llamada profundidad de agua clara y_w , que es la distancia perpendicular al fondo del canal, la cual multiplicada por la velocidad media del agua clara v_w , resulta en el caudal unitario q , definido como el caudal por unidad de ancho (Naudascher,2002).

$$y_w = \int_0^{y_{90}} (1 - C) dy \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Si se integra la ecuación anterior solo hasta y_{90} , y se define C como la concentración media de aire en la profundidad, se obtiene la siguiente relación:

$$y_w = (1 - \bar{C}) \cdot y_{90} \quad \text{Ec. (2.13)}$$

La literatura técnica menciona un flujo mixto completamente desarrollado cuando el flujo alcanza el equilibrio, donde la concentración puntual de aire es del 90%, generalmente ubicado en el tramo final de la rápida correspondiente a un flujo uniforme. Entre las expresiones para el cálculo teórico se tienen las mostradas en el **Cuadro No. 2.5**:

Cuadro No. 2.5: Profundidad del flujo autoaireado al 90% de concentración de aire

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Chanson (1994a)	$\frac{y_{90,u}}{y_c} = \sqrt[3]{\frac{f_e}{8(1-C_m)^3 \sin \alpha}}$	
Matos (2000b)	$y_{90} = \frac{y}{1-C_m}$	Define la altura equivalente antes de alcanzar el flujo uniforme (Zona de flujo gradualmente variado).
Boes (2000)	$d(L) = \frac{0.23 \left(\frac{q^2}{g \sin \alpha} \right)^{1/3}}{1 + \left(1 - \frac{0.23}{\sin \alpha^{1/3}} \right) \exp \left(-0.176 \left(\frac{g \sin \alpha}{q^2} \right)^{1/3} L \right)}$	Define el calado de agua en el aliviadero a una distancia L de la cresta
Boes (2000)	$\frac{y_{90,(x)}}{y_{90,(u)}} = \tanh \left[1.1 \frac{y_{90,(u)}^2 \sin \alpha}{y_c^3} (x-L_i) \right]$	
Tatewar et al. (2000)	$\text{Log} \left(\frac{y_{90,u}}{h} \right) = 0.3011 \log \left(\frac{q^2}{gh^3} \right) + 0.01696 \left(\frac{h}{l} \right) - 0.2053$	Para los siguientes rangos: $\alpha = 51^\circ - 59^\circ$ $\frac{y_c}{h} = 0.8 \text{ a } 4.4$
Boes & Minor (2002)	$\frac{y_{90,u}}{h} = 0.50(F_r^*)^{0.1 \tan \alpha + 0.50}$ $F_r^* = \frac{q}{\sqrt{(g \sin \alpha h^3)}}$	
Boes & Hager (2003a)	$\frac{y_{90}}{y_c} = 0.215 (\sin \alpha)^{-1/3}$	Define la altura equivalente una vez alcanzado el régimen uniforme.
Boes & Hager (2002, 2003b)	$\frac{y_{90}}{k_s} = \frac{0.5 \cos \alpha^{1.5(0.1 \tan \alpha + 0.5)} F_r^{*(0.1 \tan \alpha + 0.5)}}{\cos \alpha}$	Define la altura equivalente para flujo abultado o mixto.

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Amador (2005)	$d_c = \frac{\alpha_c \bar{U}^2 f_{eq}}{8g \sin \alpha}$	Define la altura equivalente en el régimen uniforme.

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

f_{eq} : Coeficiente de fricción equivalente del flujo agua-aire

α_c : Coeficiente de Coriolis

\bar{U} : Velocidad media del flujo

α : Ángulo de la solera del aliviadero con un plano horizontal

L: Distancia al umbral del aliviadero

$y_{90,u}$: Profundidad del flujo mixto uniforme correspondiente al 90% de concentración de aire

h: Altura de la contrahuella del escalón

F_r^* : Número de Froude rugoso

f_e : Coeficiente de fricción de Darcy para flujo agua-aire

L_i : Longitud al punto de inicio de la aireación

ALTURA DE LAS PAREDES:

La altura de las paredes laterales se diseña una vez conocido el calado característico del flujo uniforme (y_{90}) multiplicado por un coeficiente de seguridad η . Por lo general $\eta = 1.2$ para presas de hormigón y $\eta = 1.5$ para presas de materiales sueltos.

$$y_{pared} = \eta \cdot y_{90} \quad \text{Ec. (2.14)}$$

2.5.4 MECANISMO DE TRANSPORTE DE AIRE

En la región de aguas claras (zona no aireada), la capa límite crece a partir de la caída del canal (Chanson, 2002). La concentración de aire es igual a cero en la parte inferior del perfil y cerca del fondo virtual, sin embargo, se observa un aumento significativo en la concentración de aire a lo largo de la parte superior del perfil cerca de la superficie libre, debido al aire atrapado (Meireles et al., 2012; Matos & Meireles, 2014).

Aguas abajo de la región de aguas claras (cerca del punto de inicio de la autoaireación), se encuentran valores mayores de la concentración de aire dentro de la zona ondulada. Este último se considera debido al arrastre de burbujas de aire causado por la inestabilidad de la ubicación del punto de inicio. Además, la concentración de aire inmediatamente debajo de la zona ondulada parte desde cero (Meireles et al., 2012; Pfister & Hager, 2011; Matos & Meireles 2014).

Cerca del punto de inicio de autoaireación, la turbulencia ocasiona un flujo de agua-aire rápidamente variado (Matos & Meireles, 2014). De acuerdo con las observaciones visuales con una cámara de alta velocidad y las mediciones de concentración de aire realizadas por (Pfister & Hager, 2011), en las proximidades del punto de inicio de aire pseudo-inferior, el flujo altamente turbulento incluye en la superficie libre ondas superficiales significativas con crestas de aguas y canales de aire combinados con flujo burbujeante.

Aunque la concentración de aire aumenta aguas abajo de la región de flujo rápidamente variado, sigue un patrón ondulado y también puede ocurrir una disminución en la concentración de aire con la distancia. Sin embargo, el flujo casi uniforme puede alcanzarse aguas muy abajo desde el punto de inicio, y las principales propiedades de flujo como concentración media de aire, la velocidad del flujo, la profundidad de agua clara equivalente y la energía específica permanecerán constantes (Matos & Meireles, 2014).

2.5.5 CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE EN EL FLUJO

La introducción de aire se produce principalmente cuando la energía cinética turbulenta es lo suficientemente grande como para superar la tensión superficial y los efectos de gravedad, por cuanto el aire queda atrapado y se libera de forma continua. La velocidad turbulenta normal a la superficie libre v' debe superar la presión de la tensión superficial y ser mayor que la componente de velocidad de ascenso de la burbuja, para que la burbuja sea transportada (Chanson, 1993). Estas condiciones quedan representadas por las expresiones:

$$v' > \sqrt{\frac{8^* \sigma}{\rho_w^* d_{ab}}}$$

Ec. (2.15)

$$v' > u_r * \cos\alpha \quad \text{Ec. (2.16)}$$

Dónde:

σ : Tensión superficial

d_{ab} : Diámetro de la burbuja de aire

u_r : Velocidad de ascenso de la burbuja

ρ_w : Densidad del agua

Cuando el borde exterior de la capa límite alcanza la superficie libre, la turbulencia puede iniciar la aireación natural de la superficie libre.

En el estudio de flujos bifásicos agua-aire, es importante notar la concentración de aire C , considerado como el volumen de aire no disuelto contenido en un volumen de flujo agua-aire, y la concentración media de aire \bar{C} es calculada como:

$$\bar{C} = \int_0^{y_{90}} C \cdot dy \quad \text{Ec. (2.17)}$$

Dónde: y , es la distancia normal al fondo virtual formado por los vértices de los escalones.

La distribución de la concentración de aire en el flujo rasante puede ser estimada mediante las expresiones que se presentan en el **Cuadro No. 2.6**:

Cuadro No. 2.6: Concentración media de aire

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Knauss (1979)	$C_m = 1.44 \sin \alpha - 0.08$	Define la concentración media de aire en régimen uniforme.
Hager (1991)	$C_m = 0.75 (\sin \alpha)^{0.75}$	Define la concentración media de aire en régimen uniforme.
Matos (1999)	$C_m = 0.76 (\sin \alpha)^{0.82}$	En régimen uniforme, la concentración media de aire depende únicamente

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
		de la pendiente de la rápida escalonada. Conocida como concentración de equilibrio.
Frizell et al. (2000)	$C_m = 0.23 + 0.017 \left(\frac{L-L_i}{y_i} \right)$	Define la concentración media de aire, aguas abajo del punto de inicio de la autoaireación.
Matos et al. (2000a)	$C_m = 0.163 F_r^{*0.154}$	Define la concentración media de aire en el punto de inicio de la autoaireación.
Matos et al. (2000b)	<p>Para: $0 < s' < 30$</p> $C_m = 0.210 + 0.297 \exp[-0.497(\ln(s') - 2.972)^2]$ <p>Para: $s' \geq 100$</p> $C_m = \left(0.888 - \frac{1.065}{\sqrt{s'}} \right)^2$	Define la concentración media de aire, aguas abajo del punto de inicio de la auto aireación (Régimen rápida y gradualmente variado).
Matos et al. (2001)	<p>Para: $s' > 0$</p> $C_m = 0.262 + \frac{0.158}{1 + (0.031 s')^{-2.389}}$	Define la concentración media de aire para pendientes de: $26^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$
Boes & Hager (2003a)	$C_m = 1.2 \times 10^{-3} (240^\circ - \alpha)$	Define la concentración media de aire en el punto de inicio, con la definición del 0.01% de aire al inicio para pendientes de: $26^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$
Chanson (1994)	$C_m = 0.9 \sin \alpha$	Define la concentración media de aire para pendientes menores a 50° . En régimen uniforme
Meireles et al.(2012)	$C_m \approx 0.20$	Define la concentración de aire en el punto de inicio de la autoaireación. Para pendientes pronunciadas.

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

L: Distancia medida a lo largo de la rápida

F_r^* : Parámetro adimensional en función de altura del escalón y del caudal unitario

y_i : Profundidad de agua en el punto de inicio de la aireación

L_i : Distancia medida desde el ingreso a la rápida hasta el inicio de introducción y arrastre de aire

C_m : Concentración media de aire

2.5.6 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES

En flujos bifásicos la distribución de velocidades determinada experimentalmente por varios autores sigue una ecuación potencial expresada como:

$$\frac{V}{V_{90}} = \left(\frac{y}{y_{90}} \right)^{1/N} \quad \text{Ec. (2.18)}$$

Dónde:

N: Valor constante, $N < 9$ para flujo rasante.

V_{90} : Velocidad característica en $y = y_{90}$

En cuanto al coeficiente de ajuste potencial N, los investigadores presentan diversas aproximaciones, encontrándose entre 3.9 y 30, dependiendo de las características hidráulicas como: caudal específico circulante, el tamaño del escalón y la pendiente del aliviadero (Relvas & Pinheiro, 2011). Además, destacan N bajos ($N < 9$) para flujos rasantes y N altos ($N > 9$) para flujos transitorios.

En el caso de calados pequeños $\left(\frac{y}{y_{90}} < 0.05 \right)$ no se recomienda utilizar la ecuación potencial, ante lo cual André (2004) propone:

$$\frac{v}{\sqrt{g \cdot \sin \alpha \cdot y_{90}}} = A_v \cdot \ln \left(\frac{y}{k_s} + 1 \right) + B_v \quad \text{Ec. (2.19)}$$

Dónde: A_v y B_v son coeficientes para el ajuste del perfil de velocidad para calados pequeños, que se pueden determinar experimentalmente en función de las características del flujo.

Debido a que la relación entre la densidad del aire ρ_L y la densidad del agua ρ_w es alrededor de 1/700, además que la velocidad de ascenso de las burbujas de aire con respecto a la velocidad v_w es insignificante, se puede suponer que la distribución de velocidades local v_w del agua es prácticamente independiente de la concentración media del aire \bar{C} (Wood, 1985).

Para determinar las velocidades para el flujo uniforme se establecen las expresiones, mostradas en el **Cuadro No. 2.7**:

Cuadro No. 2.7: Distribución de velocidades

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Sánchez (2004) Matos (1999)	$\frac{V_w}{V_{90}} = \left(\frac{y}{y_{90}}\right)^{0.263}$	Define la distribución de velocidades para flujo uniforme
Sánchez (2004) Matos (1999)	$\frac{V_{90}}{V_w} = 1.4$ $V_w = \frac{q}{y_w}$	Define para vertederos escalonados, independientemente de la concentración media de aire.

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

q: Caudal unitario

y_w : Profundidad de agua clara

2.5.7 RESISTENCIA AL MOVIMIENTO

La resistencia al movimiento en un flujo rasante está dominada por el flujo secundario existente en la cavidad delimitada por las aristas de los escalones y por el intercambio de cantidad de movimiento entre el flujo superior y el flujo en la cavidad (Rajaratnam, 1990) (Mateos & Elviro, 1994), (Chanson, 2000). Por lo tanto, predomina la resistencia de forma (form drag), ante lo cual Ksemipour & Apelt (1983), consideran inadecuado utilizar la ecuación de Gauckler – Manning o Darcy Weisbach para calcular este tipo de pérdidas de energía.

Sin embargo, la gran mayoría de los estudios existentes están basados en el uso de la ecuación de Darcy – Weisbach para el cálculo del coeficiente de fricción equivalente y la disipación de energía en flujo rasante. Este planteamiento es justificado por la sencillez de su utilización en el dimensionamiento de rápidas escalonadas y por permitir una breve comparación entre la disipación de energía en rápidas escalonadas y lisas (Amador, 2005).

Muchas ecuaciones para el factor de fricción se han propuesto para canales escalonados desde 1990; debido a dificultades prácticas para medir con precisión la posición de la superficie libre y el incremento de la región bifásica, los valores del factor de resistencia presentados en referencias bibliográficas varían en el rango aproximado de 0.05 - 5, el mismo que se origina debido a diferentes causas, y cuyos detalles son útiles para comprenderlo.

Las razones principales por las cuales los valores de f se presentan más altos, es quizá debido a los valores de profundidad de la mezcla que han sido tomados experimentalmente para luego ser incorporados en el cálculo de f , proporcionando resultados mayores a los calculados sin el volumen de aire.

Por otro lado, considerando los valores más bajos (el rango de 0.08 a 0.2), también pueden verse afectados por la dificultad encontrada al medir las profundidades en flujos multifásicos. Incluso las profundidades de la región monofásica no son fáciles de medir, porque las oscilaciones de alta frecuencia impiden la definición precisa de la posición de la superficie libre, o su valor promedio.

El coeficiente Darcy – Weisbach o coeficiente de fricción equivalente (f_e) está definido por la siguiente expresión:

$$f_e = \frac{8g \left(\int_{y=0}^{y=y_{90}} (1 - C) dy \right) S_f}{\bar{U}^2} \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Dónde:

C: Concentración de aire

y_{90} : Altura característica el flujo definida como la distancia a la solera del aliviadero del punto donde la concentración de aire es 90%

$\int_{y=0}^{y=y_{90}} (1 - C) dy$: Altura equivalente del agua (m)

S_f : Pendiente motriz

\bar{U}^2 : Velocidad media del flujo

Por lo tanto, el factor de fricción de Darcy – Weisbach considerado para representar canales anchos y aceptado para determinar la disipación de energía, en flujo uniforme, está dado por:

$$f = \frac{8 * g * y_w^2 * y_w * S_f}{q^2} \quad \text{Ec. (2.21)}$$

Dónde:

g: Aceleración de la gravedad

y_w : Profundidad de agua clara

S_f : Pendiente de la línea de energía

q: Caudal unitario

Para condiciones de flujo uniforme, la pendiente S_f es igual a la pendiente de fondo ($\sin \alpha$). Obteniéndose finalmente la expresión:

$$f_e = \frac{8 * g * \sin \alpha * y_w^3}{q^2} \quad \text{Ec. (2.22)}$$

El estado del arte refleja que no existe un total acuerdo en las expresiones y valores del coeficiente de fricción y del factor de fricción. Se presentan en el **Cuadro No. 2.8** las más significativas.

Cuadro No. 2.8: Relaciones experimentales del coeficiente de fricción y factor de fricción para flujo agua–aire.

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Rajaratnam & Katopodis (1984)	$C_f = \frac{2g y_{90} \sin \theta}{u_m^2}$ $C_f = (0.05 \text{ a } 0.18)$	Define para: $R_e = 5 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Tozzi (1992)	$\frac{1}{\sqrt{f_e}} = 2.16 + 1.24 \log \frac{y}{k_s}$ $\frac{y}{k_s} > 1.8$ $f_e = 0.136 \text{ para } d/k_s \leq 1.80$	Para flujo rasante en aliviadero escalonado con $\alpha = 53.1^\circ$
Chanson (1994)	$f_e = 0.5 f \left(1 + \tanh \left(0.628 \times \frac{0.514 - C_m}{C_m(1 - C_m)} \right) \right)$ $C_m = 0.8 \sin \alpha$	
Yasuda & Ohtsu (1999)	$f_b = 8 \left(\frac{y_w}{y_c} \right)^3 \sin \alpha$	Para flujo rasante casi uniforme.
Yasuda (2001)	$f_e = 4C_{rw} = 8 \left(\frac{y_w}{y_c} \right)^3 \sin \alpha$	
Chinnarasri (2002)	$\frac{1}{\sqrt{f_e}} = 2.0 + 1.19 \log \frac{y_w}{k_s}$	$0.1 \leq \left(\frac{k_s}{y_w} \right) \leq 2.1$ $\alpha = 15^\circ - 59^\circ$
Función de ajuste logarítmico.	$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = \frac{1}{\sqrt{(0.5 - 0.42 \sin 2\alpha)}} \left(1 - 0.25 \log \left(\frac{k_s}{D_h} \right) \right)$	Para aliviaderos con ángulos de inclinación entre 19° y 55°

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Boes & Hager (2003a)	$f_b = (0.5 - 0.42 \sin 2\alpha) \left(\frac{k_s}{D_h}\right)^{0.2}$	Para flujo rasante casi uniforme. Considerando la rugosidad de forma relativa.
Boes & Minor (2003)	$\frac{1}{\sqrt{f_e}} = \frac{1}{\sqrt{0.5 - 0.42 \sin(2\alpha)}} \left[1.0 - 0.25 \log \left(\frac{k_s}{D_h}\right) \right]$ $D_h = 4y_w$ $\frac{y_w}{y_c} = 0.215(\sin \theta)^{-1/3}$	Para flujo en región uniforme $19^\circ < \alpha < 55^\circ$ comprendida entre: $0.1 < k_s/D_h < 1$

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

y_w : Profundidad de agua clara

y : Profundidad del flujo

K : Rugosidad generada por el escalón

C_{rw} : Coeficiente de fricción agua clara en la zona uniforme

D_h : Longitud característica en la zona uniforme

2.5.8 DISIPACIÓN DE ENERGÍA

La disipación de energía en flujo rasante es uno de los parámetros más importantes en el estudio de los vertederos escalonados; por esta razón, varios investigadores se han esforzado en proporcionar expresiones y ábacos que permitan estimar la disipación de energía y la energía residual al pie de rápidas escalonadas.

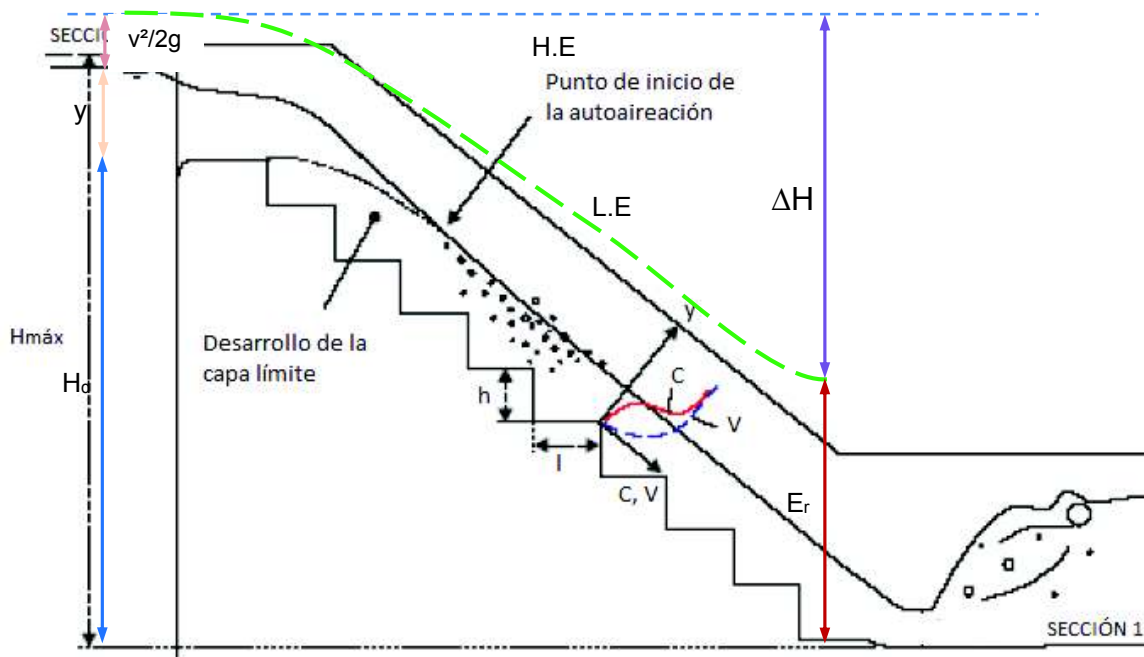
Se han realizado varios estudios en diferentes instituciones alrededor del mundo, que representan el fenómeno desde diferentes puntos de vista, por ejemplo, usando ecuaciones de Darcy – Weisbach o ecuaciones de Manning, proporcionando de esta manera expresiones algebraicas ajustadas a datos experimentales.

El incremento en la disipación de energía está dado por factores como: la rugosidad de forma (k_s) que es un parámetro que depende del ángulo de inclinación del aliviadero (α) y de la altura del escalón (h); el caudal específico circulante (q); y la altura del aliviadero (H_d).

Por otro lado, la disipación de energía está condicionada por el tamaño de los escalones, así como la longitud de la rápida.

La pérdida de energía o energía disipada (ΔH) se puede definir como la diferencia entre la energía disponible aguas arriba de la cresta de la rápida y la energía al pie del vertedero escalonado.

Figura No. 2.15: Esquema de un vertedero escalonado



Fuente: Chanson et al. (2015).

Para un volumen de control que involucre el flujo de agua entre la cresta (sección 0) y una sección aguas abajo (sección 1), la ecuación de energía se puede escribir de la siguiente manera:

$$z_0 + \frac{P_0}{\gamma} + \alpha_0 \frac{V_0^2}{2g} = z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \Delta H \quad \text{Ec. (2.23)}$$

Dónde:

z : Altura de posición respecto al plano de referencia (m)

$\frac{P}{\gamma}$: Altura de presión (m)

$\frac{V^2}{2g}$: Altura cinética (m)

α_1 : Coeficiente de Coriolis

Asumiendo distribuciones de presión hidrostática, tal que $\frac{P_0}{\gamma} = y_0$ y $\frac{P_1}{\gamma} = y_w \cos \alpha$ (Chow, 1959), la ecuación puede expresarse como:

$$\Delta H = z_0 - z_1 + y_0 + \alpha_0 \frac{V_0^2}{2g} - y_w \cos \alpha - \alpha_1 \frac{V_w^2}{2g} \quad \text{Ec. (2.24)}$$

$$\Delta H = H_d + y_0 + \alpha_0 \frac{q^2}{2gy_0^2} - \left(y_w \cos \alpha + \alpha_1 \frac{q^2}{2gy_w^2} \right) \quad \text{Ec. (2.25)}$$

$$\Delta H = H_d + y_0 + \alpha_0 \frac{y_c^3}{2y_0^2} - \left(y_w \cos \alpha + \alpha_1 \frac{y_c^3}{2y_w^2} \right) \quad \text{Ec. (2.26)}$$

Donde:

$$H_{\text{máx}} = H_d + H_o \quad \text{Ec. (2.27)}$$

$$H_{\text{máx}} = H_d + y_0 + \alpha_0 \frac{q^2}{2gy_0^2} \quad \text{Ec. (2.28)}$$

$$H_{\text{res}} = y_w \cos \alpha + \alpha_1 \frac{q^2}{2gy_w^2} \quad \text{Ec. (2.29)}$$

Por lo tanto, la expresión se expresa como:

$$\Delta H = H_{\text{máx}} - H_{\text{res}} \quad \text{Ec. (2.30)}$$

La misma que puede ser expresada en términos porcentuales como:

$$\% \text{ Disipación} = \frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} \times 100 \quad \text{Ec. (2.31)}$$

Si la rápida es lo suficientemente larga para alcanzar el régimen uniforme, se puede estimar la proporción de energía específica residual como la energía específica correspondiente al flujo potencial (H_0) en una determinada sección. Por tanto, Boes & Hager (2003a) concluyen que, para la estimación de la energía residual, es necesario conocer, el régimen uniforme. Entre las expresiones para el cálculo teórico, se tienen las mostradas en el **Cuadro No. 2.9**:

Cuadro No. 2.9: Relaciones experimentales para el cálculo de la energía residual

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Sorensen (1985) y Diez-Cascon (1991)	$\frac{\Delta H}{H_{\text{máx}}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{H_d}{y_c} + \frac{3}{2}}$	Usada para un régimen uniforme $\alpha = 52^\circ$ antes de llegar al pie del vertedero
Chanson (1994b)	$\frac{H_{\text{res}}}{H_{\text{max}}} = \frac{\left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{H_{\text{dam}}}{y_c} + \frac{3}{2}}$ <p style="text-align: center;">$1.1 < \alpha_c < 1.16$</p>	Usada para un régimen casi uniforme
Chanson (1994a)	$H_{\text{res}} = y_c \left(\left(\frac{f_{\text{eq}}}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \left(\frac{f_{\text{eq}}}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3} \right)$	
Boes (2000)	$\frac{E_r}{E_t} = \frac{\left(\left(\frac{\lambda}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha \right) + \left(\left(\frac{\beta}{2} \right) \left(\frac{\lambda}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3} \right)}{\frac{H}{y_c} + \frac{3}{2}}$ $E_r = \frac{z^* + y_w \cos \alpha + \beta q^2}{2 g y_w^2}$	$\frac{H}{y_c} > 20$ $\frac{H}{y_c} < 20$
Boes & Hager (2003)	$\frac{H_{\text{res}}}{H_0} = \exp \left[\left(-0.045 \left(\frac{k_s}{D_h} \right)^{0.1} (\sin \alpha)^{-0.8} \right) \frac{H}{y_c} \right]$	Usada para la región de flujo no uniforme ($19^\circ < \alpha < 55^\circ$) (Régimen rápida y gradualmente variado).

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Amador (2005)	$H_r = H_o - \Delta H = H_o - \frac{\delta^e v_o^3}{2 g q}$ $H_o = h + 1.5 y_c$ $H_o = \frac{q}{v_o} \cos \alpha + \frac{v_o^2}{2g}$ $\delta^e = 0.23 \delta$	Usada para la zona no aireada

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

H: Desnivel geométrico entre el umbral de la rápida y la sección de análisis

h: Altura del vertedero escalonado

y_c : Calado crítico

v_o : Velocidad del flujo potencial

f_e : Coeficiente de fricción equivalente del flujo agua-aire

α_c : Coeficiente de Coriolis

λ : Coeficiente experimental de fricción de Darcy

β : Coeficiente de Boussinesq

$H_{m\acute{a}x}$: Energía máxima

z^* : Elevación con respecto al nivel de referencia

D_h : Diámetro hidráulico, se determina con la altura de régimen uniforme (d_e).

α : Ángulo de la rápida escalonada, con respecto al plano horizontal

δ^e : Espesor de la pérdida de potencia

δ : Espesor de la capa límite

2.5.9 PRESIONES SOBRE LOS ESCALONES

Varios autores han realizado diferentes estudios sobre el efecto de las presiones sobre los escalones, entre ellos están: (Matos et al., 1999), Matos & Elviro (2000), Amador (2005), Sánchez – Juny et al. (2007;2008), Amador (2009) y Estrella (2013). Dos han sido los aspectos en los que principalmente se han enfocado: las presiones bajas determinan un daño probable por cavitación, mientras que las presiones altas pueden afectar a la durabilidad de la huella.

2.5.9.1 PRESION EN CARAS HORIZONTALES (Huella)

Según estudios previos, la presión positiva máxima se produce en las caras horizontales de los escalones Sánchez – Juny et al. (2007), Zhang & Cols. (2012) y Takahashi & Ohsu (2012) observaron la distribución de la presión en forma de S en las huellas de los escalones.

Los valores mínimos de presión se identifican aguas arriba de las caras horizontales ($\frac{x}{l} > 0.5$), mientras que los valores máximos se han observado a lo largo de la fracción más cercana a los bordes ($\frac{x}{l} < 0.5$).

Dónde: x es la distancia desde el borde del escalón, a lo largo de la cara horizontal, y l es la longitud del escalón.

Esto es válido de acuerdo con autores como Sánchez – Juny et al. (2000), André & Schleiss, (2008); Amador et al. (2009), quienes mencionan que en la porción aguas abajo de la huella del escalón, está sometida al impacto del chorro mientras que la parte aguas arriba implica una separación de la capa límite debida a la vorticidad escalonada y remolinos internos de recirculación.

La variación de los valores de presión media con diferentes descargas ha sido investigada por André (2004) y Sánchez – Juny et al. (2007) en caras horizontales (huellas) para canales inclinados de 30° y 50°. Concluyendo que cuanto mayor es la descarga, mayores son los valores de presión.

2.5.9.2 PRESION EN CARAS VERTICALES (Contrahuella)

Estudios recientes indican que las presiones negativas más importantes ocurren en las caras verticales de los escalones, particularmente cerca del borde de los escalones, donde el escalón experimenta una separación del flujo Sánchez – Juny et al. (2000, 2007, 2008); Amador et al. (2005); Zhang y otros (2012). Por tanto, esta área podría ser sensible con respecto al ataque de la cavitación debido a la baja incidencia de presión negativa.

Frizell et al. (2013) en su investigación propone el índice de cavitación crítica para proporcionar mejores criterios de diseño, para rápidas escalonadas. Los índices de cavitación críticos de 0.3 - 0.4, para una pendiente suave y 0.6 para una pendiente fuerte. Sus hallazgos son más altos que el valor crítico de 0.2 propuesto por Flaver, (1990) para el caso de rampas lisas.

Dado a que existe falta de consenso en la literatura sobre la descarga específica máxima para evitar el daño por cavitación Amador et al. (2009) propone limitar la velocidad media hasta ~ 15 m/s correspondiente a una descarga de ~ 15 m²/s para una rápida escalonada de 51.3°.

2.5.10 RIESGO DE CAVITACIÓN

Es conocido que el riesgo de cavitación es producido por elevadas velocidades por lo cual es recomendable favorecer la autoaireación, ya sea de forma natural o artificial.

Para evitar daños por cavitación la concentración media de aire en el flujo deberá ser mayor al 5% para evitar dicho daño (Peterka,1953), sin embargo (Mateo & Elviro, 1999) resalta que la proporción agua – aire recomendable es 8%.

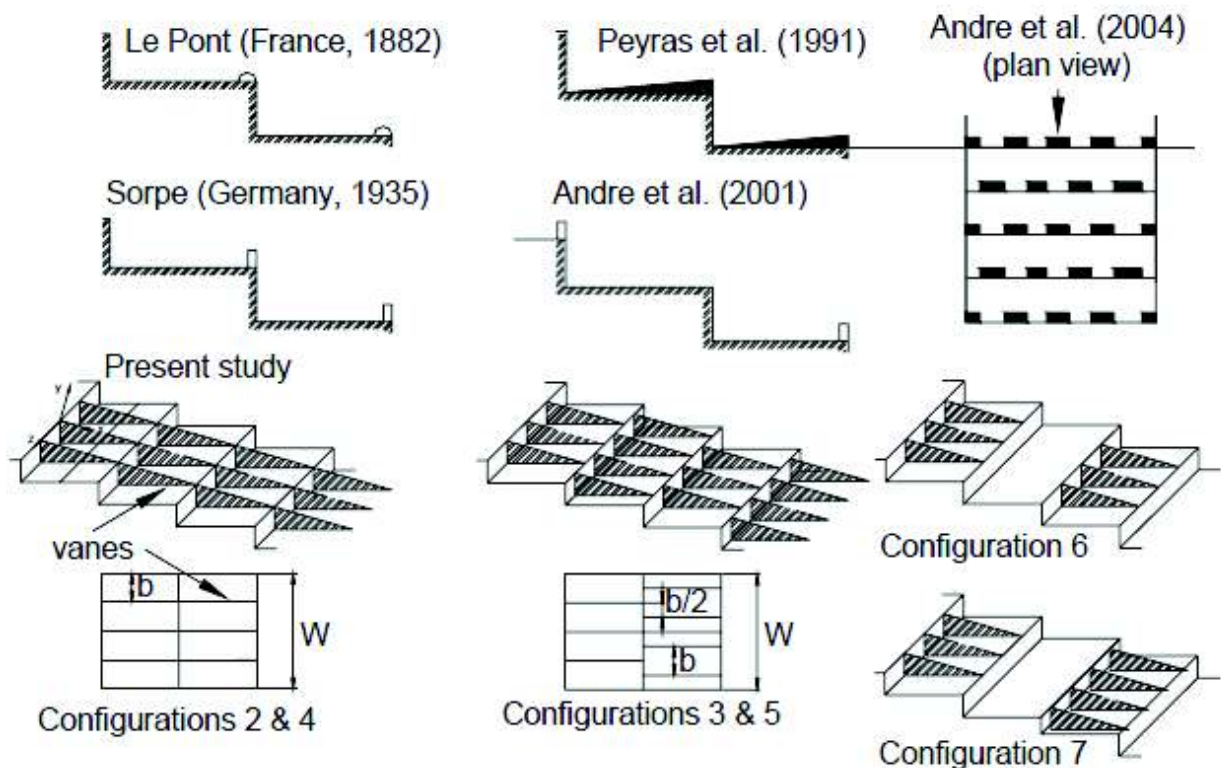
2.6 ESTRUCTURAS ADICIONALES PARA INCREMENTAR LA TASA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Los vertederos que tienen como función disipar energía por lo general presentan un fondo con rugosidad regular artificial uniformemente distribuida (escalones), sin embargo, existen estudios que sugieren la colocación e implementación de diversas configuraciones sobre el fondo escalonado, planteando la hipótesis de que estas podrían mejorar la tasa de disipación de energía y la resistencia al flujo (Andre et al., 2004; Chanson & Gonzalez, 2004). A pesar de ello, las investigaciones realizadas son muy pocas y no se tiene un amplio rango de aplicación en cuanto a la geometría de escalón, por ende de la rápida escalonada; a continuación se mencionan dos de los estudios más relevantes:

- **RAPIDA ESCALONADA** ($\alpha = 21.8^\circ$, $B = 1$ m, $h = 0.10$ m y $l = 0.25$ m)

Se demostró con base en las investigaciones realizadas por Gonzalez & Chanson (2006) bajo la condición de flujo rasante, que las configuraciones con las cuales existió una mejora en la tasa de disipación de energía son las siguientes:

Figura No. 2.16: Ejemplos de configuraciones con estructuras adicionales sobre el perfil escalonado, para mejorar la tasa de disipación de energía en flujo rasante



Fuente: Gonzalez & Chanson. (2006).

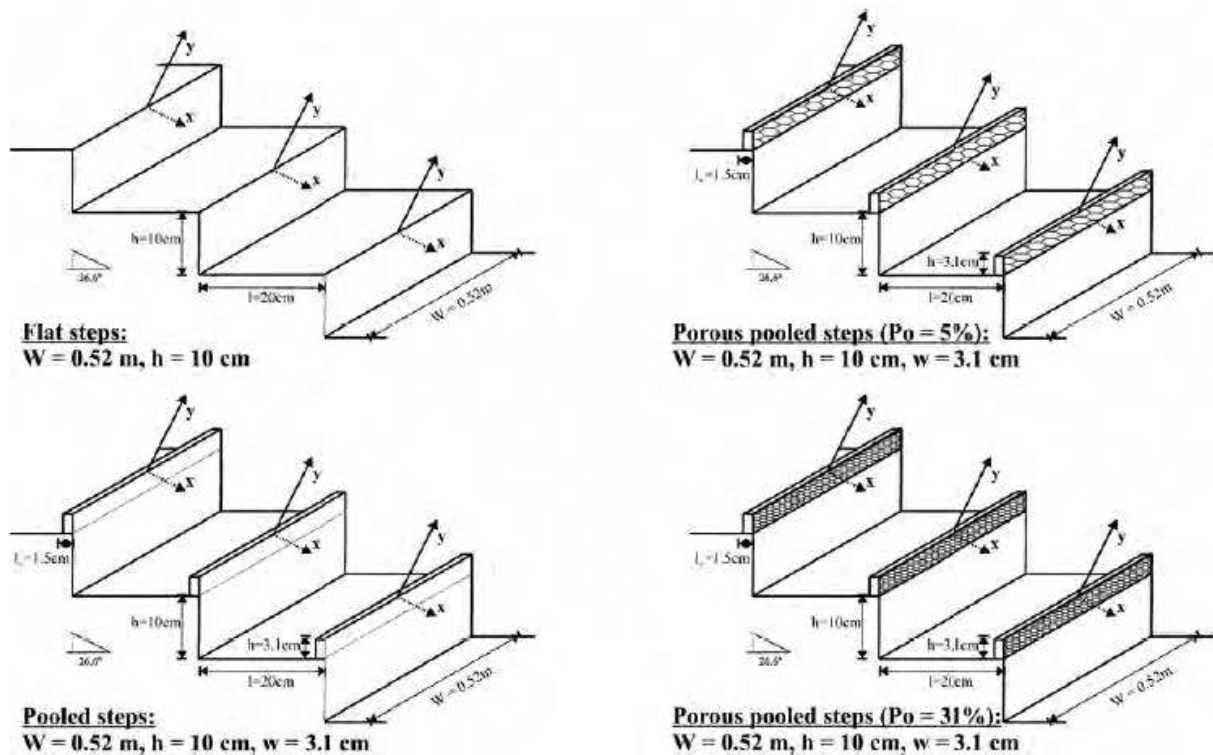
Como se observa en la **Figura No. 2.16**, las estructuras adicionales pueden ser rampas, paletas y tabiques triangulares distribuidos de diversas maneras sobre el fondo escalonado.

Con base en los resultados obtenidos Gonzalez & Chanson (2006), plantean que las mayores tasas de disipación de energía pueden coseguirse con la configuración de tabiques triangulares colocados en zigzag en cada escalón.

- **RÁPIDA ESCALONADA** ($\alpha = 26.6^\circ$, $B = 0.52$ m, $h = 0.10$ m y $l = 0.20$ m)

En la investigación realizada por Felder & Chanson (2013) bajo la condición de flujo escalón – escalón, el enfoque principal fue la colocación de paredes planas con y sin porosidad (orificios en las paredes), como se observa en la **Figura No. 2.17**.

Figura No. 2.17: Ejemplo de configuraciones para analizar la tasa de disipación de energía en flujo escalón-escalón



Fuente: Felder & Chanson. (2013).

Felder & Chanson (2013) establecen que, si bien con el aumento de la porosidad (orificios) en las paredes planas las pulsaciones en el flujo disminuyen y se tiene por ende un flujo más estable, el rendimiento en la tasa de disipación de energía se reduce, es decir, que aguas abajo de la rápida escalonada se obtiene una disipación de energía menor en comparación a la rápida escalonada con diseño convencional.

2.7 ESTADO DEL ARTE

Debido al impulso en la construcción de este tipo de aliviaderos, se han desarrollado diversos trabajos de investigación alrededor del mundo. Se presenta en el **Cuadro No. 2.10** un resumen de las investigaciones realizadas hasta el momento en modelo físico y prototipo, las cuales cubren un extenso rango de condiciones geométricas e hidráulicas (Estrella, 2013).

Los estudios existentes, se dividen en dos, de acuerdo con el tipo de régimen existente en el aliviadero escalonado: estudios en flujo escalón – escalón y estudios en flujo rasante.

Cuadro No. 2.10: Estudios en modelo físico

ESTUDIOS EN MODELO FÍSICO							
Nombre	Año	α (°)	Escala	h (m)	q (m ² /s)	Tipo de régimen	Observaciones
Horner	1969	22.8 a 40.1	-	0.15 a 0.46	-	E.E. y F.R.	Estudio en escalones con contra pendiente
Essery & Horner	1978	11 a 40	-	0.025 a 0.5	-	E.E. y F.R.	Ensayos de la CIRIA
Stephenson	1979	18.4 a 45	-	0.15	-	E.E. y F.R.	Aliviadero de gaviones
Noori	1984	5.7 a 11.5	-	0.004 a 0.013	0.007 a 0.2	F.R.	
Sorensen	1985	52	1/10 ; 1/25	0.061 (1/10) ; 0,024 (1/25)	0.005 a 0.235 (1/10) ; 0.006 a 0.110 (1/25)	E.E. y F.R.	Modelo físico del aliviadero de la presa de Monksville
Houston	1987	72 y 59	1/5 ; 1/10 ; 1/15	0.06 (1/10) ; 0.04 (1/15)	hasta: 0.34 (1/5) ; 0.07 (1/10) ; 0.04 (1/15)	F.R.	Modelo físico del aliviadero de la presa de Upper Stillwater
Bramley, May y Baker	1989	33.7	-	0.025	hasta 0.5	F.R.	Bloques pré-fabricados, colocados paralelos al paramento de la presa
Baker	1990	21.8	-	0.0096 a 0.058	0.025 a 0.5	F.R.	Yuxtaposición de bloques pré-fabricados con forma de cuña inclinados a 8.3°
Diez - Cascón	1991	51.3	1/10	0.03 ; 0.06	0.022 a 0.28	F.R.	

ESTUDIOS EN MODELO FÍSICO							
Nombre	Año	α (°)	Escala	h (m)	q (m ² /s)	Tipo de régimen	Observaciones
BaCaRa	1991	53.1 a 63.4	1/10 ; 1/25	0.06 (1/10) ; 0.024 (1/25)	0.026 a 0.207 (1/10) ; 0.007 a 0.115 (1/25)	F.R.	
Bayat	1991	51.3	1/25	0.02 ; 0.024 ; 0.03	0.006 a 0.07	F.R.	Modelo físico del aliviadero de Godar-elandar (Irán)
Stephenson	1991	54.5	-	-	-	-	Modelo físico del aliviadero de valle Kennedy
Peyras et al.	1991	18.4 ; 26.6 ; 45	1/5	0.20	0.04 a 0.27	E.E. y F.R.	Aliviaderos de gaviones
Frizell et al.	1992	26.6	-	0.05	0.373 a 1.091	F.R.	Solera formada por la yuxtaposición de bloques pré-fabricados con forma de cuña, inclinados a 15°
Tozzi	1992	53.1	1/15	0.0083 a 0.10	0.086 a 0.201	F.R.	
Bindo et al.	1993	51.3	1/21 ; 1/42	0.04 (1/10) ; 0.02 (1/42)	0.01 a 0.142 (1/21) ; 0.007 a 0.04 (1/42)	F.R.	Modelo físico del aliviadero de M'Bali
Christodoulou	1993	55	-	0.025	0.02 a 0.09	F.R.	
Montes	1994	36.8 y 45	-	0.03	-	E.E. y F.R.	
Ru et al.	1994	53.1	1/10	0.02 a 0.08	0.003 a 0.32	E.E. y F.R.	
Ruff & Frizell	1994	26.6	-	0.1554	2.6	F.R.	
Israngkura & Chinnarasri	1995	15.3 y 45	-	0.059 a 0.125	0.002 a 0.159	E.E. y F.R.	
Elviro & Mateos	1995	53.1	1/6 a 1/16	0.05 a 0.15	-	E.E. y F.R.	
Kells	1995	45	1/5	-	-	E.E. y F.R.	Aliviadero de gaviones
Gaston	1995	26.6	-	0.064	0.31 a 3	F.R.	
Zhou	1996	53.1	-	0.04	0.012 a 0.189	F.R.	
Tozzi et al.	1998	52.2	1/15	0.053	0.23	F.R.	
Yildiz & Kas	1998	30 ; 51.3 ; 60	-	0.025 ; 0.075	0.04 a 0.24	F.R.	
Chamani & Rajaratnam	1999	59 ; 51.3	-	0.125 ; 0.313 ; 0.625	0.073 a 0.205	F.R.	
Yasuda & Ohtsu	1999	5.7 ; 11.3 ; 19 ; 30 ; 55	-	0.006 a 0.01 ($\alpha=5.7^\circ$; 11.3°) ; 0.002 a 0.08 ($\alpha=19^\circ$) ; 0.004 a 0.07 ($\alpha=30^\circ$) ; 0.003 a 0.064 ($\alpha=55^\circ$)	0.008 a 0.089	F.R.	

ESTUDIOS EN MODELO FÍSICO							
Nombre	Año	α (°)	Escala	h (m)	q (m ² /s)	Tipo de régimen	Observaciones
Shvainsnshtein	1999	38.7 ; 51.3	-	0.05 a 0.0625	0.08 a 0.2	F.R.	
Matos	2000	53.1	-	0.08	0.08 a 0.2	F.R.	
Boes	2000	30 ; 50	-	0.023 , 0.046 , 0.092 ($\alpha=30^\circ$) ; 0.031 , 0.093 ($\alpha=50^\circ$)	-	F.R.	
Pinheiro & Fael	2000	14 ; 18.4	-	0.05	0.057	E.E.	
Sánchez Juny et al.	2001	51.3	-	0.1	0.083 a 0.33	F.R.	
Chanson & Toombes	2000	3.2 ; 3.4 ; 21.8	-	0.07, 0.143 ($\alpha=3.4^\circ$) ; 0.10 ($\alpha=21.8^\circ$)	0.04 a 0.17 ($\alpha=3.4^\circ$) ; 0.005 a 0.5 ($\alpha=21.8^\circ$)	E.E. y F.R.	
Manso	2002	18.4	1/10	-	0.326	F.R.	Estudio de estabilidad de diversos elementos de protección de paramentos de presas para vertidos controlados por coronación
Gomes, Sanagiotto, Dai Prá y Marques	2003	53.1	-	0.03 ; 0.06 ; 0.09	0.027 a 0.70	F.R.	
André	2004	30	-	0.06	hasta 0.28	F.R.	Estudio de distintos sistemas de protección de paramento de presas para vertidos por coronación
González & Chanson	2004	15.9 y 21.8	-	0.05 y 0.1	0.02 a 0.2	E.E. y F.R.	

α : ángulo de la rápida con respecto a la horizontal
h : altura del peldaño
q : caudal específico
E.E : flujo escalón a escalón
F.R : flujo rasante

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

2.8 CONCLUSIONES

Se presenta a continuación conclusiones con respecto a la revisión de la literatura técnica sobre el estudio de flujo rasante en una rápida escalonada.

- Para vencer grandes desniveles topográficos donde, el cambio de nivel es un factor importante, una posible alternativa es la implementación de una rápida escalonada, con el fin de disipar la mayor cantidad de energía posible durante el descenso del flujo por la rápida y de esta manera dimensionar el cuenco disipador ubicado al pie de esta con una energía residual menor en comparación a la de una rápida lisa.
- Dentro del análisis de flujo agua – aire presente sobre una rápida escalonada, el flujo rasante es el principal objeto de estudio donde la mayoría de las investigaciones realizadas, inciden en la zona del flujo completamente desarrollado como sitio de estudio considerando la región de flujo uniforme por ser la zona de equilibrio entre las fuerzas de gravedad y fricción.
- Uno de los aspectos que generalmente merece especial atención es la disipación de la energía cinética, y su relación con la estructura, la misma que debe ser estudiada a fondo para optimizar el diseño de la estructura y evitar el daño de la misma.
- Para fines de este estudio, en el análisis de la disipación de energía se consideran secciones de control en el canal de salida y aguas arriba de la cresta de la rápida escalonada.

CAPÍTULO 3

BASE TEÓRICA SOBRE MODELACIÓN HIDRÁULICA. DESCRIPCIÓN, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los principios teóricos sobre modelación hidráulica, las bases del funcionamiento de la Instalación Experimental conformada por una rápida escalonada y sus obras complementarias, como lo son el canal de aproximación y el canal de salida al pie de la misma, además se describen los procesos y fases de construcción, prosiguiendo con la calibración de cada uno de los elementos que la conforman.

3.1 INTRODUCCIÓN

El complejo análisis del comportamiento del flujo en diversas estructuras hidráulicas ha generado la necesidad de crear métodos con los cuales sea posible estudiar e interpretar de mejor manera las características hidrodinámicas tridimensionales del flujo. Estos métodos han sido popularizados y son comúnmente conocidos como modelos hidráulicos, su fundamento se basa en las teorías de similitud hidráulica y en el análisis de diversas cantidades físicas relacionadas al movimiento y a la acción dinámica del fluido, denominado análisis dimensional.

Un modelo hidráulico es un sistema que simula un fenómeno real o un prototipo, conceptualizándolo y simplificándolo, para posteriormente describirlo y cuantificarlo obteniendo así resultados útiles para el diseño, operación y optimización de las estructuras hidráulicas (Calderón, 2017).

3.2 BASE TEÓRICA: MODELACIÓN HIDRÁULICA

Los modelos hidráulicos generalmente se producen en condiciones controladas en un laboratorio, por lo cual llegan a tener diversas aplicaciones; pueden ser usados para dar solución a problemas relacionados con estructuras hidráulicas, fenómenos de infiltración, tramos de ríos y problemas relacionados con el transporte de sedimentos.

Los modelos hidráulicos generalmente se clasifican en: modelos físicos y modelos numéricos.

3.2.1 MODELOS FÍSICOS

La modelación física consiste en la construcción de un modelo a escala reducida que permite reproducir, observar y estudiar el comportamiento tridimensional del flujo y las condiciones de funcionamiento de una estructura hidráulica, para de esta manera confirmar la validez del diseño de la misma o de darse el caso realizar modificaciones que permitan optimizarla (Castro, Hidalgo , & Poveda, 2003).

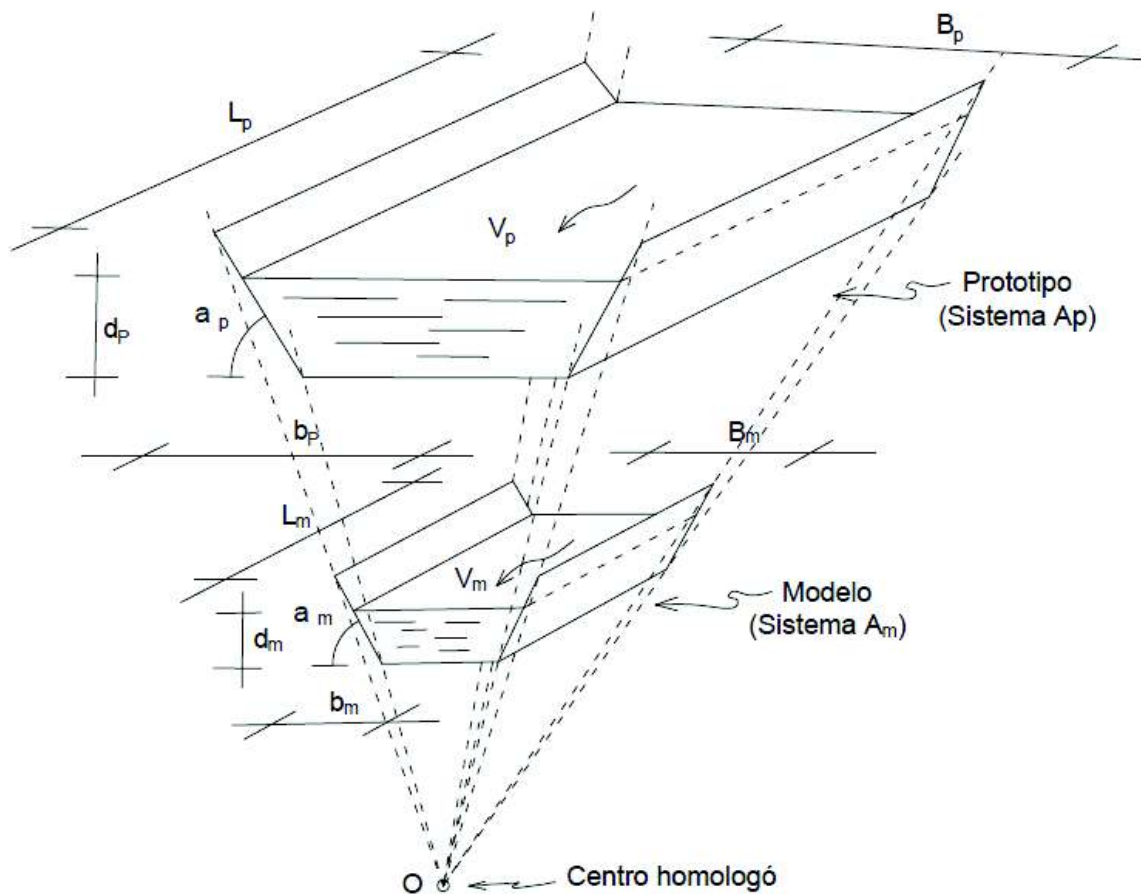
Para asegurar que el comportamiento del modelo sea semejante al comportamiento del prototipo, hay que verificar que el primero cumpla ciertas condiciones de similitud (geométrica, cinemática y dinámica), esto supone la igualdad tanto en modelo como en prototipo de los números adimensionales de Froude, Reynolds y Weber. Aunque dicha igualdad se daría solo si el modelo tuviera escala 1, es decir, que sea del mismo tamaño que el prototipo, pero tal condición es una imposibilidad en la práctica (Rendón , 2011; Flores, 2015).

En la **Figura No. 3.1**, se definen lados, superficies y volúmenes homólogos, que a su vez constituyen la denominada similitud geométrica; además se observa que cada línea de proyección que sale de un sistema (ya sea modelo o prototipo) hacia un centro homólogo, intercepta a los mismos en puntos sobre los cuales se pueden definir magnitudes tales como: velocidad, presión, etc.

Si se compara ambos sistemas con respecto al movimiento, se establece entonces la similitud cinemática, ésta se cumple siempre y cuando la forma del patrón de flujo sea homóloga en cualquier tiempo, es decir, existe similitud de movimiento en ambos sistemas, dando como resultado que la relación de velocidades en puntos homólogos debe ser constante. Previo a cumplir con la similitud cinemática, es requisito cumplir con la similitud geométrica.

Para que el movimiento del flujo sea similar en ambos sistemas, aparte de cumplir con las similitudes antes mencionadas, se debe tomar en cuenta la acción de las fuerzas que actúan sobre las partículas del fluido, esto conlleva a que el polígono de fuerzas que actúa sobre puntos homólogos sea geoméricamente similar, es decir, significa que la relación de fuerzas homólogas debe ser un factor constante en todo el sistema.

Figura No. 3.1: Proyección lineal del sistema modelo – prototipo



Fuente: Flores, W. (2015).

En aliviaderos escalonados se tiene la presencia de flujo bifásico (agua y aire), las burbujas que en este se originan, no permiten mantener una proporción entre modelo y prototipo, es decir, la escala de la burbuja es mayor en el modelo, lo cual implica una menor capacidad de transporte de aire en comparación con el prototipo y por consiguiente la disipación de energía también tiende a ser menor, sin embargo, para este tipo de estructura hidráulica se puede aplicar la semejanza de Froude (Rendón , 2011; Calvo, 2015).

Por las características del modelo, los modelos físicos se pueden clasificar como se indica a continuación:

Cuadro No. 3.1: Clasificación de los modelos físicos según sus características

Clasificación de los Modelos Físicos			
Modelos: De acuerdo a la semejanza geométrica con el prototipo		Modelos: De acuerdo a la movilidad y deformabilidad del contorno	
Geoméricamente semejantes	Geoméricamente distorsionados	De contorno fijo	De contorno móvil
Aquellos en los cuales se conserva la semejanza de todas las variables geométricas, interviene un único factor, llamado escala, que permite amplificar o reducir las magnitudes geométricas del prototipo.	Al igual que los anteriores conservan semejanza con el prototipo, pero se usan varios factores para amplificar o reducir las diferentes dimensiones del mismo. Es común que las dimensiones verticales tengan una escala y las dimensiones horizontales otra.	Aquellos en los que la deformabilidad del contorno no es importante con respecto al comportamiento del flujo, es decir, se emplea en fenómenos donde la variación de niveles y velocidades del flujo son parámetros determinantes, en conclusión, se puede representar estos contornos en el modelo como si fueran fijos o indeformables.	Cuando los fenómenos vienen determinados por la movilidad y deformabilidad de la sección, se necesitan modelos que representen dicho contorno de manera fiel y confiable, por lo general se emplean para estudiar problemas relacionados con estabilización de cauces de ríos, canales y playas.

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fuente: Flores, W. (2015).

3.2.2 MODELOS NUMÉRICOS

Gracias al avance e incremento de capacidad de cálculo en ordenadores, se tienen actualmente técnicas de modelación numérica conocidas comúnmente como CFD (Computational Fluids Dynamic) capaces de resolver diversos problemas de la Ingeniería Hidráulica, Mecánica, Química, entre otras (Casa, 2016; Berrones & Quilligana, 2017).

Los CFD en el área de la hidráulica son útiles puesto que realizan un análisis matemático del comportamiento tridimensional del fluido mediante las Ecuaciones de Navier – Stokes, cuya base se rige en los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía.

Con el paso de los años, los CFD se han convertido en herramientas fundamentales para el estudio e investigación del comportamiento de fluidos sometidos a diferentes condiciones tanto geométricas como físicas. Optimizando a la vez el tiempo de solución de tan complejos sistemas y los recursos económicos que se usan con respecto a la modelación física, sin embargo, debe tomarse en cuenta que los modelos de simulación numérica deben ser calibrados con los resultados obtenidos a partir de una modelación física o con los resultados de otro modelo numérico siempre y cuando este haya sido previamente calibrado (Berrones & Quilligana, 2017).

A continuación, en el **Cuadro No. 3.2** se resume el proceso de desarrollo de la solución a un problema con ayuda de la modelación hidráulica, sea esta física o numérica, identificando de igual manera las diferencias existentes entre ambas metodologías.

Cuadro No. 3.2: Proceso del desarrollo de obtención de soluciones de un determinado problema, con modelación física y numérica

	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO
1	Definición del problema. Identificación de las fuerzas actuantes esenciales. Definición de los objetivos del tratamiento experimental.	
2	Definición de los criterios de similitud dinámica total y restringida.	Definición del sistema de ecuaciones.
3	Formulación de las condiciones de borde o de contorno.	
4	Construcción del modelo.	Desarrollo del esquema para la solución numérica.
5	Calibración del modelo utilizado. Variación de la rugosidad. Variación de los coeficientes.	
6	Mediciones → Solución	Cálculos → Solución
7	Optimización de la solución conforme a los objetivos del modelo. Variantes constructivas en el modelo. Variantes en los datos de entrada / iniciales.	
8	Cálculo para las condiciones reales del prototipo y comprobación de los resultados.	

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fuente: Castro, Hidalgo , & Poveda. (2003).

3.2.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL

Las investigaciones realizadas en laboratorio con modelos físicos y/o instalaciones experimentales, se basan en el análisis dimensional. Esta es una herramienta matemática que relaciona magnitudes o variables físicas, la ventaja de su aplicación radica en que permite manejar dichos parámetros con orden y lógica matemática, facilitando de esta manera la correcta ejecución del objeto de estudio (López & Soto, 2016).

Entre los distintos objetivos que tiene el análisis dimensional, se mencionan a continuación los más importantes:

- Obtener parámetros adimensionales que permitan el diseño de modelos físicos y ayuden en el reporte de resultados experimentales.
- Determinar leyes que permitan predecir el comportamiento del prototipo a partir del comportamiento del modelo.
- Predecir tendencias en cuanto al comportamiento del flujo, relacionando los diferentes parámetros adimensionales.

La limitación del análisis dimensional es que este solamente presenta los parámetros adimensionales considerados a criterio del investigador, y no indica si estos son relevantes, importantes o si existe algún otro parámetro que no fue considerado. Estas dudas se resuelven una vez finalizado el plan de pruebas y con el análisis de resultados (Calderón, 2017).

3.2.3.1 MAGNITUDES FÍSICAS EN EL ANÁLISIS DIMENSIONAL

Las magnitudes físicas que intervienen en el análisis dimensional son: fundamentales (básicas) y derivadas (secundarias o dependientes).

a) MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Son las magnitudes más básicas, no dependen de una ecuación. En hidráulica son tres las magnitudes fundamentales: Longitud (L), Masa (M) y Tiempo (T).

b) MAGNITUDES DERIVADAS

Son magnitudes que se encuentran en función de las fundamentales, cabe mencionar algunos ejemplos: Área (L^2), Volumen (L^3), Velocidad (L/T), Caudal (L^3/T), Fuerza (ML/T^2).

3.2.3.2 PRINCIPIO DE HOMOGENEIDAD DIMENSIONAL

Para determinar las dimensiones de una magnitud derivada, es necesario cumplir con el principio de homogeneidad, este establece que: Cualquier ecuación deducida analíticamente y que represente un fenómeno físico debe satisfacer cualquier sistema de

unidades. Esto quiere decir que todo fenómeno natural y por ende sus magnitudes físicas correspondientes son independientes del sistema de unidades que se utilice (Hidalgo, 2007).

Cuadro No. 3.3: Magnitudes homogéneas para diferentes sistemas de unidades, según sus dimensiones

MAGNITUD	SISTEMAS DE UNIDADES	
	SISTEMA CGS	SISTEMA MKS
Longitud	L	L
Masa	M	$FL^{-1}T^2$
Tiempo	T	T
Área (largo x ancho)	L^2	L^2
Volumen (largo x ancho x alto)	L^3	L^3
Densidad (masa / volumen)	ML^{-3}	$FL^{-4}T^2$
Velocidad (longitud / tiempo)	LT^{-1}	LT^{-1}
Aceleración (velocidad / tiempo)	LT^{-2}	LT^{-2}
Caudal (volumen / tiempo)	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
Fuerza (masa x aceleración)	MLT^{-2}	F
Presión (fuerza / superficie)	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Viscosidad Dinámica	$ML^{-1}T^{-1}$	$FL^{-2}T$
Viscosidad Cinemática	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
Tensión Superficial	MT^{-2}	FL^{-1}

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fuente: Hidalgo, M. (2007).

3.2.3.3 TEOREMA PI (π) O DE BUCKINGHAM

Nace a principios de siglo XX, con el fin de desarrollar un método generalizado que permita determinar los grupos adimensionales correspondientes a un fenómeno físico. Establece que:

El número de grupos adimensionales que pueden usarse para describir un fenómeno, en el que intervienen n variables es $z = n - r$, siendo r el número mínimo de dimensiones correspondientes al sistema fundamental. Se tiene entonces la función homogénea:

$$\emptyset (A_1, A_2, A_r, A_{r+1}, \dots, A_n) = 0 \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Así, puede crearse una función homogénea equivalente:

$$f(\pi) = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_z) = 0 \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Dónde:

- z: Número de grupos adimensionales π
- n: Número de variables que intervienen en el fenómeno físico
- r: Numero de Magnitudes Fundamentales
- A_i : Magnitud física

Para determinar los números o grupos adimensionales, es conveniente aplicar las siguientes recomendaciones:

- Clasificar a las variables en tres grupos: el primer grupo es el de variables geométricas (son las variables que describen geoméricamente las fronteras de la instalación experimental), el segundo grupo es el de las variables cinemáticas (son las variables que describen al flujo) y por último el grupo de las variables dinámicas (son las variables que describen el movimiento del fluido).
- En la determinación de cada uno de los parámetros π debe considerarse cierto número de variables repetitivas y por lo menos una variable diferente, con esto se garantiza que cada uno de los parámetros π sea diferente entre sí.
- El número de variables repetitivas es igual a r , el número de variables no repetitivas será igual a $n - r$, distribuidas en los $n - r$ parámetros π .
- Las variables repetitivas deben ser independientes entre sí e incluir magnitudes fundamentales.
- Si una variable desea ser despejada, debe tenerse precaución de no seleccionarla como variable repetitiva.

3.2.3.4 NÚMEROS ADIMENSIONALES FUNDAMENTALES

a) NÚMERO DE FROUDE (F_r):

Parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de gravedad:

$$F_r = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de gravedad}}$$

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g D}} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Dónde:

v: Velocidad del flujo (m/s)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

D: Profundidad hidráulica. D=y (calado, para sección rectangular) (m)

\sqrt{gD} : Velocidad de propagación de una onda de gravedad (c)

Por lo tanto, el número de Froude representa a la vez la siguiente relación:

$$F_r = \frac{v}{c} = \frac{\text{Velocidad del flujo}}{\text{Velocidad de propagación de una onda de gravedad}} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

En hidráulica es uno de los parámetros más importantes, sobre todo en flujos con efecto significativo de la gravedad, tales como flujos a superficie libre en los cuales el efecto de la viscosidad es despreciable. El número de Froude clasifica al régimen de flujo sobre una sección de la siguiente manera:

- Régimen de flujo subcrítico (tranquilo) ($F_r < 1$, o bien, $y_n > y_c$)
- Régimen de flujo supercrítico (torrencial) ($F_r > 1$, o bien, $y_n < y_c$)
- Régimen de flujo crítico ($F_r = 1$, o bien, $y_n = y_c$)

b) NÚMERO DE REYNOLDS (R_e):

Es uno de los parámetros hidráulicos más importantes, relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de viscosidad:

$$R_e = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de viscosidad}}$$

$$R_e = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Dónde:

ρ : Densidad del agua (998,2 Kg/m³ a 20 °C, en la práctica se usa 1000 Kg/m³)

v : Velocidad del flujo (m/s)

L : Longitud característica (m)

μ : Viscosidad dinámica del agua (1.005x10⁻³ N.s/m² a 20 °C)

En flujos a presión la longitud característica es el diámetro $L = D$, para flujos a superficie libre la longitud característica es 4 veces el radio hidráulico de la sección transversal $L = 4 R_h$.

En la práctica el número de Reynolds para flujos a superficie libre se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{4R_h v}{\nu} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

Dónde:

v : Velocidad del flujo (m/s)

R_h : Radio hidráulico de la sección transversal (m)

ν : Viscosidad cinemática del agua (1,007x10⁻⁶ m²/s a 20 °C)

Además, por definición, se sabe que:

$$R_h = \frac{\text{Área mojada}}{\text{Perímetro mojado}} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

El número de Reynolds clasifica al flujo de la siguiente manera:

- Flujo laminar:

Se caracteriza por ser un flujo estratificado en láminas paralelas que fluyen suavemente a lo largo de una trayectoria definida. Además, se los identifica por números de Reynolds bajos $Re < 2100$ (Levenspiel, 1993), puesto que cualquier turbulencia es eliminada a causa de la viscosidad.

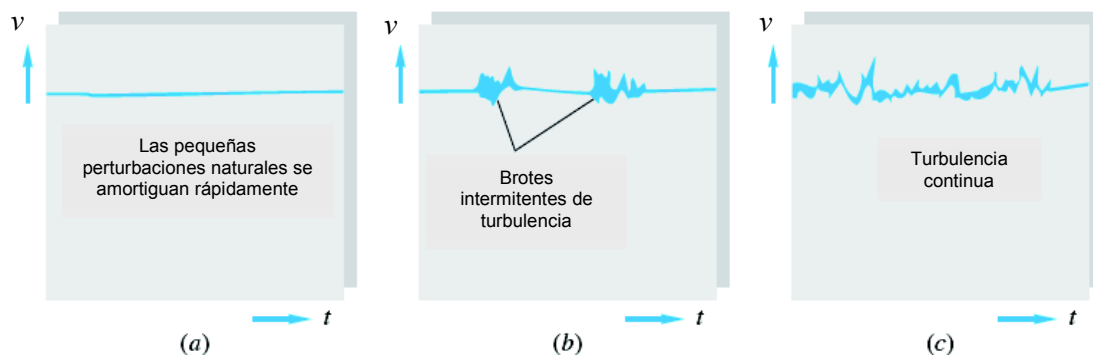
- Flujo en transición:

Cuando se tienen flujos con números de Reynolds comprendidos entre $2100 < Re < 4000$, se dice que su régimen se encuentra en una transición hacia la turbulencia. El origen de esta transición puede deberse a varios factores como, por ejemplo, las rugosidades de las paredes que contienen al fluido o las fluctuaciones de la corriente libre del mismo, pero el parámetro que rige dicha condición es el número de Reynolds (White, 2003).

- Flujo turbulento:

Son flujos con trayectoria desordenada, de movimientos caóticos e indefinidos, disminuyen los efectos de la viscosidad al punto de convertirla en despreciable. Se sabe experimentalmente que la turbulencia en un tubo circular se inicia a partir de valores de $Re > 4000$ (Levenspiel, 1993), cabe destacar que este valor es muy variable, pues depende de las condiciones de quietud del sistema.

Figura No. 3.2: Regímenes de flujo según el número de Reynolds. (a) Laminar, bajos Re .
(b) Transición, intermedios Re . (c) Turbulento, Altos Re



Fuente: White, F. (2003).

c) NÚMERO DE WEBER (W_e):

Relaciona las fuerzas de inercia con las de tensión superficial:

$$W_e = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de tensión superficial}}$$

$$W_e = \frac{\rho v^2 L}{\sigma} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Dónde:

ρ : Densidad del agua (998,2 Kg/m³ a 20 °C, en la práctica se usa 1000 Kg/m³)

v : Velocidad del flujo (m/s)

L : Profundidad hidráulica característica (m)

σ : Tensión superficial del agua (7.36x10⁻² N/m a 20 °C)

Sin embargo, en la práctica comúnmente se usa la siguiente expresión:

$$W_e = \frac{v}{\sqrt{\sigma/\rho L}} \quad \text{Ec. (3.10)}$$

En los fenómenos que ocurren en prototipo se pueden despreciar los efectos de las fuerzas de tensión superficial, sin embargo, en fenómenos que ocurren sobre modelos, no siempre es posible, ya que con profundidades muy pequeñas (menores a los 3 cm) las fuerzas de tensión superficial empiezan a ser significativas (Castro, s.f.).

d) NÚMERO DE NEWTON (N_e) O DE EULER (E_u):

Relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de presión:

$$E_u = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de presión}}$$

$$E_u = \frac{v^2 \rho}{p} \quad \text{Ec. (3.11)}$$

Dónde:

ρ : Densidad del agua (998,2 Kg/m³ a 20 °C, en la práctica se usa 1000 Kg/m³)

v: Velocidad del flujo (m/s)

p: Presión del flujo (N/m²)

Sin embargo, en la práctica comúnmente se usa la siguiente expresión:

$$E_u = \frac{v}{\sqrt{p/\rho}} \quad \text{Ec. (3.12)}$$

El número de Euler es un parámetro hidrodinámico que rige a fenómenos con significativos cambios de presión, que además tienen influencia de la aceleración y densidad del fluido, por lo cual llegan a ser despreciables las fuerzas viscosas, dando lugar a que la geometría de los contornos condicione al flujo para los fluidos incompresibles, es por esta razón que suele llamarse al número de Euler también como Índice Geométrico.

e) NÚMERO DE CAUCHY (C_a):

Relaciona las fuerzas de inercia con las de elasticidad de un cuerpo sólido:

$$C_a = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de elasticidad del cuerpo sólido}}$$

$$C_a = \frac{v^2 \rho}{E} \quad \text{Ec. (3.13)}$$

Dónde:

ρ : Densidad del agua (998,2 Kg/m³ a 20 °C, en la práctica se usa 1000 Kg/m³)

v: Velocidad del flujo (m/s)

E: Módulo de elasticidad del material del cuerpo sólido (N/m²)

Sin embargo, en la práctica comúnmente se usa la siguiente expresión:

$$C_a = \frac{v}{\sqrt{E/\rho}} \quad \text{Ec. (3.14)}$$

El número de Cauchy, se utiliza en problemas donde se evidencia la presencia de golpe de ariete, en los cuales la compresibilidad del fluido es importante (García, 2013).

f) NÚMERO DE MACH (M_a):

Relaciona las fuerzas de inercia con las de elasticidad del fluido:

$$M_a = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de elasticidad del fluido}}$$

$$M_a = \frac{v}{\sqrt{E_f/\rho}} \quad \text{Ec. (3.15)}$$

Dónde:

ρ : Densidad del agua (998,2 Kg/m³ a 20 °C, en la práctica se usa 1000 Kg/m³)

v : Velocidad del flujo (m/s)

E_f : Módulo de elasticidad del fluido (N/m²)

El número de Mach es un parámetro hidráulico importante en flujos en los cuales son relevantes los efectos de la compresibilidad.

3.2.4 CRITERIOS DE SIMILITUD

Los estudios experimentales, pruebas y análisis, se realizan por medio de una instalación física reducida a escala geométrica. Se requiere escalar adecuadamente no solo a la configuración geométrica de la estructura, sino también a todas las magnitudes cinemáticas y dinámicas para representar adecuadamente el fenómeno físico dado, esto da lugar a los denominados criterios de similitud, que deben ser satisfechos por los modelos hidráulicos e instalaciones experimentales.

3.2.4.1 TEORÍA DE LA SEMEJANZA MECÁNICA

Esta teoría se plantea con base en el marco conceptual de medios continuos y campos físicos; debido a la naturaleza de la presente investigación, el medio continuo es el agua y el campo físico de investigación es la hidráulica (Hidalgo, 2007).

SIMILITUD MECÁNICA:

Modelo y prototipo son mecánicamente semejantes, si y solo sí cumplen con la condición de ser geoméricamente semejantes, además que debe existir una relación fija y acorde entre las magnitudes físicas (velocidades, aceleraciones, tiempos, fuerzas, etc.) en puntos homólogos de ambos sistemas (Hidalgo, 2007).

Existen tres condiciones necesarias para cumplir con la similitud mecánica entre modelo y prototipo:

a) SIMILITUD GEOMÉTRICA

Esta similitud es independiente del movimiento y contempla sola la similitud en forma, se cumple cuando todas las magnitudes geométricas en prototipo (L_p) tienen una relación constante con las magnitudes geométricas del modelo (L_m). La condición de semejanza geométrica establece el primer factor de escala definido como:

$$e_L = \frac{L_p}{L_m} \quad \text{Ec. (3.16)}$$

Dónde:

e_L : Factor de escala de longitudes

L_p : Longitud en Prototipo (m)

L_m : Longitud en Modelo (m)

b) SIMILITUD CINEMÁTICA

La similitud cinemática implica una similitud en el movimiento. Debido a que las longitudes correspondientes tienen una relación fija, las velocidades de las partículas deben estar en una relación fija en la escala del tiempo. Los fenómenos que dependen del tiempo se desarrollan de tal forma que los intervalos de tiempo en prototipo (t_p) y modelo (t_m) están en relación constante. La escala de tiempos está definida como:

$$e_T = \frac{T_p}{T_m} \quad \text{Ec. (3.17)}$$

Dónde:

e_T : Factor de escala de tiempo

T_p : Tiempo en Prototipo (s)

T_m : Tiempo en Modelo (s)

Teniendo ya definidas las escalas de longitud y tiempo, se pueden deducir las escalas de velocidad, aceleración y caudal:

$$e_v = \frac{v_p}{v_m} = \frac{\frac{L_p}{T_p}}{\frac{L_m}{T_m}} = \frac{L_p \cdot T_m}{T_p \cdot L_m} = \frac{\frac{L_p}{L_m}}{\frac{T_p}{T_m}} = \frac{e_L}{e_T} \quad \text{Ec. (3.18)}$$

Dónde:

e_v : Factor de escala de velocidades

v_p : Velocidad en Prototipo (m/s)

v_m : Velocidad en Modelo (m/s)

$$e_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{\frac{L_p}{T_p^2}}{\frac{L_m}{T_m^2}} = \frac{e_L}{e_T^2} \quad \text{Ec. (3.19)}$$

Dónde:

e_a : Factor de escala de aceleraciones

a_p : Aceleración en Prototipo (m/s^2)

a_m : Aceleración en Modelo (m/s^2)

$$e_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{\frac{L_p^3}{T_p}}{\frac{L_m^3}{T_m}} = \frac{e_L^3}{e_T} \quad \text{Ec. (3.20)}$$

Dónde:

e_Q : Factor de escala de caudales

Q_p : Caudal en Prototipo (m^3/s)

Q_m : Caudal en Modelo (m^3/s)

c) SIMILITUD DINÁMICA

La similitud dinámica es la condición más estricta por cumplir, se da siempre y cuando se cumpla con la similitud geométrica y cinemática, y si además las fuerzas (fricción, tensión superficial, gravedad, inercia, etc.) que actúan sobre puntos homólogos en modelo y prototipo son similares. De esta manera la similitud dinámica puede establecerse como una equivalencia en escala de fuerza, representada por la ecuación dinámica de Newton, fuerza es igual a masa por aceleración.

$$e_F = \frac{M_p \cdot a_p}{M_m \cdot a_m} = e_M \cdot \frac{e_L}{e_T^2} \quad \text{Ec. (3.21)}$$

Dónde:

e_F : Factor de escala de fuerza

e_M : Factor de escala de masa

M_p : Masa en Prototipo (kg)

M_m : Masa en Modelo (kg)

3.2.4.2 SEMEJANZA HIDRÁULICA

En el análisis dimensional de los fenómenos hidráulicos, se determinan magnitudes físicas y las relaciones existentes entre las variables, a través de una función que permite explicar dicho fenómeno matemáticamente. Estas variables hidromecánicas deben ser usadas tanto en el prototipo como en el modelo, por ejemplo, en el análisis del flujo sobre una estructura hidráulica se postula la siguiente relación:

$$v = \phi \left(\frac{L}{a}, \frac{L}{b}, \frac{L}{c}, F_r, R_e, W_e, M_a \right) \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad \text{Ec. (3.22)}$$

Dónde:

v : Velocidad del flujo (m/s)

ϕ : Parámetro adimensional

L : Longitud característica del contorno del flujo (m)

a, b, c : Magnitudes geométricas de una estructura hidráulica (m)

F_r : Número de Froude (expresa el efecto de la gravedad)

R_e : Número de Reynolds (expresa el efecto de la viscosidad)

W_e : Número de Weber (expresa el efecto de la tensión superficial)

M_a : Número de Cauchy

Δp : Diferencia de presión entre dos puntos

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

La ecuación anterior debe cumplirse tanto en prototipo como modelo, a la vez permite establecer relaciones entre las magnitudes físicas o escalas de ambos sistemas (Hidalgo, 2007).

3.2.4.3 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA

Dado que no es posible alcanzar una similitud hidráulica perfecta debido a lo complejo que es representar en modelo simultáneamente la incidencia de las fuerzas de gravedad, inercia, viscosidad y tensión superficial, por lo que se busca alcanzar una similitud en particular o más conocida como restringida, estas se han establecido según el tipo de fuerza predominante en el fenómeno.

Cuadro No. 3.4: Similitudes restringidas según el tipo de fuerza predominante

FUERZA PREDOMINANTE	IDENTIDAD	SIMILITUD PARTICULAR	TIPO DE MODELO
Gravitacional (F_g)	$Fr_p = Fr_m$	Froude	Froudiano
Viscosa (F_μ)	$Re_p = Re_m$	Reynolds	Viscoso
Tensión superficial (F_σ)	$We_p = We_m$	Weber	-----
Elástica (F_ϵ)	$Ma_p = Ma_m$	Mach	Elástico
Gravitacional (F_g) Viscosa (F_μ)	$Fr_p = Fr_m$ $Re_p = Re_m$	Froude Reynolds	Gráfico - viscoso

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fuente: Hidalgo, M. (2007).

SIMILITUD RESTRINGIDA DE FROUDE:

Como se puede observar en el **Cuadro No. 3.4**, la similitud restringida de Froude se aplica a fenómenos en los cuales predominan las fuerzas gravitacionales o de peso F_g , este tipo de fuerzas son predominantes en fenómenos que se desarrollan a superficie libre (López & Soto, 2016).

La instalación experimental de la rápida escalonada, se caracteriza por tener flujo a superficie libre, gobernado por la influencia de la componente de la gravedad paralela a la pendiente de la misma. En consecuencia, los cambios en la distribución de velocidades y su magnitud dependerán únicamente de los parámetros geométricos y dinámicos propuestos por la inclinación y forma de la sección transversal de la rápida. Esto nos lleva a concluir que el fenómeno de flujo que se presenta sobre y a lo largo de una rápida escalonada es fundamentalmente del tipo Froudiano.

Para cumplir con esta similitud se debe tener igualdad en el número de Froude entre el modelo y prototipo, por lo tanto:

$$Fr_p = Fr_m \qquad \text{Ec. (3.23)}$$

$$\frac{v_p}{\sqrt{g_p \cdot L_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m \cdot L_m}} \quad \text{Ec. (3.24)}$$

Despejando:

$$\frac{v_p}{v_m} = \sqrt{\frac{g_p}{g_m}} \cdot \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} \quad \text{Ec. (3.25)}$$

Se sabe que la gravedad es la misma tanto para prototipo como para modelo, entonces se tiene:

$$\frac{v_p}{v_m} = \left(\frac{L_p}{L_m} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. (3.26)}$$

Se sabe que:

$$e_L = \frac{L_p}{L_m} \quad \text{Ec. (3.27)}$$

Si reemplazamos, se obtiene la expresión que relaciona el factor de escala de velocidad con el de longitud, para modelos regidos por la similitud restringida de Froude:

$$e_v = e_L^{1/2} \quad \text{Ec. (3.28)}$$

De igual manera se pueden obtener las expresiones que relacionen los diversos factores de escala entre las distintas magnitudes derivadas.

Cuadro No. 3.5: Relaciones entre las escalas de diferentes magnitudes, para la similitud restringida de Froude

MAGNITUD	CORRELACIÓN ENTRE FACTORES DE ESCALA	EXPRESIÓN DERIVADA
Longitud (L)	e_L	$e_L = \frac{L_p}{L_m}$
Tiempo (T)	$e_T = e_L^{1/2}$	$e_L^{1/2} = \frac{T_p}{T_m}$
Velocidad (v)	$e_v = e_L^{1/2}$	$e_L^{1/2} = \frac{v_p}{v_m}$
Aceleración (a)	$e_a = 1$	$a_p = a_m$
Caudal (Q)	$e_Q = e_L^{5/2}$	$e_L^{5/2} = \frac{Q_p}{Q_m}$
Presión (p)	$e_p = e_L$	$e_L = \frac{p_p}{p_m}$
Energía (E)	$e_E = e_L^4$	$e_L^4 = \frac{E_p}{E_m}$
Fuerza (F)	$e_F = e_L^3$	$e_L^3 = \frac{F_p}{F_m}$
Pendiente (i)	$e_i = 1$	$i_p = i_m$
Número de Froude (F_r)	$e_{F_r} = 1$	$F_{r_p} = F_{r_m}$
Número de Reynolds (R_e)	$e_{R_e} = e_L^{3/2}$	$e_L^{3/2} = \frac{R_{e_p}}{R_{e_m}}$
Factor de Fricción (f)	$e_f = 1$	$f_p = f_m$

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fuente: Hidalgo, M. (2007).

3.2.5 LIMITACIONES EN LA MODELACIÓN FÍSICA

3.2.5.1 RESTRICCIÓN EXTERNA

Construir una Instalación Experimental dentro de un laboratorio tiene sus limitaciones, entre los principales aspectos fundamentales que se debe considerar son: área disponible en el laboratorio, el caudal disponible para la alimentación del sistema, la instrumentación de medida, materiales con lo que se va a construir el modelo, factor económico. Sin embargo, el modelo no debe ser demasiado pequeño para alcanzar la similitud dinámica y representar adecuadamente el fenómeno hidráulico.

El flujo sobre una rápida escalonada presenta un flujo bifásico con alta turbulencia y no puede ser modelado exactamente sin efecto de escala, usando la similitud de Froude, debido a los efectos de viscosidad y tensión superficial. A pesar de esto los efectos de escala pueden resultar insignificantes cuando se cumple ciertas recomendaciones en cuando a los valores mínimos del número de Reynolds y de Weber presentados en el literal 3.2.5.2. Boes (2000), concluyó que los efectos de escala serían insignificantes en modelos físicos construidos con una escala mínima de 1:10 a 1:15, para una descarga unitaria de aproximadamente $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ y una altura del escalón de 0.6 m.

3.2.5.2 EFECTOS DE ESCALA

En general la modelación con la similitud de Froude representa correctamente las fuerzas predominantes tales como la gravedad y la inercia, pero debido a que la Instalación Experimental de la rápida escalonada tiene un flujo de alta velocidad y con capacidad de arrastre de aire, pueden verse mal representadas las fuerzas correspondientes a la tensión superficial y viscosidad (Pfister & Chanson, 2013).

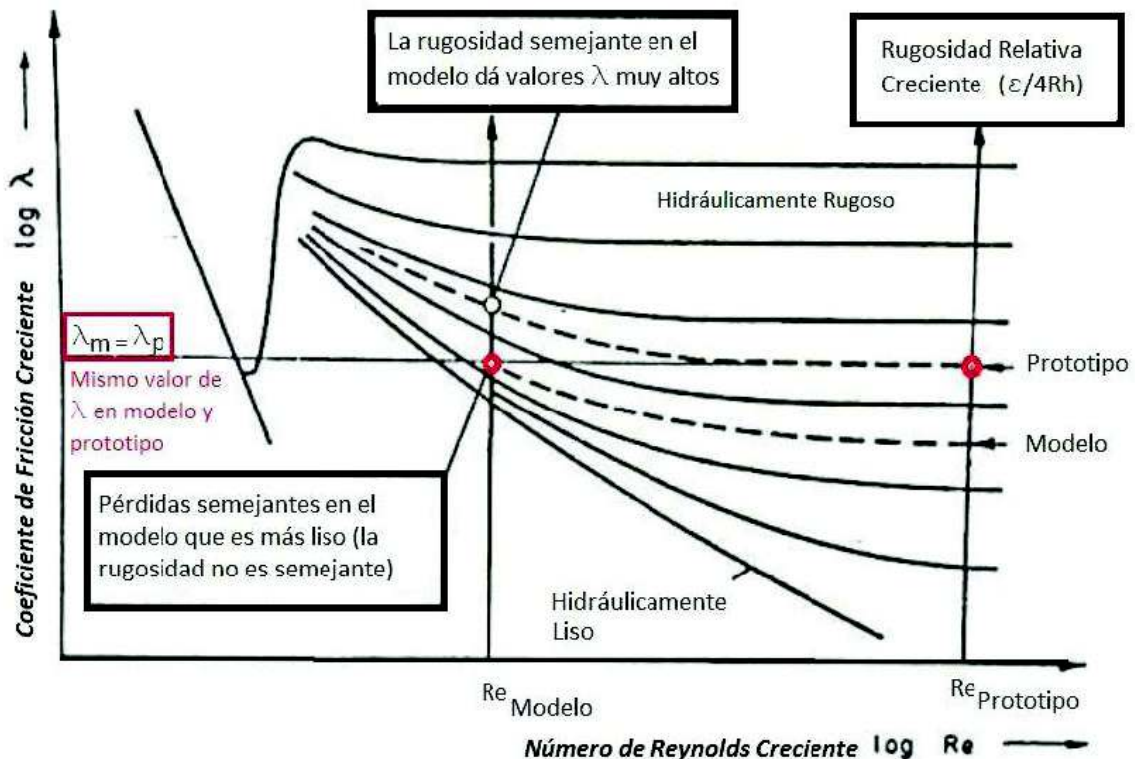
Por tal motivo, a continuación, se mencionan aspectos que se debe tomar en cuenta para evitar o disminuir los efectos de escala en la Instalación Experimental (modelo) de la rápida con perfil escalonado.

a) FLUJO MONOFÁSICO (AGUA):

Los efectos de las fuerzas viscosas se reducen cuando:

- En modelo se da la garantía de tener un flujo con turbulencia totalmente desarrollada, es decir, que se tenga números de Reynolds mayores a 2×10^4 , de esta manera se asegura que el efecto de las fuerzas gravitacionales es más importante que el de las fuerzas viscosas.
- No existe variación apreciable de los coeficientes de fricción entre modelo y prototipo, esta condición se cumple siempre y cuando el modelo sea hidráulicamente más liso que el prototipo, como se muestra en la **Figura No. 3.3**.

Figura No. 3.3: Condición de similitud en modelo (Similitud de Froude) incluyendo efectos de viscosidad y de rugosidad



Fuente: Castro, M. (s.f.).

Los efectos de las fuerzas de tensión superficial se reducen cuando:

- En modelo las profundidades son mayores a 2 cm. Si se tienen profundidades menores es recomendable colocar una capa jabonosa en las paredes, esto con el fin de reducir las fuerzas intermoleculares que originan capilaridad entre las paredes del modelo y el fluido.

b) FLUJO BIFÁSICO (AGUA – AIRE):

La modelación física de flujos bifásicos (agua – aire) requiere que tanto en modelo como en prototipo los números de Froude, Reynolds y Weber sean idénticos para representar de manera correcta el fenómeno hidráulico, físicamente esto es imposible, por lo que se han establecido ciertas condiciones a tomar en cuenta para minimizar los efectos de escala (Pfister & Chanson, 2013).

- Los límites para minimizar los efectos de escala en términos de concentración de aire:

$$W_e^{0.5} > 110$$

$$R_e > 1.10^5$$

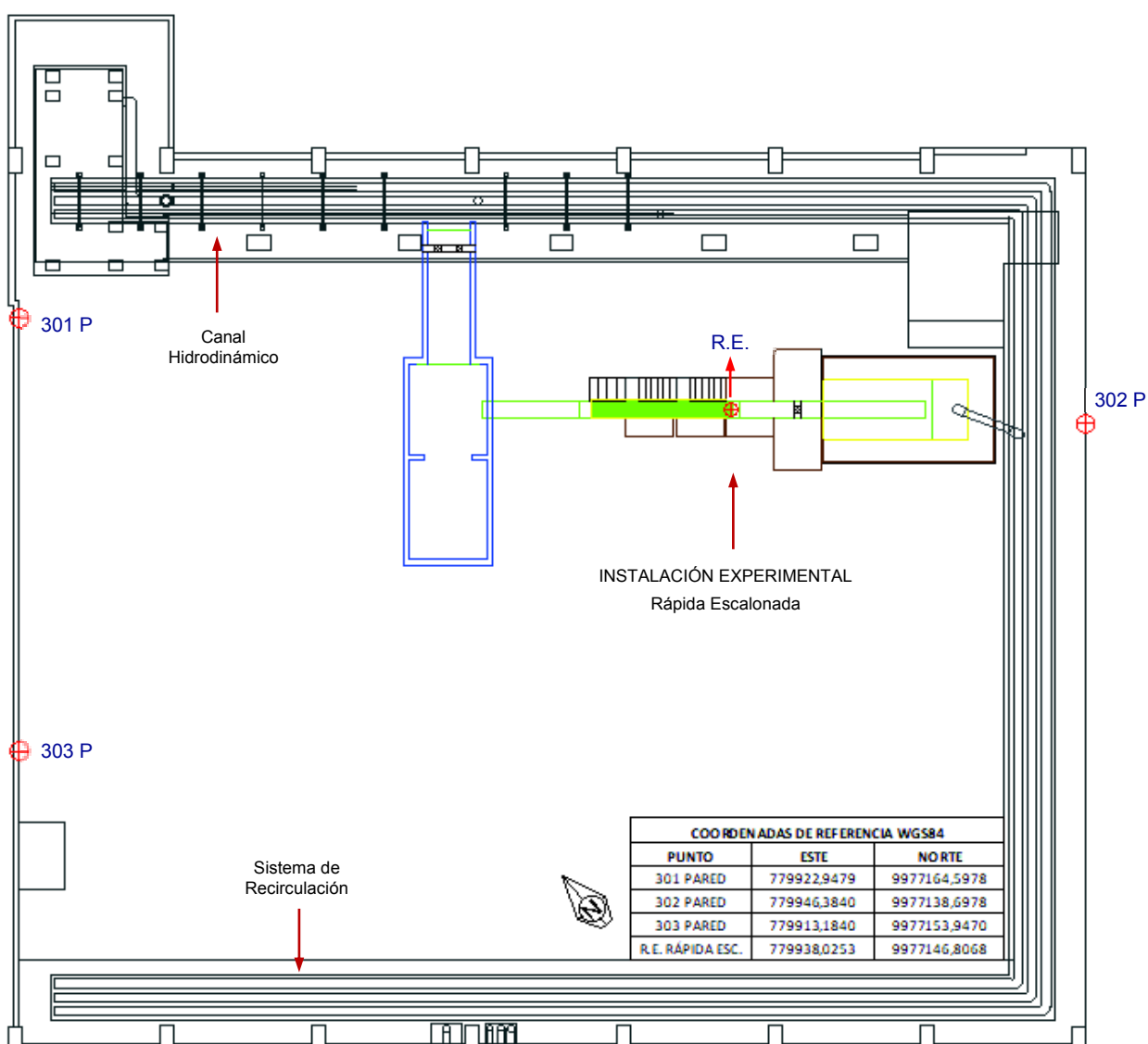
Siempre y cuando se cumpla que: $5 \leq F_r \leq 15$, para $F_r < 5$ estos límites deben ser más conservadores.

3.3 DESCRIPCIÓN, CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL. PROYECTO PIMI 16-06

3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La Instalación Experimental de la Rápida Escalonada está localizada en la parte nororiental del laboratorio CIERHI – EPN. La rápida escalonada se encuentra ubicada en las coordenadas WGS-84, 779938.253 E y 9977146.81 N como se muestra continuación en la siguiente figura.

Figura No. 3.4: Esquema de la Implantación de la Instalación Experimental de la Rápida Escalonada en el Laboratorio del CIERHI – EPN



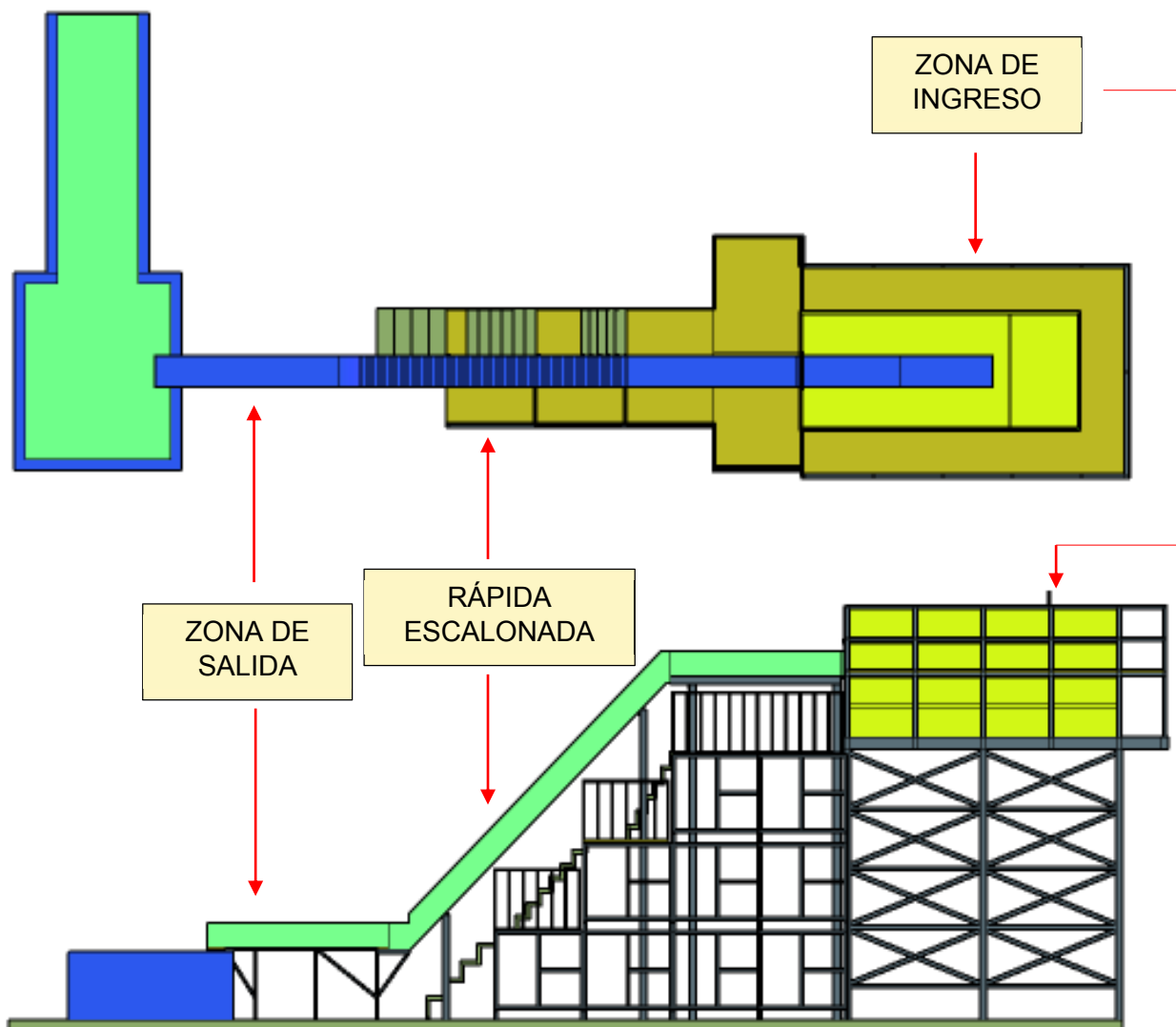
Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

3.3.1.1 COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental de la rápida escalonada está conformada principalmente por tres zonas que son:

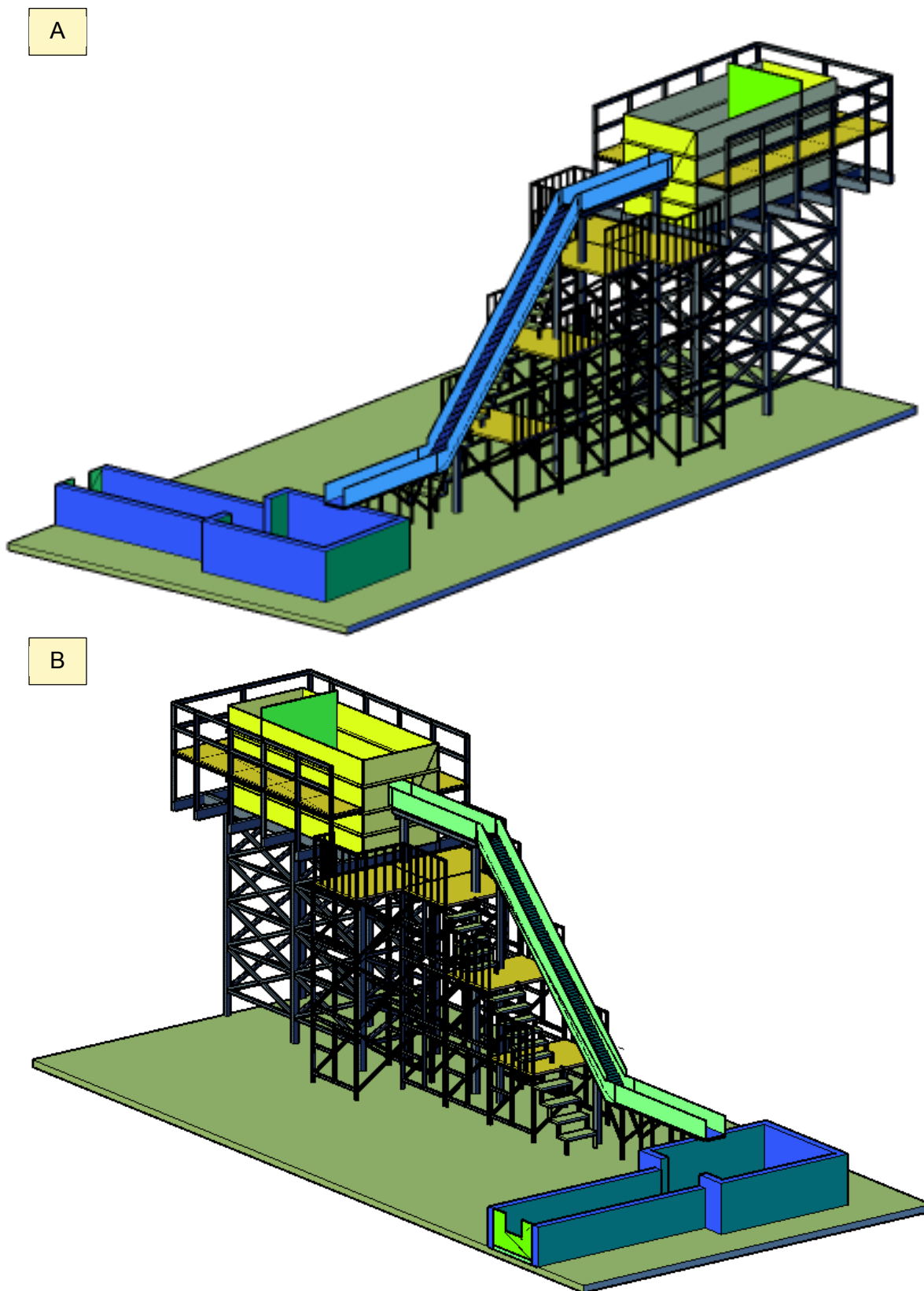
- Zona de ingreso
- Instalación experimental propiamente dicho. Rápida escalonada
- Zona de salida

Figura No. 3.5: Esquema de los componentes de la Instalación Experimental de la Rápida Escalonada



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Figura No. 3.6: Esquema tridimensional de la Instalación Experimental de la Rápida Escalonada. A) Vista lateral derecha, B) Vista lateral izquierda



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

a) ZONA DE INGRESO

Las estructuras que conforman esta zona tienen como principal objetivo: entregar de manera adecuada y estable la serie de caudales requeridos para cada una de las diferentes pruebas, así como permitir que el flujo que ingresa a la instalación experimental sea distribuido uniformemente. En esta zona se tienen los siguientes componentes:

- Líneas o tuberías de abastecimiento.
- Tanque elevado de abastecimiento con sus respectivas estructuras internas de uniformización.

i. Sistema de Tuberías:

La conducción de agua hacia el tanque elevado de abastecimiento se realiza mediante una tubería PVC – PRESIÓN de 250 mm de diámetro interno, dispuesta desde una derivación existente en el sistema de recirculación del Laboratorio CIERHI – EPN y que adicionalmente tiene una válvula de compuerta para regular el caudal de entrada hacia el sistema.

Para uniformizar al flujo que ingresa al tanque elevado de abastecimiento, se dispone de un tramo final de tubería perforada (1.20 m).

ii. Tanque de abastecimiento y uniformización:

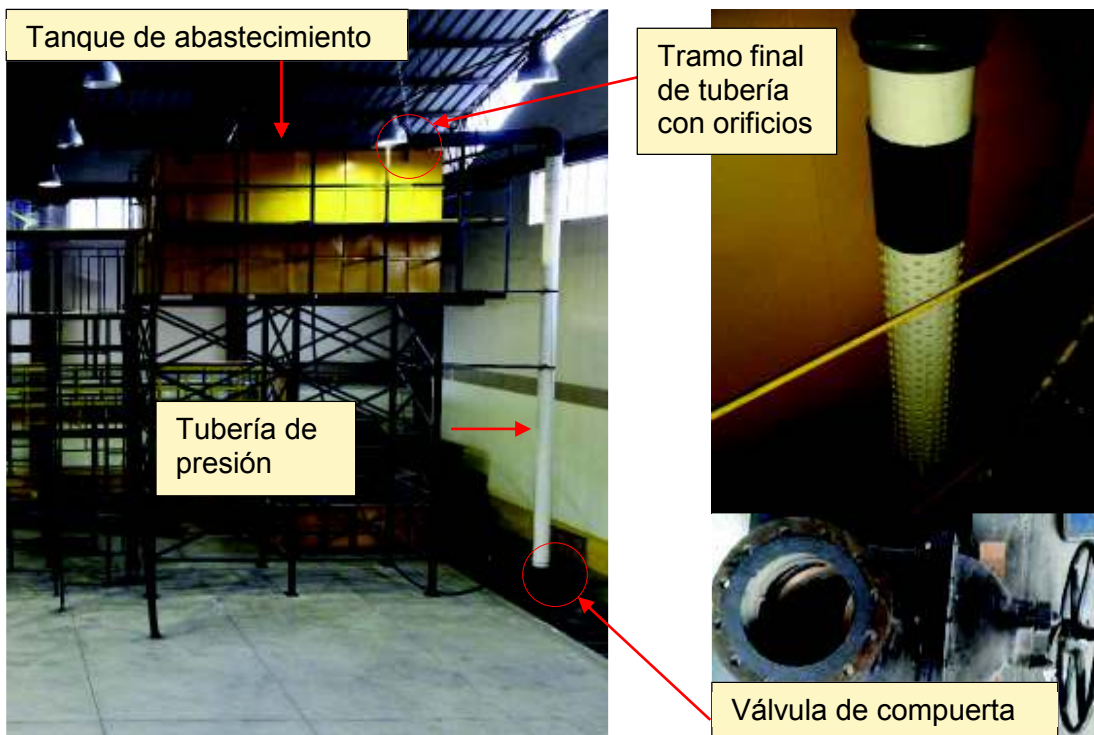
Consiste en un tanque construido en acero con una capacidad de almacenamiento de 21.12 m³, soportado por una torre elevada de 6 columnas de 4.60 m de altura. Sus dimensiones son: 4.80 m de largo en la dirección del flujo y 2.0 m de ancho.

Para el vaciado del tanque se tiene una válvula de compuerta conectada mediante una manguera en el fondo de este, cuyo fin es evacuar el caudal de salida hacia el canal de recirculación del Laboratorio.

En el interior del tanque se tiene una pantalla de madera de 2.0 x 2.40 m, cuya función es uniformizar el flujo que ingresa a la instalación experimental.

Los componentes anteriormente descritos, se pueden observar en las siguientes fotografías y figuras:

Fotografía No. 3.1: Tanque de abastecimiento, tubería y accesorios



Fotografía No. 3.2: Estructura de soporte tanque de abastecimiento y accesorios

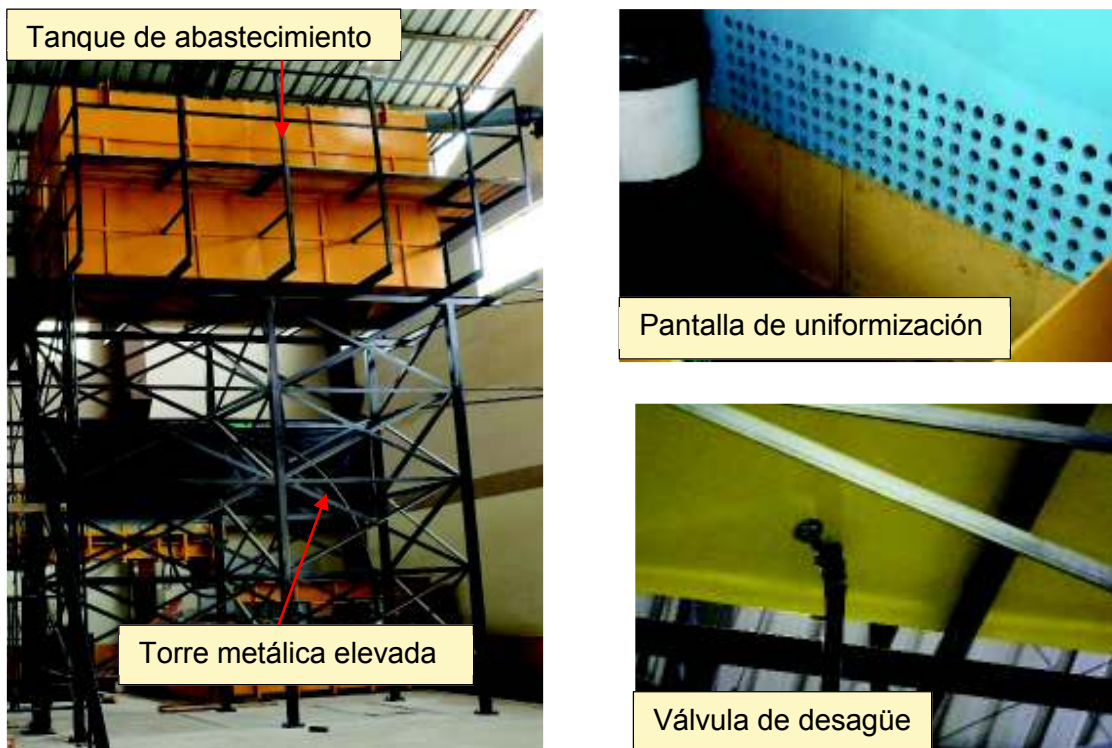
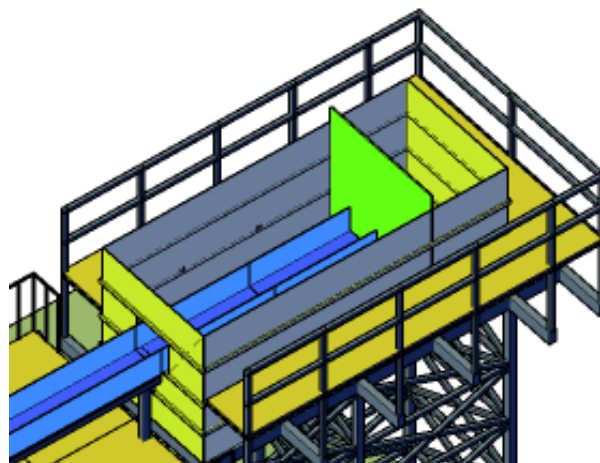


Figura No. 3.7: Vista tridimensional del tanque de abastecimiento y uniformización



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

b) INSTALACIÓN EXPERIMENTAL: RÁPIDA ESCALONADA

A continuación, se describe en resumen las dimensiones más relevantes del canal de aproximación, rápida escalonada y el canal de salida.

i. Canal de aproximación

El canal de aproximación con sección rectangular posee una longitud de 3.40 m en el interior del tanque de abastecimiento y 3.0 m en la parte exterior del mismo, este último es el tramo que se une a la cresta de la rápida escalonada además en su parte final posee una pequeña rampa y hace de sección de control para que el flujo de aproximación hacia la rápida escalonada sea con régimen subcrítico.

Cuadro No. 3.6: Dimensiones geométricas del canal de aproximación

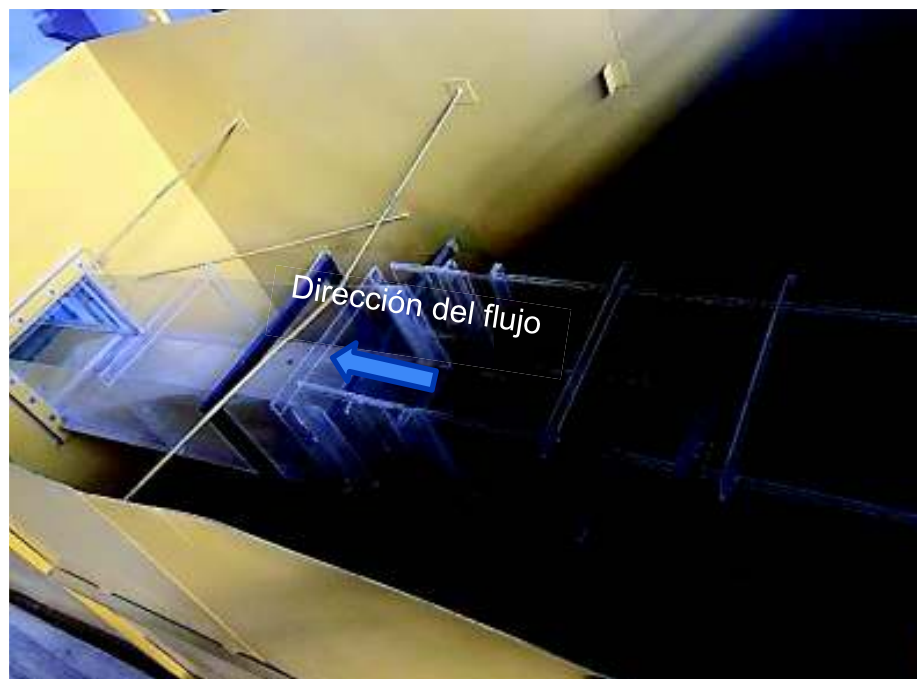
CANAL DE APROXIMACIÓN		
Parámetro	Unidad	Dimensión
Longitud total	m	6.40
Altura de paredes	m	0.40 – 0.60
Pendiente de fondo	%	0.1
Base	m	0.518
Longitud inclinada de la rampa	m	0.25
Longitud vertical de la rampa	m	0.052
Angulo de inclinación de la rampa	°	12

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fotografía No. 3.3: Tramo de aproximación construido en acrílico



Fotografía No. 3.4: Tramo de aproximación en el interior del tanque de abastecimiento



ii. Rápida Escalonada

La rápida escalonada inicia una vez que la rampa del canal de aproximación se une con el primer escalón. Se dispone de 93 escalones, pero a partir del número seis las medidas de huella y contrahuella son de 0.05 m, además de que posee un ángulo de inclinación de 45° con respecto a la horizontal.

Cuadro No. 3.7: Dimensiones geométricas de la rápida escalonada

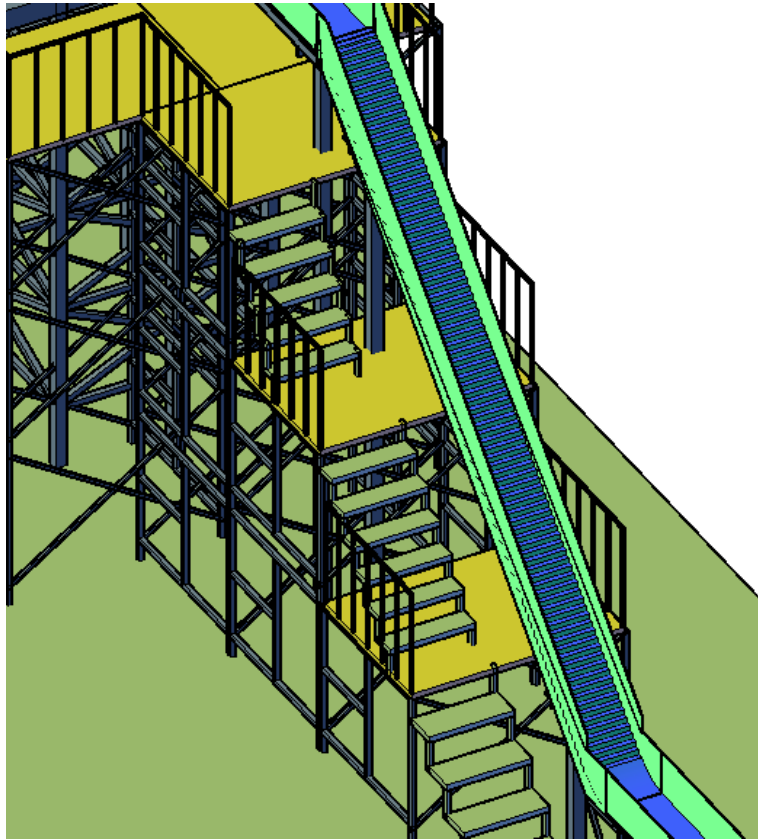
RÁPIDA ESCALONADA			
Parámetro	Unidad	Dimensión	Simbología
Longitud horizontal	m	4.53	Hx
Longitud vertical	m	4.52	Hd
Altura de paredes	m	0.38	h_{pared}
Huella del escalón	m	0.05	l
Contrahuella del escalón	m	0.05	h
Pendiente	°	45	α
Ancho (base)	m	0.518	B

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fotografía No. 3.5: Rápida escalonada construida en acrílico



Figura No. 3.8: Vista tridimensional de la rápida escalonada



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

iii. Canal de salida

Al pie de la rápida escalonada, se ubica un perfil circular de 0.5 m de diámetro y a continuación de este se ubica un canal que permite la salida del flujo hacia el tanque de descarga.

Cuadro No. 3.8: Dimensiones geométricas del canal de salida

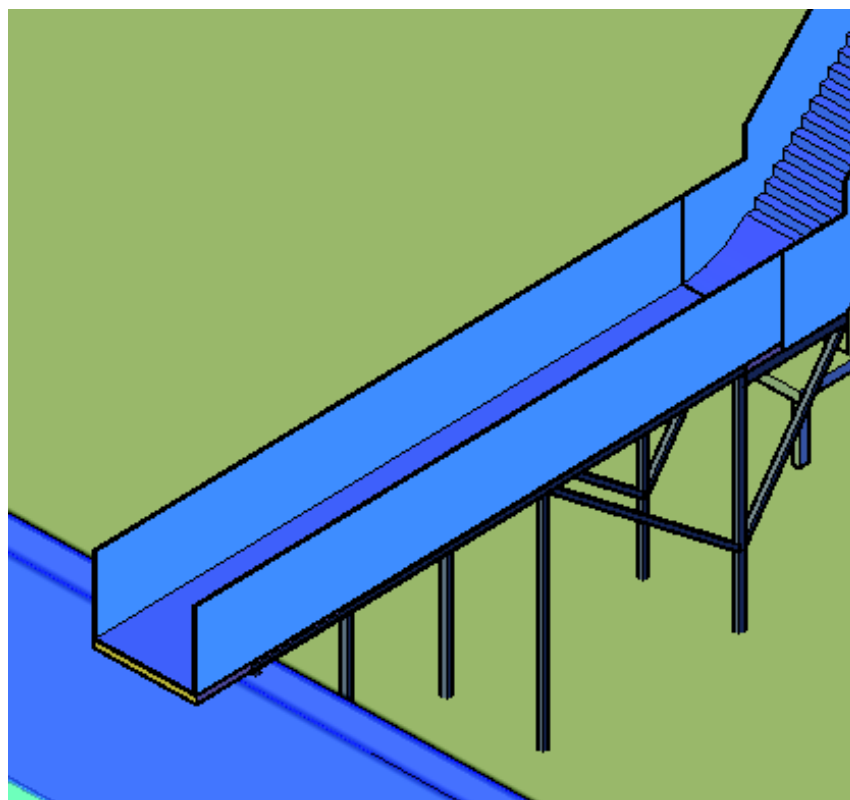
CANAL DE SALIDA		
Parámetro	Unidad	Dimensión
Longitud	m	3.20
Altura de paredes	m	0.40
Pendiente de fondo	%	0.4
Base	m	0.518

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fotografía No. 3.6: Canal de salida construido en acrílico



Figura No. 3.9: Vista tridimensional del canal de salida



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

c) ZONA DE SALIDA

Corresponde al canal de descarga o aforo, como su nombre lo indica tiene dos funciones, la primera es descargar el flujo hacia el canal de recirculación del Laboratorio CIERHI – EPN; su segunda función es medir el caudal que circula por la instalación experimental, mediante lecturas con limnómetros.

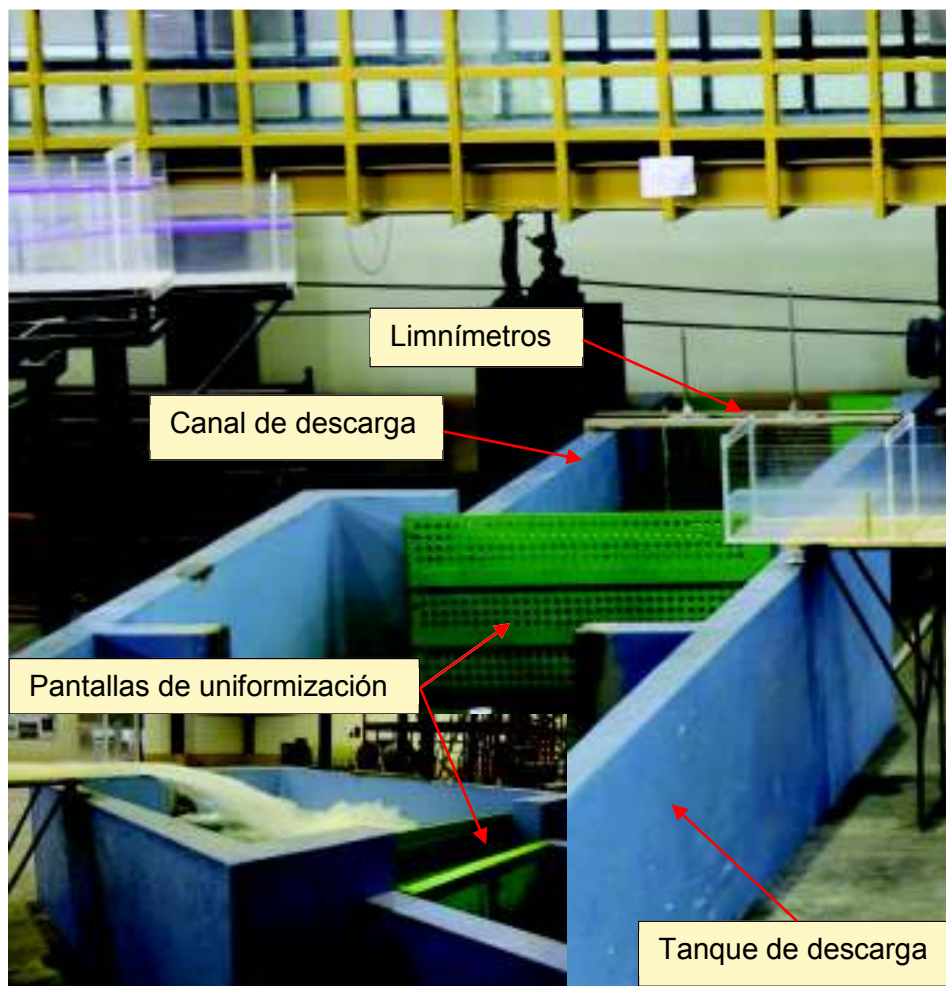
Para obtener las lecturas correctas en los limnómetros, previamente se debe garantizar que el flujo de aproximación a los mismos sea uniforme, esto se logra con la forma que tiene el tanque de descarga, ya que posee un mayor tamaño en la zona de descarga directa del flujo, además se colocan una pantalla de madera con orificios seguida de una malla plástica en donde la sección del tanque se vuelve más pequeña.

Cuadro No. 3.9: Dimensiones geométricas del tanque y canal de descarga

TANQUE Y CANAL DE DESCARGA		
Parámetro	Unidad	Dimensión
Longitud del tanque	m	6.90
Ancho del tanque	m	2.90
Altura de paredes del tanque	m	1.14
Longitud del canal	m	4.90
Ancho del canal	m	1.40
Altura de paredes del canal	m	0.90
Ancho de paredes	m	0.18

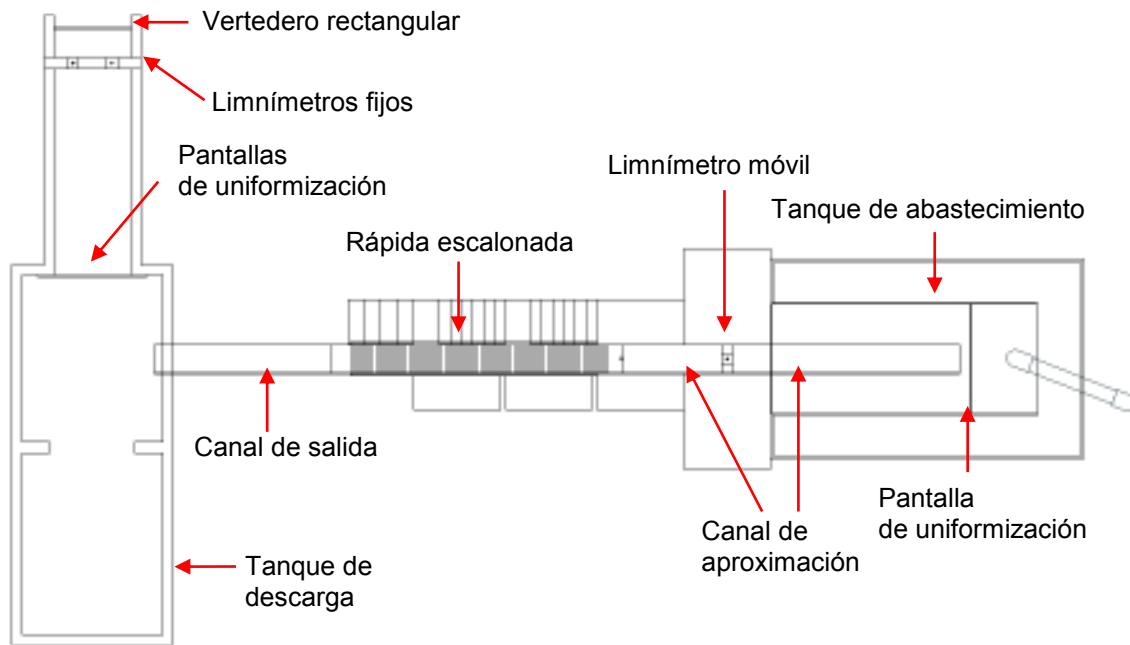
Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Fotografía No. 3.7: Tanque y canal de descarga



A continuación, se muestra en planta todos los componentes de la Instalación Experimental antes descritos.

Figura No. 3.10: Principales componentes de la instalación Experimental de la rápida escalonada



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

3.3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La Instalación Experimental de la rápida escalonada con sus estructuras de ingreso y salida (canal de aproximación y canal de salida), fueron elaborados en acrílico y se apoyaron sobre estructuras conformadas por madera y perfiles metálicos, los demás componentes han sido elaborados con madera u otros materiales adoptados según se dio el caso.

3.3.2.1 DETALLE CONSTRUCTIVO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El proceso constructivo parte de la adaptación de los diseños a una escala que permita la implantación de la instalación en el espacio disponible del Laboratorio CIERHI – EPN.

La construcción de la instalación experimental consistió en la unión de piezas en acrílico que dan forma a la geometría tanto de la rápida escalonada como de sus canales de aproximación y salida, una vez construido cada uno de estos componentes, se procede a colocarlos sobre madera y estructura de acero brindándole de esta manera soporte y rigidez a toda la instalación.

Los materiales con los cuales se realizó la construcción de la instalación experimental son:

- Acrílico: Planchas UG de 6 mm de espesor, con los cuales se construyen las paredes y fondo de los canales y rápida escalonada.
- Acero: Perfiles de acero tipo L (50 x 50 x 2 mm y 100 x 100 x 5 mm), rectangulares (50 x 25 x 3 mm), cuadrados (20 x 20 x 2 mm), para elaboración de la estructura de soporte de la instalación.
- Madera: Planchas de triplex de 18 mm de espesor, tablonés de 40 mm de espesor en la zona de andamios y caminerías.
- Mampostería: Conformada a base de ladrillo, mortero y pintura para la elaboración del tanque de descarga.

En el **Anexo No. 1**, se presenta un resumen cronológico de las fases de construcción de la instalación experimental con diseño original:

3.3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIDA USADOS EN LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

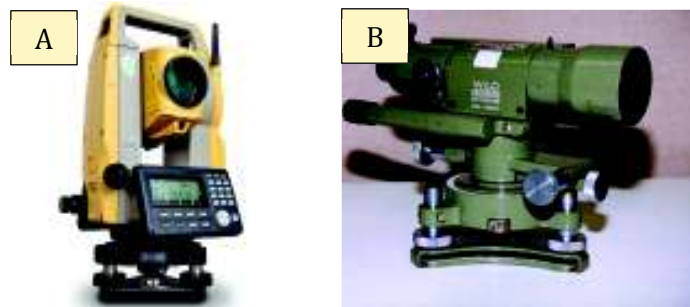
En las fases de construcción y pruebas, es necesario el uso de instrumentos y equipos de medición experimental, a continuación, se detallan los principales instrumentos utilizados:

- Estación total y nivel topográfico
- Vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales
- Limnómetros
- Probetas y envases para aforo
- Reglas graduadas y cintas métricas
- Distanciómetro (láser)

3.3.3.1 ESTACIÓN TOTAL Y NIVEL TOPOGRÁFICO

Los equipos topográficos conformados por la estación total (marca Topcon) y el nivel topográfico (marca Wild Heerbrugg Switzerland) han sido utilizados para el replanteo y montaje de las estructuras de la instalación experimental, así como para la verificación posterior de los ejes, puntos vértices, niveles y pendientes mediante los procedimientos de levantamiento topográfico y nivelación:

Figura No. 3.11: A) Estación total (marca Topcon), B) Nivel topográfico (marca Wild Heerbrugg Switzerland)



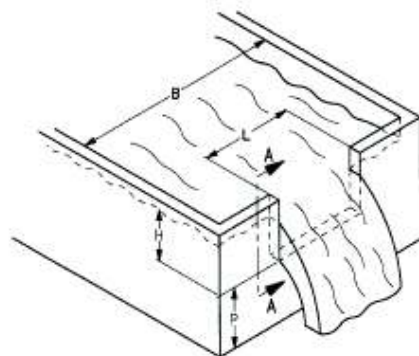
3.3.3.2 VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED DELGADA CON CONTRACCIONES LATERALES

Con el propósito de aforar los caudales en el canal de descarga, se instaló un vertedero rectangular de pared delgada normalizada con contracciones laterales, simétrico con respecto al eje vertical del mismo. La dimensión del vertedero está determinada en función del ancho del canal de descarga y del caudal máximo estimado a circular a través de este. Este dispositivo fue fabricado en madera triplex de 18 mm de espesor, sellado y pintado con laca automotriz. En toda la longitud de la cresta se tiene el bisel normalizado, garantizando así su funcionamiento como vertedero de pared delgada.

NORMAS Y CRITERIOS DE DISEÑO:

La norma base para el diseño y dimensionamiento del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales es: ISO 1438 – ASTM D 5242-92.

Figura No. 3.12: Vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales



Fuente: ASTM (2001).

Las condiciones para vertederos rectangulares totalmente contraídos son las siguientes:

$$\frac{H}{P} \leq 0.5$$

$$\frac{H}{L} \leq 0.5$$

$$0.25 \text{ ft (0.08 m)} \leq H \leq 2.0 \text{ ft (0.6 m)}$$

$$L \geq 1.0 \text{ ft (0.3 m)}$$

$$P \geq 1.0 \text{ ft (0.3 m)}$$

$$\frac{B - L}{2} \geq 2H$$

Condiciones para vertederos rectangulares parcialmente contraídos:

$$\frac{H}{P} \leq 2$$

$$H \geq 0.1 \text{ ft (0.03 m)}$$

$$L \geq 0.5 \text{ ft (0.15 m)}$$

$$P \geq 0.3 \text{ ft (0.1 m)}$$

Dónde:

H: Carga sobre el vertedero

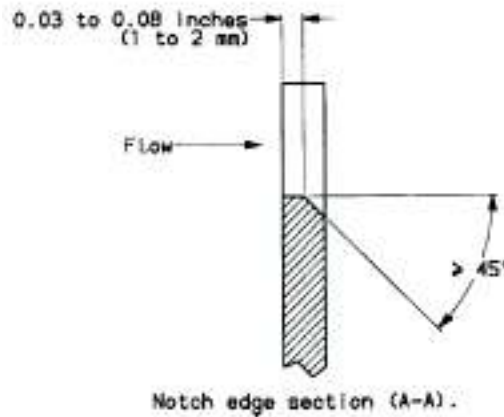
P: Altura de la cresta del vertedero

L: Longitud de la cresta del vertedero

B: Ancho del canal

Si el espesor del material con el cual se hace la pared del vertedero es mayor a 0.08 in (2mm), la sección de desbordamiento debe estar biselada en un ángulo de al menos 45°, como se muestra en la siguiente figura:

Figura No. 3.13: Detalle de la pared del vertedero rectangular



Fuente: ASTM (2001).

El caudal (Q) sobre un vertedero rectangular que cumpla con las condiciones anteriormente mencionadas, se determina mediante la ecuación de Kindsvater–Carter:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right) (2g)^{1/2} C_e L_e (H_e)^{3/2} \quad \text{Ec. (3.29)}$$

Dónde:

g : Aceleración de la gravedad

C_e : Coeficiente de descarga

H_e : Carga efectiva sobre el vertedero

L_e : Longitud efectiva de la cresta del vertedero

$$H_e = H + \delta H \quad \text{Ec. (3.30)}$$

Dónde:

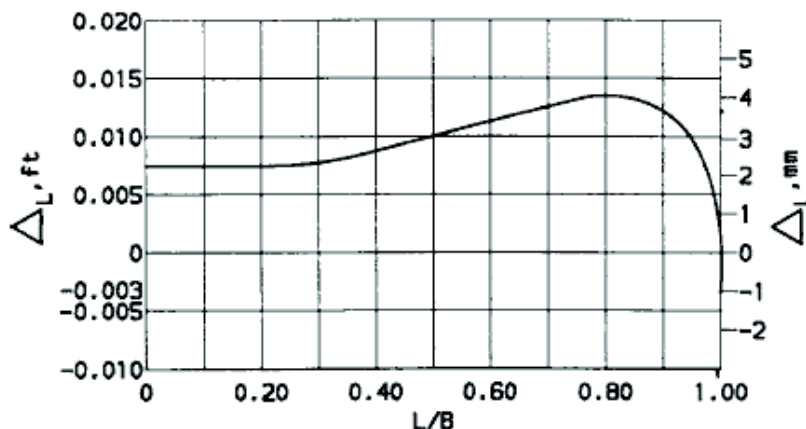
δH : Es un valor determinado experimentalmente 0.003 ft (0.001 m) que se asume para contrarrestar los efectos de viscosidad y tensión superficial, valido para agua que se encuentre a una temperatura de 4 a 30 °C.

$$L_e = L + \delta L \quad \text{Ec. (3.31)}$$

Dónde:

δL = Es un valor en función de la relación que existe entre la longitud de la cresta del vertedero con el ancho del canal (L/B).

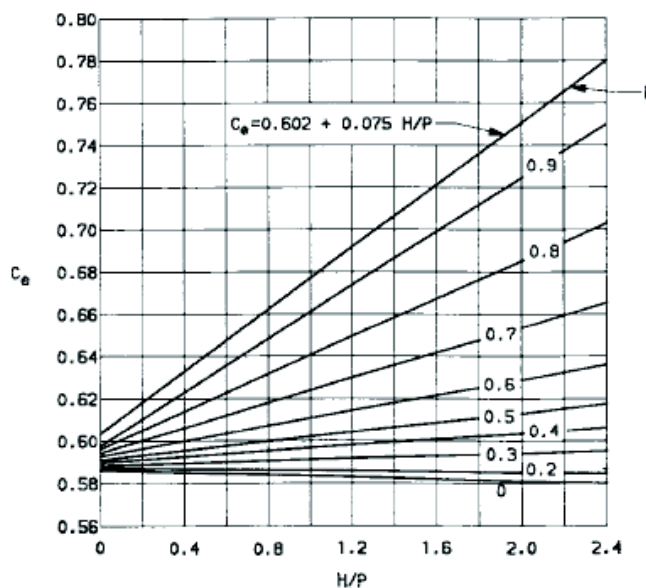
Figura No. 3.14: Valores de δL , para el ajuste de la longitud de la cresta del vertedero



Fuente: ASTM (2001).

El coeficiente de descarga C_e , está dado como una función de la relación que existe entre la longitud de la cresta del vertedero con el ancho del canal (L/B) y la relación que existe entre la carga sobre el vertedero y la altura de la cresta del vertedero (H/P).

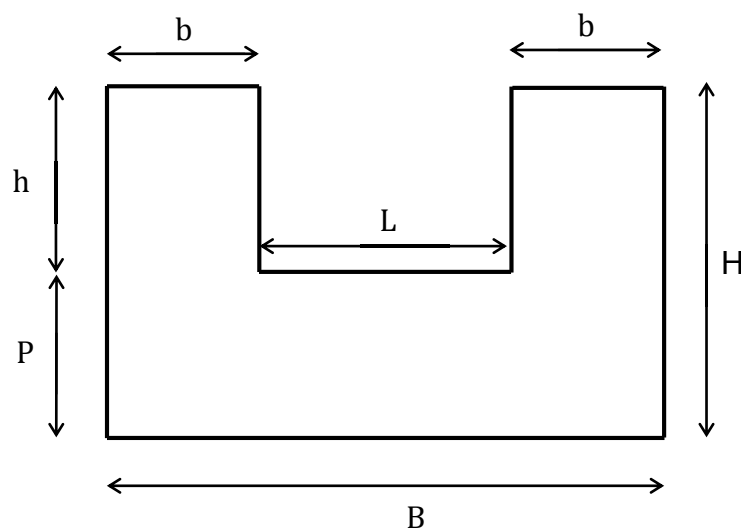
Figura No. 3.15: Coeficientes de descarga para vertederos rectangulares con contracciones laterales



Fuente: ASTM (2001).

El vertedero tiene 0.85 m de altura (H), 1.40 m de ancho (B) y una altura, desde el fondo del canal hasta la cresta del vertedero, de 0.40 m (P), diseñadas para un caudal de 100 l/s.

Figura No. 3.16: Esquema del vertedero rectangular, con sus respectivas dimensiones



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Cuadro No. 3.10: Dimensiones geométricas del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales

Parámetro	Unidad	Dimensión
H	m	0.80
B	m	1.40
L	m	0.60
b	m	0.40
h	m	0.40
P	m	0.40

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

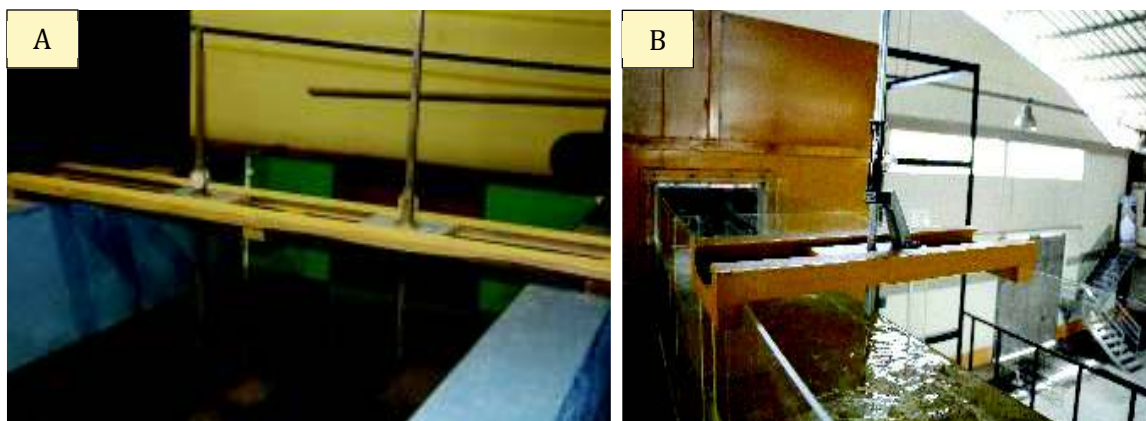
Fotografía No. 3.8: Vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales en funcionamiento



3.3.3.3 LIMNÍMETROS

El instrumento de medida que permite la medición de calado o profundidad de flujo es el limnómetro, en un rango que varía de los 0 y 600 mm, con una precisión de 0.01 mm. En el canal de descarga se ubicaron limnómetros fijos a una distancia mínima de 4 veces la carga máxima de operación del vertedero, medida aguas arriba de la sección de instalación del vertedero en el tramo de flujo uniformizado. Así también, se han instalado un limnómetro móvil de iguales características para medir el calado o altura de agua en el canal de aproximación.

Fotografía No. 3.9: Limnómetros usados en la instalación experimental A) limnómetros fijos en el canal de descarga, B) limnómetro móvil en el canal de aproximación



3.3.3.4 PROBETAS Y ENVASES PARA AFORO

Para obtener la curva de descarga experimental del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones, es necesario aforar volumétricamente los caudales mediante uso de recipientes plásticos calibrados y graduados (10 litros en el caso del recipiente grande), así como probetas para mediciones con mayor precisión (hasta de 1 milímetro).

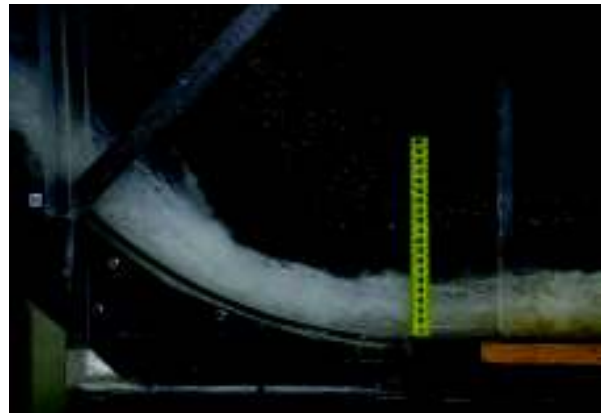
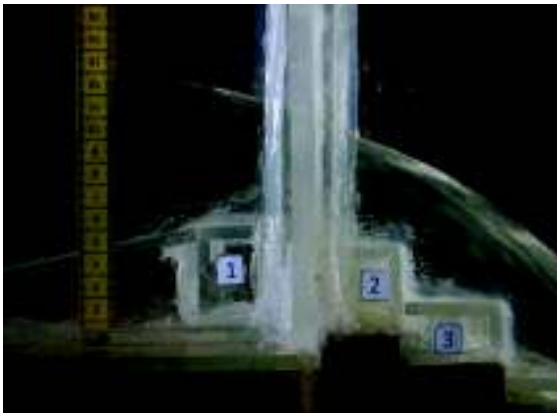
Figura No. 3.17: Probeta graduada de plástico



3.3.3.5 REGLAS GRADUADAS Y CINTAS MÉTRICAS

En aquellos lugares puntuales del modelo donde se requieren mediciones longitudinales, se han ubicado cintas métricas y reglas, con precisión de 1 mm.

Fotografía No. 3.10: Reglas y cintas métricas ubicadas en la instalación experimental



3.3.3.6 DISTANCIÓMETRO LASER

Para facilitar y tener una medida exacta del ancho de los canales y rápida escalonada, se usa este instrumento de alta precisión; calcula las distancias desde la base del dispositivo hasta un punto al que se debe apuntar con el láser que posee el mismo.

Figura No. 3.18: Distanciómetro láser



3.3.4 CALIBRACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

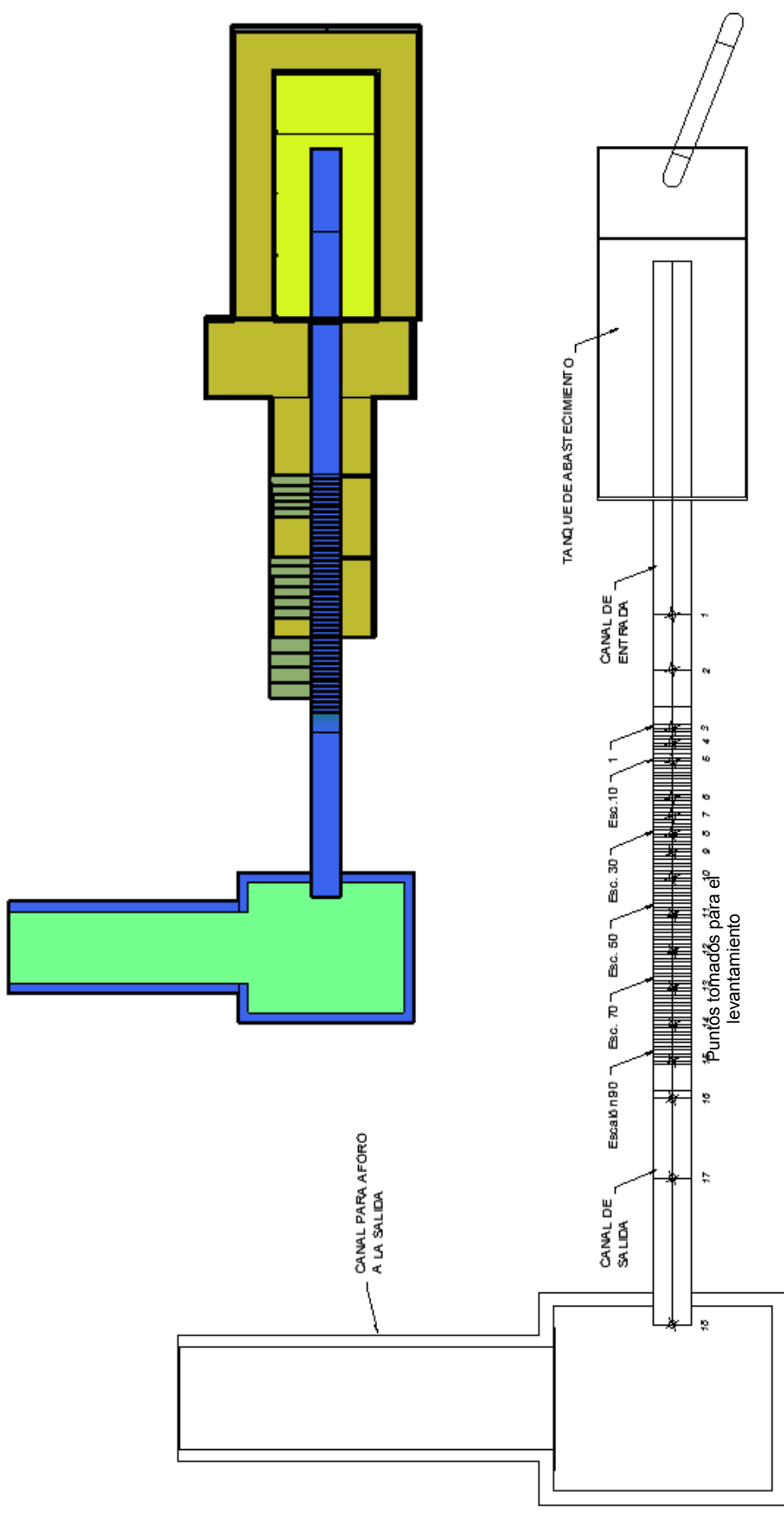
La calibración de la instalación experimental consiste en verificar el cumplimiento de los aspectos geométricos y parámetros hidráulicos con los cuales fue diseñada, previo a la realización de pruebas en la misma, a fin de obtener resultados confiables y comparables con la literatura técnica.

3.3.4.1 CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA

a) CANAL DE APROXIMACIÓN Y SALIDA

Para la misma, se realiza un levantamiento topográfico a detalle de la instalación experimental construida en el Laboratorio CIERHI – EPN, con ayuda de una estación total.

Figura No. 3.20: Esquema de los puntos donde se tomó lecturas con la estación total para elaboración del levantamiento del levantamiento de la Instalación Experimental (Vista en planta)



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los resultados obtenidos del levantamiento tipográfico realizado, se muestran en el **Cuadro No. 3.11**, **Cuadro No. 3.12** y **Cuadro No. 3.13**. De igual manera se describe una comparación de las coordenadas del levantamiento realizado con las coordenadas establecidas en los planos de diseño, previos a la construcción de la Instalación Experimental.

Cuadro No. 3.11: Comparación entre las coordenadas del plano con las coordenadas construidas en la instalación experimental

LEVANTAMIENTO PLANIMÉTRICO										
DESCRIPCIÓN	PUNTO	ESCALÓN	COORDENADAS PLANOS		COORDENADAS INSTALACIÓN EXP.		DESVIACIÓN		DIFERENCIA (%)	
			X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
Canal de Ingreso	1	---	122.354	196.428	122.353	196.430	0.001	-0.002	<1%	<1%
	2	---	121.604	196.428	121.606	196.430	-0.002	-0.002	<1%	<1%
Rápida Escalonada	3	1	120.804	196.428	120.803	196.429	0.001	-0.001	<1%	<1%
	4	5	120.604	196.428	120.604	196.429	0.000	-0.001	-	<1%
	5	10	120.354	196.428	120.355	196.429	-0.001	-0.001	<1%	<1%
	6	20	119.854	196.428	119.855	196.431	-0.001	-0.003	<1%	<1%
	7	25	119.604	196.428	119.605	196.430	-0.001	-0.002	<1%	<1%
	8	30	119.354	196.428	119.356	196.429	-0.002	-0.001	<1%	<1%
	9	35	119.104	196.428	119.107	196.429	-0.003	-0.001	<1%	<1%
	10	42	118.754	196.428	118.757	196.429	-0.003	-0.001	<1%	<1%
	11	52	118.254	196.428	118.257	196.428	-0.003	0.000	<1%	-
	12	62	117.754	196.428	117.756	196.429	-0.002	-0.001	<1%	<1%
	13	72	117.254	196.428	117.256	196.428	-0.002	0.000	<1%	-
	14	82	116.754	196.428	116.753	196.428	0.001	0.000	<1%	-
Canal de Salida	15	92	116.254	196.428	116.255	196.429	-0.001	-0.001	<1%	<1%
	16	---	115.740	196.428	115.737	196.430	0.003	-0.002	<1%	<1%
	17	---	114.650	196.428	114.647	196.430	0.003	-0.002	<1%	<1%
	18	---	112.650	196.428	112.651	196.431	-0.001	-0.003	<1%	<1%

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Cuadro No. 3.12: Comparación entre las cotas medidas en la instalación experimental construida y las cotas establecidas en los planos previos a la construcción

LEVANTAMIENTO ALTIMÉTRICO						
DESCRIPCIÓN	PUNTO	ESCALÓN	NIVELES PLANOS	NIVELES INSTALACIÓN EXP.	DESVIACIÓN	DIFERENCIA (%)
			Z (m)	Z (m)	Z (m)	Z (m)
Canal de Ingreso	19	---	5.8836	5.8836	0.0000	-
	20	---	5.8830	5.8827	0.0003	<1%
	21	---	5.8824	5.8822	0.0002	<1%
	22	---	5.8820	5.8817	0.0003	<1%
	23	---	5.8814	5.8815	-0.0001	-
Rápida Escalonada	24	10	5.5640	5.5670	-0.0030	<1%
	25	25	4.8140	4.8140	0.0000	-
	26	42	3.9640	3.9620	0.0020	<1%
	27	62	2.9640	2.9610	0.0030	<1%
	28	82	1.9640	1.9640	0.0000	-
Canal de Salida	29	---	1.2670	1.2670	0.0000	-
	30	---	1.2622	1.2621	0.0001	<1%
	31	---	1.2540	1.2540	0.0000	-

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Cuadro No. 3.13: Comparación entre el ángulo de la rápida escalonada construida y el ángulo establecido en los planos previos a la construcción

ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA RÁPIDA ESCALONADA								
Escalón N°	Nivel m	Delta h m	Delta L m	Ángulo °	Prom. Planos	Prom. Instalación Exp.	Desviación	Diferencia (%)
10	5.5670	---	---	---	45.00	44.98	0.02	<1%
25	4.8140	0.7530	0.750	45.11				
42	3.9620	---	---	---				
62	2.9610	1.0010	1.001	45.00				
82	1.9640	0.9970	1.003	44.83				

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Cuadro No. 3.14: Comparación entre las pendientes con las cuales se construyeron el canal de aproximación y el canal de salida y las pendientes establecidas en los planos previos a la construcción

PENDIENTES DEL CANAL DE INGRESO Y SALIDA								
Puntos	Delta h		Delta L		Pendiente		Desviación m/m	Diferencia %
	Planos m	Instalación m	Planos m	Instalación m	Planos m/m	Instalación m/m		
19-26	0.0022	0.0021	2.2	2.2	0.00100	0.00095	0.00005	5%
34-33	0.0082	0.0081	2.0	2.0	0.00410	0.00405	0.00005	1%

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Las desviaciones en planta correspondientes a la instalación experimental son mínimas y el error porcentual menor a 1% por lo que se considera despreciable su influencia en el análisis experimental.

b) ESCALONES DE LA RÀPIDA ESCALONADA

La comprobación de las medidas constructivas correspondientes al fondo escalonado se realiza con ayuda de un medidor láser (distanciómetro) y un calibrador, los mismos que se utilizan para medir la longitud del escalón, así como la huella y contrahuella de manera correspondiente.

La longitud de diseño para cada escalón corresponde a 51.8 cm mientras que la longitud constructiva determinada con ayuda del medidor laser o distanciómetro corresponde a 51.79 cm, proyectando valores afines a las dimensiones de diseño. Por otro lado, para verificar tanto las medidas de huella y contrahuella se utiliza un calibrador cuyos resultados no difieren de los previstos en el diseño para huella 5 cm y contrahuella 5 cm.

Fotografía No. 3.11: Longitud, huella y contrahuella del escalón

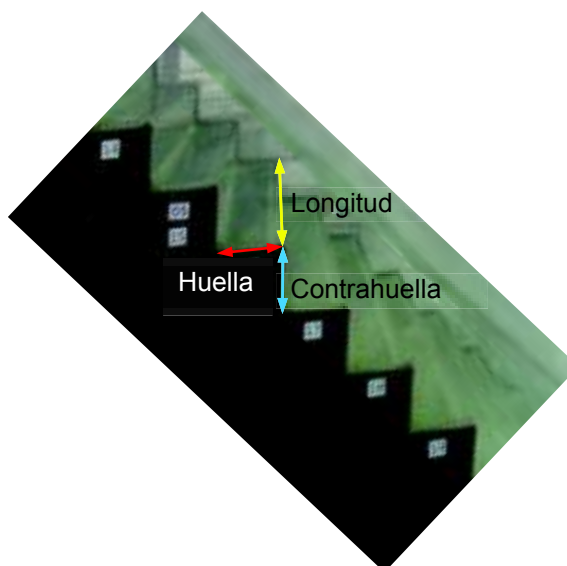
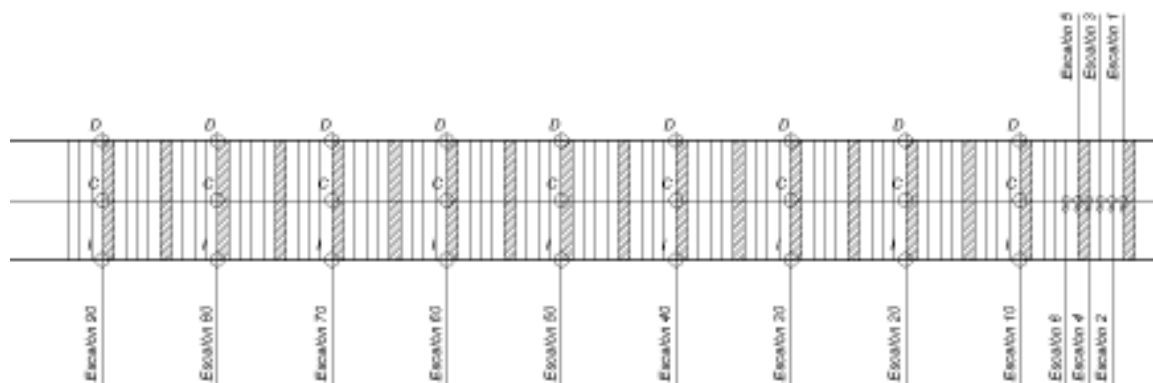


Figura No. 3.21: Esquema de los puntos donde se tomó lecturas con el distanciómetro y calibrador en los escalones de la Instalación Experimental (Vista en planta)



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los datos registrados tanto para el distanciómetro como calibrador se evidencian en el **Anexo No. 2**.

El **Cuadro No. 3.15** y **Cuadro No. 3.16**, se presenta los resultados promedios, obtenidos de las mediciones correspondientes al fondo escalonado, tanto para calibrador como distanciómetro.

Cuadro No. 3.15: Valor promedio de las mediciones de longitud realizadas con distanciómetro al fondo escalonado

MEDICIONES DISTANCIÓMETRO	
Longitud Promedio (cm)	Observación
51,79	Tramo escalonado

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Cuadro No. 3.16: Valores promedios de las mediciones de huella y contrahuella realizadas con calibrador al fondo escalonado

MEDICIONES CALIBRADOR			
Promedio	Der. (cm)	Cent.(cm)	Izq. (cm)
Huella	5,05	4,99	5,03
Contrahuella	5,02	5,00	5,01

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

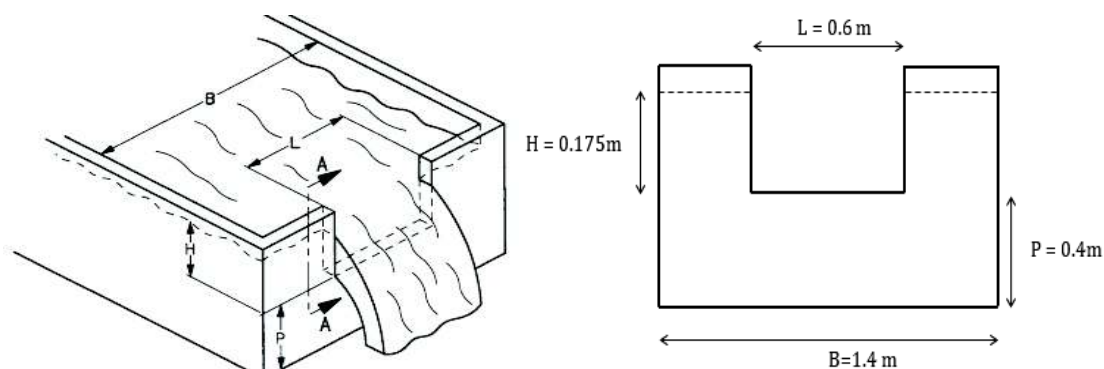
3.3.4.2 CALIBRACIÓN DEL VERTEDERO DE AFORO EN EL CANAL DE SALIDA

El vertedero utilizado en el proceso de aforo en el canal de descarga corresponde a un vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales considerado por su fácil construcción y usos en laboratorio, canales pequeños y corrientes que no lleven escombros y sedimentos.

Este dispositivo ha sido diseñado y dimensionado en base a la norma ISO 1438 – ASTM D5242-92, citada en el literal 3.3.3.2.

Los parámetros considerados en el dimensionamiento corresponden a carga sobre el vertedero (H), altura de cresta (P), ancho del vertedero (L), y ancho del canal (B). Las dimensiones del vertedero han sido seleccionadas, tomando en cuenta el caudal máximo de operación existente en el laboratorio:

Figura No. 3.22: Esquema del vertedero con las dimensiones consideradas para su construcción



Las restricciones que se cumplen para vertederos rectangulares parcialmente contraídos se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro No. 3.17: Restricciones para vertederos rectangulares parcialmente contraídos y verificación de los mismos para las condiciones de diseño

RESTRICCIONES PARA VERTEDEROS RECTANGULARES PARCIALMENTE CONTRAÍDOS				VERIFICACIÓN DE LAS RESTRICCIONES CON LOS PARAMETROS SELECCIONADOS			
H/P	≤	2,00	(m)	H/P	=	0,44	(m)
H	≥	0,03	(m)	H	=	0,17	(m)
L	≥	0,15	(m)	L	=	0,60	(m)
P	≥	0,10	(m)	P	=	0,40	(m)

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Se comprueba que, con las dimensiones de diseño para el vertedero rectangular de pared delgada se cumplen todas las restricciones antes mencionadas, con lo cual es posible aplicar la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} * C_e * L_e * H_e^{3/2} \quad \text{Ec. (3.32)}$$

Dónde:

g: Aceleración de la gravedad

C_e: Coeficiente de descarga

H_e: Carga efectiva sobre el vertedero

L_e: Longitud efectiva de la cresta del vertedero

Siendo la carga efectiva sobre el vertedero (H_e) resultado de la suma de la carga sobre el vertedero más 0.001 m valor asumido para contrarrestar los efectos de viscosidad y tensión superficial, válido para agua de temperatura entre 4 a 30 °C.

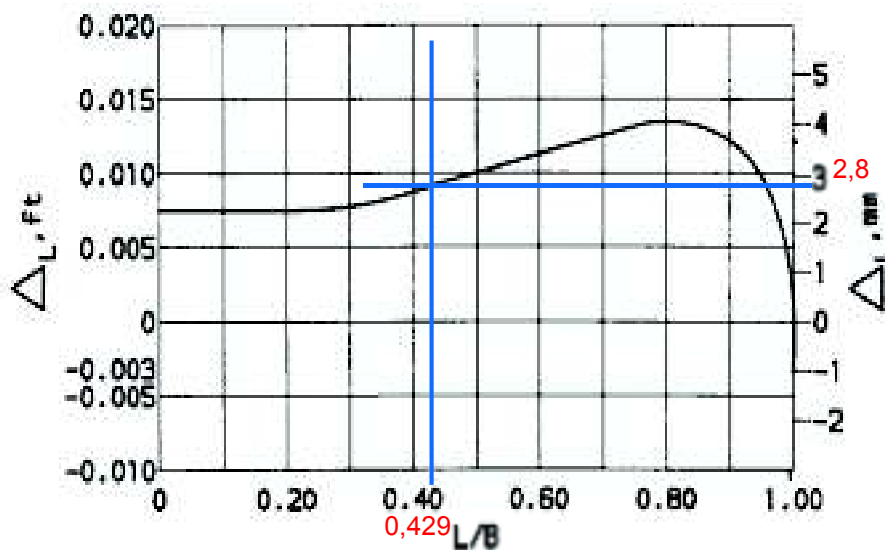
$$H_e = H + \delta H \quad \text{Ec. (3.33)}$$

$$H_e = 0.175 + 0.001$$

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

La longitud efectiva (L_e), determinada por la suma del ancho del vertedero (L) más (δL) cuyo valor está determinado en función de la relación (L/B), a partir del ábaco que se indica en la **Figura No. 3.23**:

Figura No. 3.23: Abaco para encontrar el valor de δL



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Para un valor de $L/B = 0.429$, δL corresponde a 0.0028 m, por lo tanto:

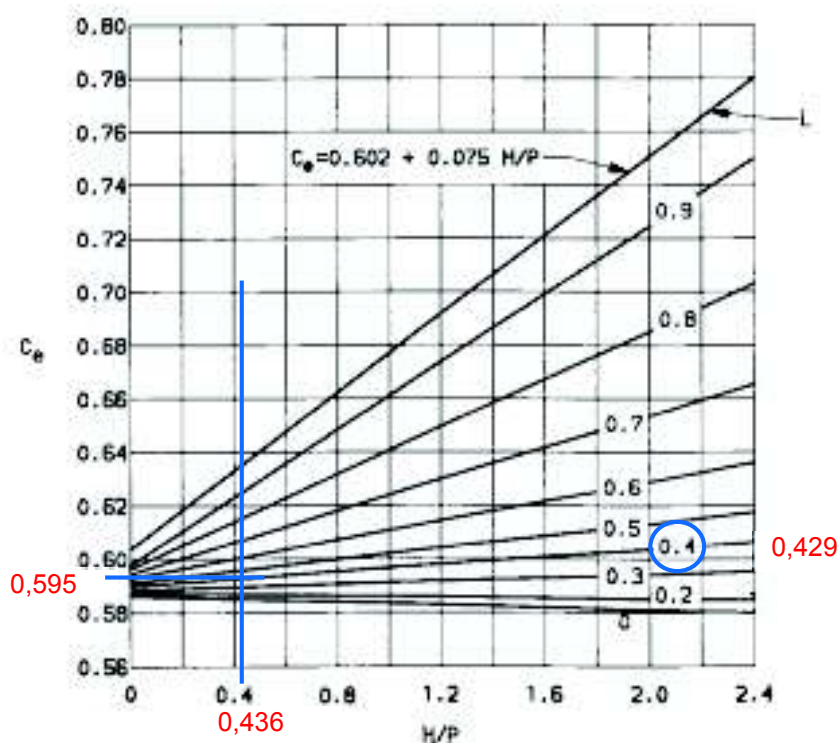
$$L_e = L + \delta L \quad \text{Ec. (3.34)}$$

$$L_e = 0.6 + 0.0028$$

$$L_e = 0.603 \text{ m}$$

El coeficiente de descarga (C_e), se lo determina mediante el uso del ábaco de la **Figura No. 3.24**, el cual relaciona tanto (L/B) y (H/P):

Figura No. 3.24: Abaco para determinar el coeficiente de descarga (C_e)



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Para un valor de $L/B = 0.429$ y $H/P = 0.436$, se obtiene un valor de $C_e = 0.595$, al reemplazar estos valores en la ecuación **Ec. (3.32)**, se obtiene:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2 * 9,81} * 0,595 * 0,603 * (0,176)^{3/2}$$

$$Q = 0,0778 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 77,86 \text{ l/s}$$

Como resultado se obtiene un caudal similar al que se efectuó como caudal máximo de diseño en las respectivas pruebas.

Los cálculos respectivos para la calibración del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales se muestran en el **Anexo No. 3**.

CURVAS DE DESCARGA PARA EL VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED DELGADA CON CONTRACCIONES LATERALES:

La determinación de la curva de descarga experimental para el vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales se realiza midiendo el caudal Q descargado libremente y la carga h correspondiente a la lámina de agua que sale por encima del vertedero, para cada uno de los caudales ensayados.

La medición de los valores de caudal (Q), se realiza mediante un aforo volumétrico que consiste en ir almacenando el caudal descargado por el vertedero en un recipiente plástico de volumen conocido, a la vez, se toma el tiempo que tarda en llenarse el mismo. Este procedimiento que se repite 3 veces para cada uno de los caudales ensayados.

El volumen (V) descargado en los ensayos, se determina con cierta precisión con ayuda de una probeta y el tiempo (t) se mide con un cronometro. El caudal se obtiene al dividir el volumen de agua por el tiempo ($Q = V/t$).

Fotografía No. 3.12: Aforo volumétrico para vertedero rectangular de pared delgada, medición de caudales



Para determinar el nivel de superficie libre en el tramo de aproximación hacia al vertedero rectangular de pared delgada, se usan limnímetros, cuya precisión es de 0.1 mm. Estos limnímetros se ubican en el tanque de descarga ubicado a un metro aguas arriba del vertedero rectangular, alineados con las contracciones del mismo. El valor medido de la carga sobre el vertedero (h) se obtiene mediante la resta del nivel de la superficie libre (h_i) y la altura de la cresta del vertedero (h_o).

Fotografía No. 3.13: Aforo volumétrico para vertedero rectangular de pared delgada, medición de cargas sobre el vertedero



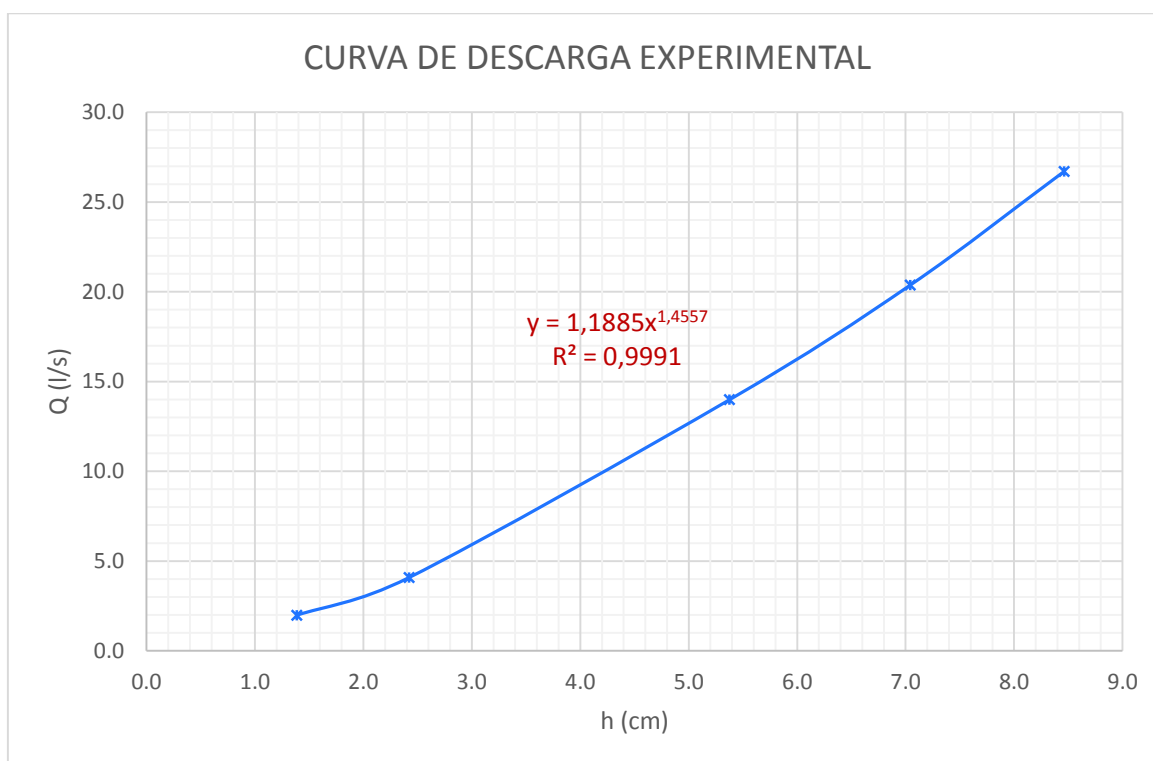
En el **Cuadro No. 3.18**, se describen los datos experimentales obtenidos en el aforo volumétrico tanto para caudales, como para cargas sobre el vertedero. Datos con los cuales se puede elaborar la curva de descarga experimental detallada en el **Gráfico No. 3.1**.

Cuadro No. 3.18: Datos experimentales obtenidos del aforo volumétrico del vertedero rectangular

CAUDAL AFORADO VOLUMÉTRICAMENTE	CARGA SOBRE LA CRESTA DEL VERTEDERO RECTANGULAR						
	LIMNÍMETRO DERECHO			LIMNÍMETRO IZQUIERDO			CARGA
	Q (l/s)	ho (cm)	hi(cm)	h (cm)	ho (cm)	hi(cm)	h (cm)
1,98	37,60	38,97	1,37	28,58	29,98	1,40	1,39
4,08	37,60	40,01	2,41	28,58	31,01	2,43	2,42
13,99	37,60	42,98	5,38	28,58	33,95	5,37	5,38
20,37	37,60	44,63	7,03	28,58	35,63	7,05	7,04
26,71	37,60	46,08	8,48	28,58	37,02	8,44	8,46

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Gráfico No. 3.1: Curva de descarga experimental y ecuación de tendencia obtenidas a partir del aforo volumétrico



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

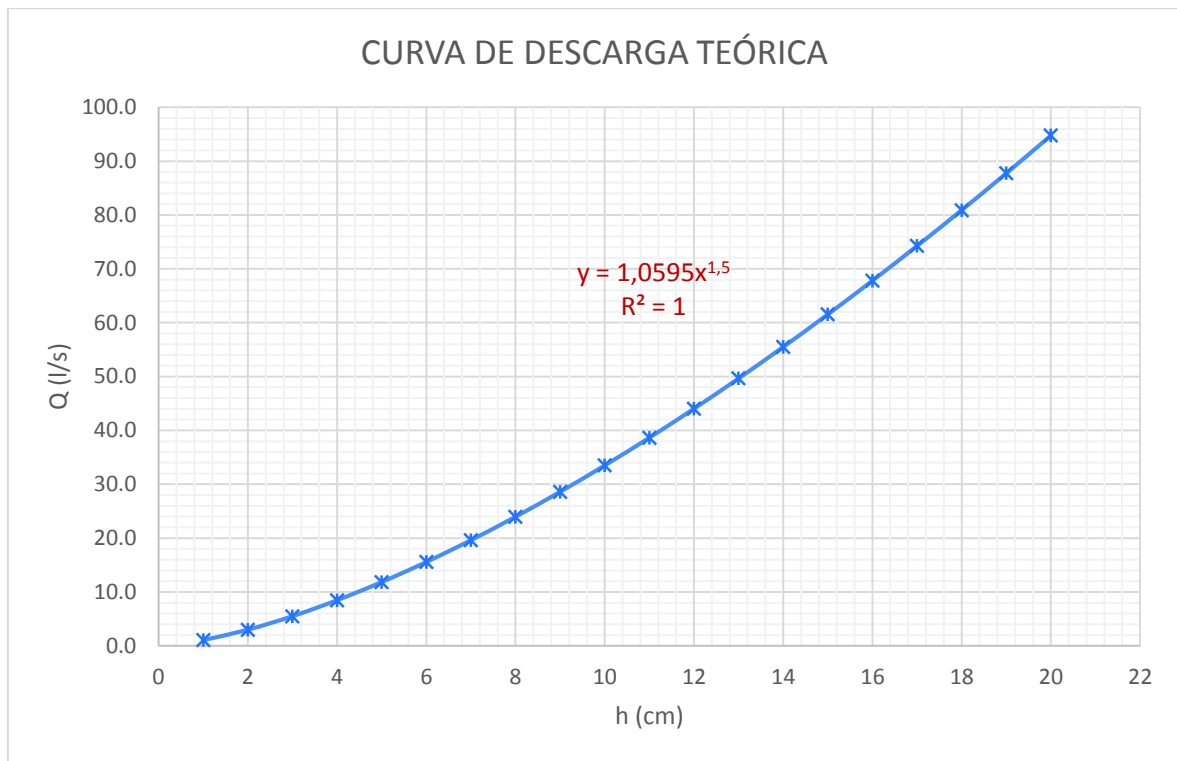
Por lo tanto, la ecuación para la curva de descarga experimental es:

$$Q = 1,1885 * h^{1,4557} \quad \text{Ec. (3.35)}$$

La determinación de la curva de descarga teórica se realiza mediante la ecuación Kindsvater–Carter establecida en la norma ISO 1438 – ASTM D5242-92 para este tipo de vertederos:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} * C_e * L_e * h^{3/2} \quad \text{Ec. (3.36)}$$

Gráfico No. 3.2: Curva de descarga teórica y ecuación de tendencia obtenidas a partir de la ecuación de Kindsvater–Carter

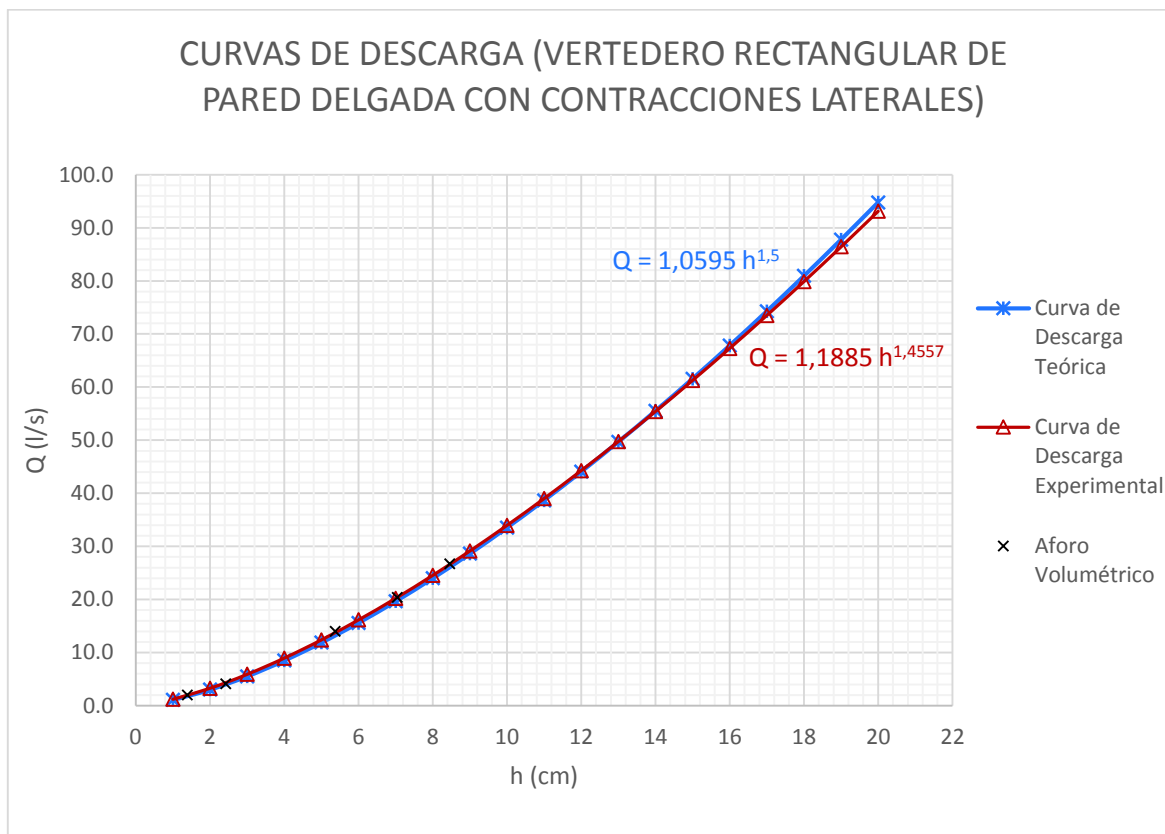


Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Por lo tanto, la ecuación para la curva de descarga teórica es:

$$Q = 1,0595 * h^{1,5} \quad \text{Ec. (3.37)}$$

Gráfico No. 3.3: Comparación entre las curvas de descarga obtenidas a partir de la literatura técnica y datos experimentales para el vertedero rectangular de pared delgada instalado en el canal de descarga



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

En el **Gráfico No. 3.3** se observa que los valores experimentales obtenidos tienen un buen ajuste en comparación con los valores calculados con la ecuación de Kindsvater–Carter. La ecuación de ajuste a los valores experimentales corresponde a $Q = 1,1885 * h^{1.4557}$ con un coeficiente $R^2 = 0,9991$.

En el **Cuadro No. 3.19**, se muestra la variación porcentual entre los caudales obtenidos mediante la ecuación experimental y los caudales que se obtienen con la ecuación a partir de la literatura técnica.

Cuadro No. 3.19: Desviación porcentual entre los valores de caudal obtenidos a partir de las ecuaciones de las curvas de descarga teórica y experimental

No.	CARGA SOBRE EL VERTEDERO	NORMA ISO 1438 – ASTM D5242-92	AFORO VOLUMÉTRICO	RESPECTO A LA NORMA ISO 1438
	h	Q teórico	Q experimental	Desviación
	(cm)	(l/s)	(l/s)	(%)
1	1,39	1,73	1,91	10,56%
2	2,42	3,99	4,31	7,87%
3	5,38	13,21	13,75	4,12%
4	7,04	19,80	20,37	2,88%
5	8,46	26,08	26,61	2,05%

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los caudales determinados con la ecuación experimental y aquellos que se obtienen a partir de la NORMA ISO 1438 – ASTM D5242-92, si se evalúa a los primeros con respecto a la NORMA, se obtiene como resultado un ajuste con menor aproximación en cargas pequeñas sobre el vertedero, pero todo lo contrario ocurre con cargas considerables actuantes sobre el mismo. Por lo tanto, se concluye que la curva de descarga obtenida experimentalmente es adecuada para determinar los caudales en función de las cargas medidas sobre el vertedero rectangular de pared delgada con contrataciones laterales utilizado como aforador en la Instalación Experimental de la rápida escalonada.

Para cálculos posteriores, se utilizará entonces la ecuación **Ec. (3.35)** obtenida a partir de la curva de descarga experimental.

Los cálculos y registros de datos respectivos para la elaboración de las curvas de descarga se encuentran en el **Anexo No. 3**.

3.3.5 PLAN DE PRUEBAS

Previo a establecer el plan de pruebas con él que se realizará los diversos ensayos en la Instalación Experimental, se debe determinar los caudales máximo y mínimo de operación, a fin de elaborar un rango de caudales que permitan realizar un análisis experimental tanto para caudales grandes, intermedios y pequeños. El caudal máximo de operación está determinado por la capacidad del sistema de recirculación del Laboratorio CIERHI, aproximadamente es de 78 l/s. El caudal mínimo de operación se calcula una vez determinada la profundidad crítica mínima para obtener flujo rasante en la rápida escalonada, esta se determina mediante la siguiente expresión (Chanson, 2015):

$$\frac{y_c}{h} = \frac{0.881}{\left(\frac{h}{l} + 0.149\right)^{0.317}} \quad \text{Ec. (3.38)}$$

Dónde:

y_c : Profundidad crítica mínima para obtener flujo rasante (cm)

l : Dimensión de la huella del escalón (cm)

h : Dimensión de la contrahuella del escalón (cm)

Al reemplazar los valores de huella (5 cm) y contrahuella (5 cm) del escalón, se obtiene que la profundidad crítica mínima para obtener flujo rasante es de 4,2 cm. Una vez establecido el valor de y_c , se procede a calcular el caudal mínimo con el cual se obtendrá la condición de flujo rasante durante la operación de la rápida escalonada.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 * g}} \quad \text{Ec. (3.39)}$$

$$Q_{\min} = \sqrt{y_c^3 * B^2 * g} \quad \text{Ec. (3.40)}$$

Dónde:

B : Ancho de la rápida escalonada (m)

g : Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

Reemplazando los valores de profundidad crítica, ancho de la rápida escalonada (51,8 cm) y aceleración de la gravedad, en la ecuación **Ec. (3.40)**, se obtiene como caudal mínimo de operación el siguiente:

$$Q_{\min} = \sqrt{(0,042)^3 * (0,518)^2 * 9,81}$$

$$Q_{\min} = 0,01404 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\min} = 14,04 \text{ l/s}$$

Una vez establecidos el caudal máximo y mínimo de operación de la Instalación Experimental de la Rápida Escalonada, se presenta el plan de pruebas en el **Cuadro No. 3.20**. En el cual como se puede observar se considera un amplio rango de caudales que va desde valores bajos, hasta llegar al caudal de diseño con el que se planteó en un principio como caudal máximo de operación.

Cuadro No. 3.20: Plan de pruebas Diseño Original

PRUEBA No.	CAUDAL EXPERIMENTAL (l/s)	OBSERVACIONES
P0	14.23	Caudal mínimo (para cumplir con la condición de flujo rasante)
P1	23.37	Caudal bajo (Aprox. 30% del caudal de diseño de la instalación experimental)
P2	33.89	Caudal bajo (Aprox. 40% del caudal de diseño de la instalación experimental)
P3	44.44	Caudal intermedio (Aprox. 50% del caudal de diseño de la instalación experimental)
P4	55.82	Caudal alto (Aprox. 70% del caudal de diseño de la instalación experimental)
P5	77.86	Caudal máximo (caudal de diseño de la instalación experimental)

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

3.3.6 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA, EFECTOS DE ESCALA

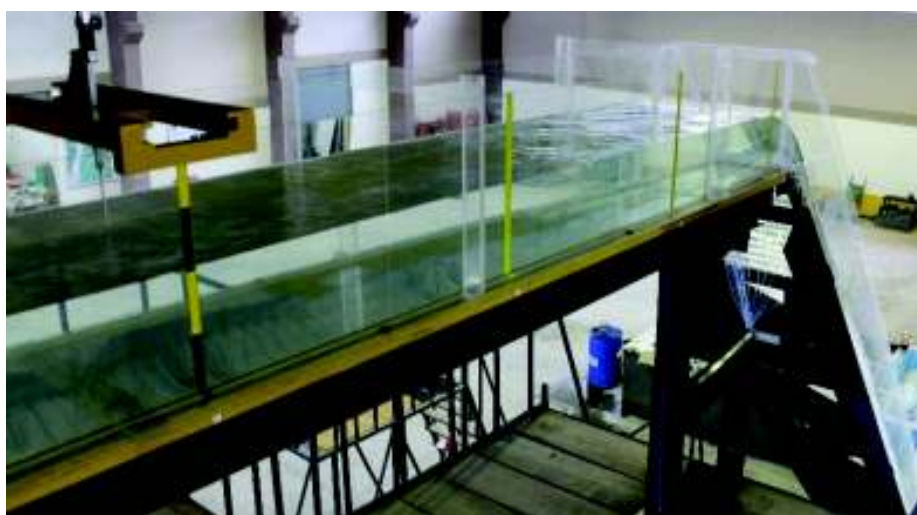
Según la consideración de la similitud dinámica restringida, se debe verificar que los efectos de viscosidad y tensión superficial sean despreciables en la instalación experimental para el criterio de la similitud de Froude en donde la fuerza predominante es la gravedad.

El requerimiento para que el efecto de la viscosidad sea despreciable, consiste en mantener un flujo con turbulencia totalmente desarrollada; es decir, se debe cumplir que $Re > 2 \times 10^4$ (Castro, s.f.), para flujo monofásico (agua) y $Re > 1 \times 10^5$, para flujo bifásico (agua – aire) (Pfister & Chanson, 2013). Para minimizar el efecto de la tensión superficial en los modelos, adicionalmente, la profundidad de agua medida deber ser siempre mayor a 2 cm o 3 cm, para flujo bifásico y $We^{0.5} > 110$, para flujo bifásico (Pfister & Chanson, 2013).

a) CANAL DE APROXIMACIÓN

En los siguientes cuadros se presentan los valores de los parámetros adimensionales Froude, Reynolds y Weber para el canal de aproximación.

Fotografía No. 3.14: Canal de aproximación



Cuadro No. 3.21: Números adimensionales de Froude para el tramo de aproximación

NÚMERO DE FROUDE (F_r)					
PRUEBA	Caudal (Q)	Profundidad (y)	Velocidad (v)	Fr	Régimen
	(l/s)	(cm)	(m/s)	-	-
P0 - DO	14,23	11,0	0,25	0,24	SUBCRÍTICO
P1 - DO	23,37	13,2	0,34	0,30	SUBCRÍTICO
P2 - DO	33,89	15,1	0,43	0,35	SUBCRÍTICO
P3 - DO	44,44	16,6	0,52	0,40	SUBCRÍTICO
P4 - DO	55,82	18,1	0,59	0,45	SUBCRÍTICO
P5 - DO	77,86	20,8	0,72	0,51	SUBCRÍTICO

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los resultados para el número adimensional de Froude obtenidos para cada una de las pruebas son presentados en el **Cuadro No. 3.21**, como se puede observar son valores menores a 1, por lo tanto, se tiene un flujo de aproximación supercrítico.

Para el cálculo del Numero de Froude se usó como longitud característica a la profundidad de agua que se tiene en el canal de aproximación (y) (Canal de sección rectangular).

Cuadro No. 3.22: Números adimensionales de Reynolds para el tramo de aproximación

NÚMERO DE REYNOLDS (R_e)							
PRUEBA	Caudal (Q)	Profundidad (y)	Velocidad (v)	Radio Hidráulico (Rh)	Viscosidad Cinemática (ν)	R_e	$R_e > 2.10^4$
	(l/s)	(cm)	(m/s)	(m)	(m ² /s)	-	-
P0 - DO	14,23	11,0	0,25	0,077	1,007E-06	7,65E+04	CUMPLE
P1 - DO	23,37	13,2	0,34	0,087		1,19E+05	CUMPLE
P2 - DO	33,89	15,1	0,43	0,096		1,64E+05	CUMPLE
P3 - DO	44,44	16,6	0,52	0,101		2,08E+05	CUMPLE
P4 - DO	55,82	18,1	0,59	0,107		2,52E+05	CUMPLE
P5 - DO	77,86	20,8	0,72	0,115		3,31E+05	CUMPLE

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Del cuadro anterior se concluye que, para cada una de las pruebas los resultados obtenidos para el Número de Reynolds son mayores a 2×10^4 lo cual indica, que en todos los casos el comportamiento del flujo en el canal de aproximación se desarrolla en el rango turbulento. Por consiguiente, los efectos de viscosidad son despreciables respecto a aquellos de la inercia y de la gravedad.

El cálculo del Número de Reynolds (R_e) se obtuvo considerando como longitud característica a 4 veces el radio hidráulico de la sección transversal ($L = 4 R_h$).

Cuadro No. 3.23: Números adimensionales de Weber para el tramo de aproximación

NÚMERO DE WEBER (W_e)							
PRUEBA	Caudal (Q)	Profundidad (y)	Velocidad (v)	Radio Hidráulico (Rh)	Densidad (ρ)	Tensión Superficial (σ)	W_e
	(l/s)	(cm)	(m/s)	(m)	(kg/m ³)	(N/m)	-
P0 - DO	14,23	11,0	0,25	0,077	1000	7,36E-02	260,8
P1 - DO	23,37	13,2	0,34	0,087			554,6
P2 - DO	33,89	15,1	0,43	0,096			969,7
P3 - DO	44,44	16,6	0,52	0,101			1467,3
P4 - DO	55,82	18,1	0,59	0,107			2046,1
P5 - DO	77,86	20,8	0,72	0,115			3269,4

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Como se puede observar en el **Cuadro No. 3.23**, las profundidades de agua en el canal de aproximación superan al valor mínimo de profundidad establecido que es de 2 cm con el cual se garantiza que no existan efectos de tensión superficial, sin embargo, se realizó el cálculo de los números de Weber, para comprobar que dichos valores son mayores al número de Weber crítico definido igual a 50, que corresponde al valor del número adimensional de Weber evaluado para una profundidad de agua igual a 2 cm en la Instalación Experimental.

b) RÁPIDA ESCALONADA

En los siguientes cuadros se presentan los valores de los parámetros adimensionales Froude, Reynolds y Weber para la rápida de fondo escalonado.

Fotografía No. 3.15: Rápida de fondo escalonado**Cuadro No. 3.24:** Números adimensionales de Froude para la rápida de fondo escalonado. Región uniforme del flujo rasante.

NÚMERO DE FROUDE (F_r)							
PRUEBA	Caudal	Profundidad aireada al 90%	Concentración media de aire	Profundidad de agua clara	Velocidad	F_r	Régimen
	(Q)	(y_{90})	(C_m)	(y_w)	(v_w)		
	(l/s)	(cm)	-	(cm)	(m/s)	-	-
P0 - DO	14,23	2,9	0,532	1,4	2,02	5,54	SUPERCRÍTICO
P1 - DO	23,37	4,0		1,9	2,41	5,62	SUPERCRÍTICO
P2 - DO	33,89	4,5		2,1	3,11	6,83	SUPERCRÍTICO
P3 - DO	44,44	5,2		2,4	3,52	7,21	SUPERCRÍTICO
P4 - DO	55,82	5,7		2,7	4,04	7,89	SUPERCRÍTICO
P5 - DO	77,86	7,8		3,7	4,12	6,88	SUPERCRÍTICO

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los resultados para el número adimensional de Froude obtenidos para cada una de las pruebas son presentados en el **Cuadro No. 3.24**, como se puede observar son valores mucho mayores a 1, por lo tanto, se tiene un flujo supercrítico sobre el perfil escalonado.

Para el cálculo del Número de Froude se usó como longitud característica a la profundidad de agua clara, obtenida a partir de la profundidad aireada al 90 % en la zona de la rápida escalonada donde el flujo tiene comportamiento uniforme (y_w).

Cuadro No. 3.25: Números adimensionales de Reynolds para la rápida de fondo escalonado

NUMERO DE REYNOLDS (R_e)							
PRUEBA	Caudal	Profundidad	Velocidad	Radio Hidráulico	Viscosidad Cinemática	R_e	$R_e > 1.10^5$
	(Q)	(y_w)	(v_w)	(R_h)	(ν)		
	(l/s)	(cm)	(m/s)	(m)	(m^2/s)	-	-
P0 - DO	14,23	1,4	2,02	0,013	1,007E-06	1,04E+05	CUMPLE
P1 - DO	23,37	1,9	2,41	0,017		1,67E+05	CUMPLE
P2 - DO	33,89	2,1	3,11	0,019		2,40E+05	CUMPLE
P3 - DO	44,44	2,4	3,52	0,022		3,11E+05	CUMPLE
P4 - DO	55,82	2,7	4,04	0,024		3,88E+05	CUMPLE
P5 - DO	77,86	3,7	4,12	0,032		5,23E+05	CUMPLE

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Del cuadro anterior se concluye que, para cada una de las pruebas los resultados obtenidos para el Número de Reynolds son mayores a 1×10^5 lo cual indica, que en todos los casos el comportamiento del flujo en la rápida escalonada se desarrolla en el rango turbulento. Por consiguiente, los efectos de viscosidad son despreciables respecto a aquellos de la inercia y de la gravedad.

El cálculo del Número de Reynolds (R_e) se obtuvo considerando como longitud característica a 4 veces el radio hidráulico de la sección transversal ($L = 4 R_h$).

Cuadro No. 3.26: Números adimensionales de Weber para la rápida escalonada

NUMERO DE WEBER (W_e)									
PRUEBA	Caudal	Profundidad	Velocidad	Radio Hidráulico	Densidad	Tensión Superficial	W_e	$W_e^{0,5}$	$W_e^{0,5} > 110$
	(Q)	(y_w)	(v_w)	(R_h)	(ρ)	(σ)			
	(l/s)	(cm)	(m/s)	(m)	(kg/m^3)	(N/m)	-	-	-
P0 - DO	14,23	1,4	2,02	0,013	1000	7,36E-02	2870,0	53,6	NO CUMPLE
P1 - DO	23,37	1,9	2,41	0,017			5508,0	74,2	NO CUMPLE
P2 - DO	33,89	2,1	3,11	0,019			10210,0	101,0	NO CUMPLE
P3 - DO	44,44	2,4	3,52	0,022			15017,1	122,5	CUMPLE
P4 - DO	55,82	2,7	4,04	0,024			21437,4	146,4	CUMPLE
P5 - DO	77,86	3,7	4,12	0,032			29465,0	171,7	CUMPLE

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los valores presentados en el **Cuadro No. 3.26**, muestran que los valores obtenidos correspondientes al número de Weber, para el rango de valores de caudal que van desde los 14,23 hasta los 33,89 l/s, no se cumple la condición de que $We^{0.5} > 110$.

c) CANAL DE SALIDA

En los siguientes cuadros se presentan los valores de los parámetros adimensionales Froude, Reynolds y Weber para el canal de salida ubicado al pie de la rápida escalonada.

Fotografía No. 3.16: Canal de salida al pie de la rápida escalonada



Cuadro No. 3.27: Números adimensionales de Froude para el canal de salida

NÚMERO DE FROUDE (F_r)							
PRUEBA	Caudal	Profundidad aireada al 90%	Concentración media de aire	Profundidad de agua clara	Velocidad	F_r	Régimen
	(Q)	(y_{90})	(C_m)	(y_w)	(v_w)		
	(l/s)	(cm)	-	(cm)	(m/s)	-	-
P0 - DO	14,23	2,4	0,532	1,1	2,44	7,36	SUPERCRÍTICO
P1 - DO	23,37	3,0		1,4	3,21	8,65	SUPERCRÍTICO
P2 - DO	33,89	3,2		1,5	4,37	11,39	SUPERCRÍTICO
P3 - DO	44,44	4,0		1,9	4,58	10,69	SUPERCRÍTICO
P4 - DO	55,82	4,5		2,1	5,11	11,25	SUPERCRÍTICO
P5 - DO	77,86	5,7		2,7	5,63	11,01	SUPERCRÍTICO

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los resultados para el número adimensional de Froude obtenidos para cada una de las pruebas son presentados en el **Cuadro No. 3.27**, como se puede observar son valores mucho mayores a 1, por lo tanto, se tiene un flujo supercrítico sobre el canal de salida al pie de la rápida escalonada.

Para el cálculo del Número de Froude se usó como longitud característica a la profundidad de agua clara, obtenida a partir de la profundidad aireada al 90 % en la zona del canal de salida (y_w).

Cuadro No. 3.28: Números adimensionales de Reynolds para el canal de salida

NUMERO DE REYNOLDS (R_e)							
PRUEBA	Caudal	Profundidad	Velocidad	Radio Hidráulico	Viscosidad Cinemática	R_e	$R_e > 1.10^5$
	(Q)	(y_w)	(v_w)	(R_h)	(ν)		
	(l/s)	(cm)	(m/s)	(m)	(m ² /s)	-	-
P0 - DO	14,23	1,1	2,44	0,011	1,007E-06	1,05E+05	CUMPLE
P1 - DO	23,37	1,4	3,21	0,013		1,70E+05	CUMPLE
P2 - DO	33,89	1,5	4,37	0,014		2,46E+05	CUMPLE
P3 - DO	44,44	1,9	4,58	0,017		3,18E+05	CUMPLE
P4 - DO	55,82	2,1	5,11	0,019		3,96E+05	CUMPLE
P5 - DO	77,86	2,7	5,63	0,024		5,41E+05	CUMPLE

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Del cuadro anterior se concluye que, para cada una de las pruebas los resultados obtenidos para el Número de Reynolds son mayores a 1×10^5 lo cual indica, que en todos los casos el comportamiento del flujo en el canal de salida se desarrolla en el rango turbulento. Por consiguiente, los efectos de viscosidad son despreciables respecto a aquellos de la inercia y de la gravedad.

El cálculo del Número de Reynolds (R_e) se obtuvo considerando como longitud característica a 4 veces el radio hidráulico de la sección transversal ($L = 4 R_h$).

Cuadro No. 3.29: Números adimensionales de Weber para el canal de salida

NUMERO DE WEBER (W_e)									
PRUEBA	Caudal	Profundidad	Velocidad	Radio Hidráulico	Densidad	Tensión Superficial	W_e	$W_e^{0,5}$	$W_e^{0,5} > 110$
	(Q)	(y_w)	(v_w)	(R_h)	(ρ)	(σ)			
	(l/s)	(cm)	(m/s)	(m)	(kg/m ³)	(N/m)	-	-	-
P0 – DO	14,23	1,1	2,44	0,011	1000	7,36E-02	3498,0	59,1	NO CUMPLE
P1 – DO	23,37	1,4	3,21	0,013			7470,0	86,4	NO CUMPLE
P2 – DO	33,89	1,5	4,37	0,014			14676,8	121,1	CUMPLE
P3 – DO	44,44	1,9	4,58	0,017			19917,2	141,1	CUMPLE
P4 – DO	55,82	2,1	5,11	0,019			27698,8	166,4	CUMPLE
P5 – DO	77,86	2,7	5,63	0,024			41708,2	204,2	CUMPLE

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los valores presentados en el **Cuadro No. 3.29**, muestran que los resultados obtenidos correspondientes al número de Weber, para el rango de valores de caudal que van desde los 14,23 hasta los 23,37 l/s, no se cumple la condición de que $W_e^{0,5} > 110$.

3.4 CONCLUSIONES

- El fenómeno del comportamiento del flujo en la Instalación Experimental de la rápida escalonada, esencialmente está condicionado por los efectos de la gravedad, siendo de esta manera la fuerza predominante con respecto a las fuerzas de viscosidad, tensión superficial, entre otras. Razón por la cual, la presente investigación se basa en la aplicación de la Similitud Dinámica Restringida de Froude con la cual se deben cumplir los criterios de igualdad entre los números de Froude y los factores de fricción tanto en modelo, como en prototipo. Así también se debe demostrar que los efectos de las fuerzas viscosas y de tensión superficial son despreciables con respecto a las fuerzas de gravedad y de inercia.
- Se ha realizado la calibración geométrica mediante la realización de un levantamiento topográfico a detalle de cada uno de los componentes de la Instalación Experimental, obteniendo como resultado en cuanto al levantamiento topográfico desviaciones menores al 1% con respecto a las coordenadas establecidas de implantación.

- En lo que respecta a la rápida escalonada, para su calibración geométrica se realizó mediciones de las dimensiones de los escalones con calibrador y para el ancho de la rápida se usó distanciómetro laser, obteniendo como resultado un valor de huella del escalón de 5,02 cm, contrahuella del escalón 5,01 cm y ancho de rápida escalonada 51,79 cm. Si los comparamos con los valores establecidos previos a su construcción, se observa que no existe una desviación significativa en los mismos. ya que se planteó que tanto huella como contrahuella del escalón midan 5,00 cm y el ancho de la rápida escalonada sea de 51,8 cm.
- Como parte del proceso de calibración de la Instalación Experimental, se ha obtenido la curva de descarga experimental para el vertedero de aforo, esta corresponde al vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales colocado al final del canal de descarga, la expresión obtenida para el mismo fue: $Q = 1,1885 * h^{1,4557}$ con un coeficiente $R^2 = 0,9991$.
- El caudal mínimo determinado experimentalmente para el cual se generan las condiciones de flujo rasante sobre la rápida escalonada es 14,23 l/s, este valor difiere en 1,3% con respecto al valor definido teóricamente que fue de 14,04 l/s. Se observó de igual manera que para caudales menores al establecido experimentalmente, en la rápida escalonada comienza a desarrollar un flujo con diferentes características al flujo rasante, conocido como flujo transitorio, este tipo de flujo no es objeto de la presente investigación por lo cual no se establece en el plan de pruebas valores de caudal menores a 14,23 l/s.
- Una de las condiciones de diseño de la Instalación Experimental es que en el canal de aproximación el flujo sea subcrítico, antes del vertido por la rápida escalonada. Al obtenerse números de Froude menores a 1, se verifica que para todo el rango de caudales de operación el flujo de aproximación a la rápida escalonada es precisamente subcrítico.

- Se verifica la Similitud Restringida de Froude: (i) Al obtener valores de números de Reynolds que superan la condición de 2×10^4 para flujo monofásico (agua), presente en canal de aproximación; con la presencia de flujo bifásico (agua – aire) se observa que tanto para la rápida escalonada y canal de salida, los números de Reynolds superan la condición de ser mayores a 1×10^5 . Por lo tanto, los efectos de la viscosidad son despreciables con respecto aquellos de la inercia y la gravedad. (ii) En lo que respecta a los efectos de tensión superficial, para el flujo monofásico (agua) presente en el canal de aproximación, estos pueden despreciarse debido a que en todo el rango de caudales de operación, se obtienen valores de profundidad de agua mayores a los 2 cm; sin embargo para el flujo bifásico (agua – aire) presente en la rápida escalonada y canal de salida debe cumplirse la condición de $We^{0.5} > 110$; para caudales de operación medios y bajos, tanto en la rápida escalonada como en el canal de salida no se cumple dicha condición teniendo de esta manera una ligera incidencia de la tensión superficial.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS EXPERIMENTAL: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del plan de pruebas propuesto para la operación de la rápida escalonada con diseño original y se plantea una modificación al diseño original (tabiques triangulares colocados a lo largo de todo el perfil escalonado) a fin de efectuar un análisis y comparación de los resultados experimentales sobre la disipación de energía entre los dos diseños.

4.1 INTRODUCCIÓN

Como parte del presente trabajo de titulación, previo a la presentación de los resultados experimentales se realiza un análisis de la descripción del comportamiento hidráulico del flujo para cada uno de los caudales de operación. Este análisis nos permite determinar patrones de comportamiento del flujo, a la vez proporciona datos de mediciones de profundidades con las cuales se procede a realizar un procesamiento de datos y de esta manera se determinan la concentración media de aire, porcentaje de disipación de energía y factor de fricción del flujo rasante sobre la rápida escalonada.

Una vez finalizado el análisis experimental y obtención de los resultados con diseño original, se plantea una propuesta de modificación al diseño original de la rápida escalonada, con el cual de igual manera se realiza el respectivo análisis experimental, obtención y presentación de resultados.

Con el objetivo de evaluar la disipación de energía en la rápida escalonada, se comparan los resultados obtenidos a partir del diseño original y diseño modificado. De esta manera se establece el diseño más óptimo, es decir, el que tenga un porcentaje de disipación de energía mayor para el rango de caudales evaluados.

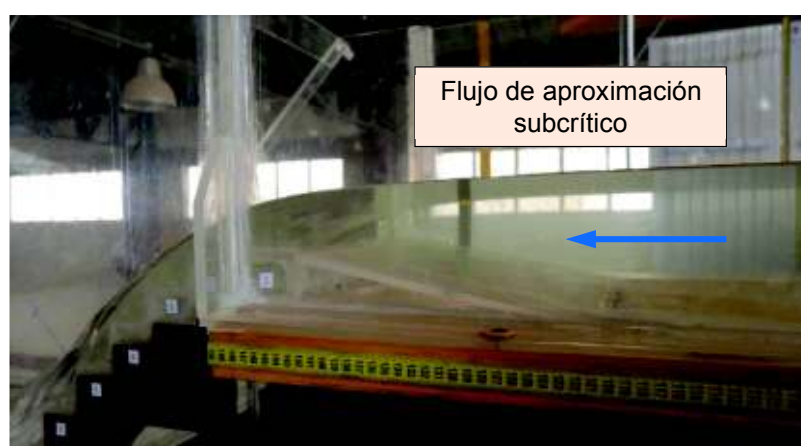
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS: DISEÑO ORIGINAL

4.2.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL FLUJO

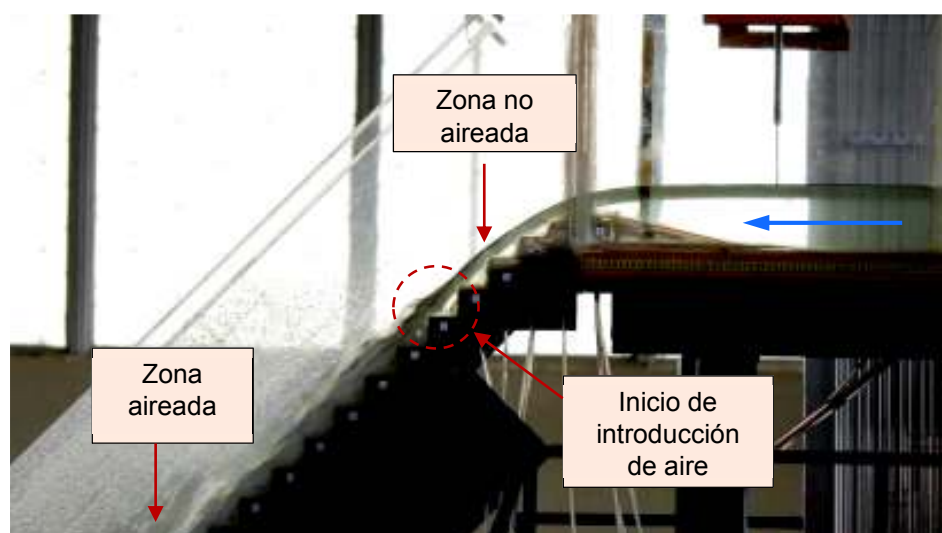
En las siguientes fotografías se observan las principales características del comportamiento del flujo, para el plan de pruebas propuesto en el literal 3.3.5.

a) PRUEBA PO: $Q = 14.23$ l/s

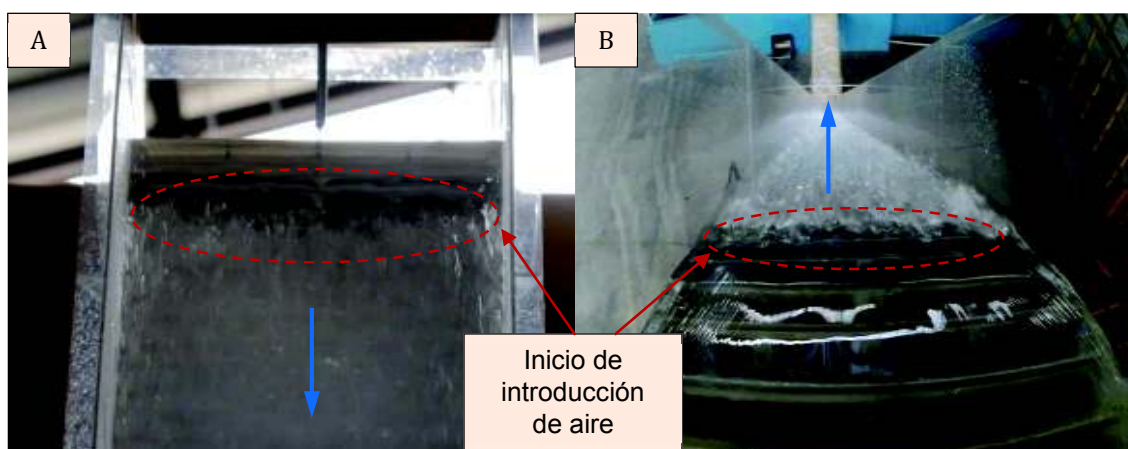
Fotografía No. 4.1: Prueba 0. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada.



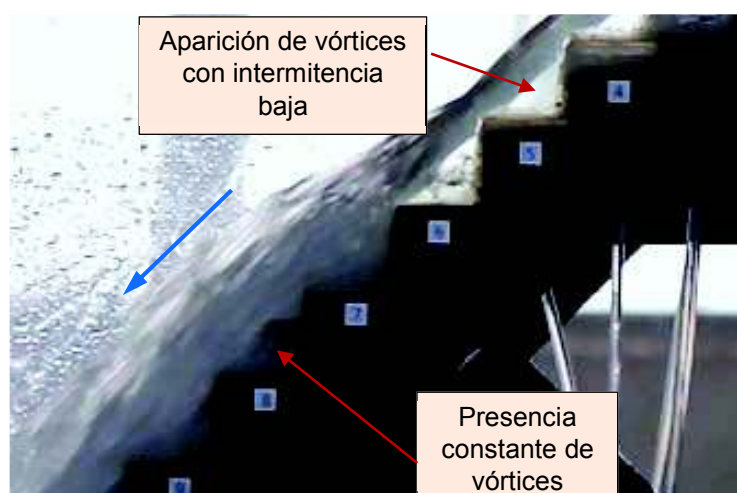
Fotografía No. 4.2: Prueba 0. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



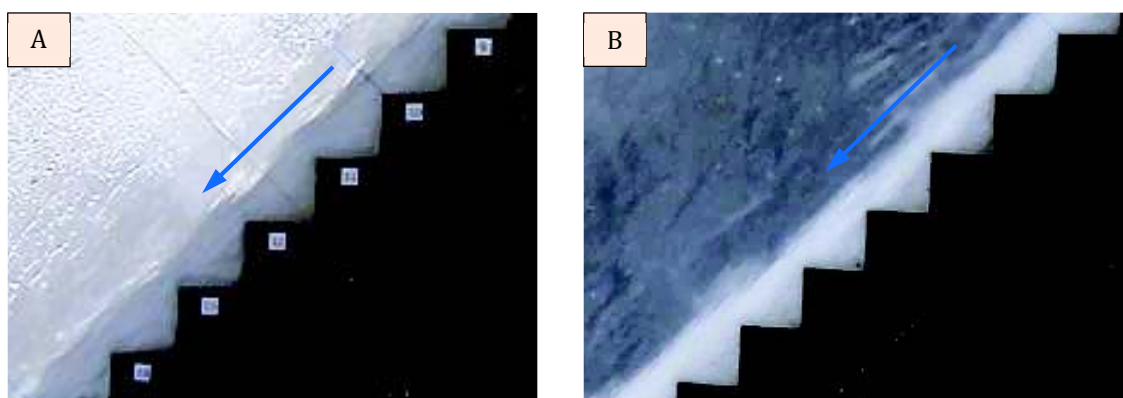
Fotografía No. 4.3: Prueba 0. (A) Vista frontal y (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada



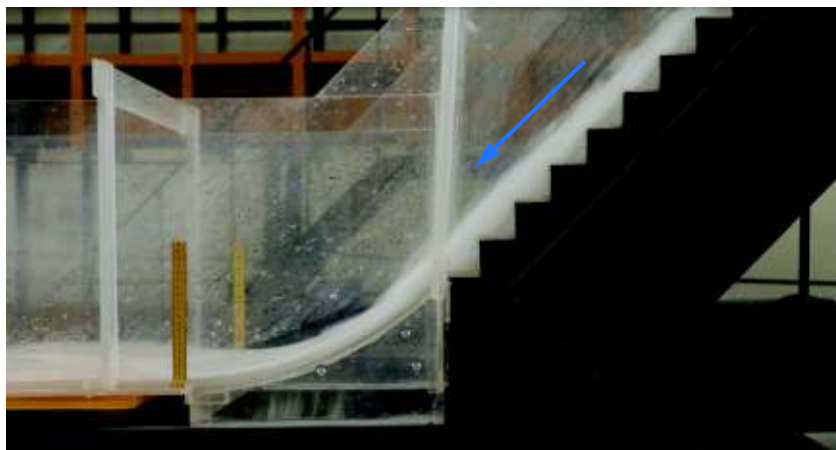
Fotografía No. 4.4: Prueba 0. Vista lateral izquierda. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.5: Prueba 0. Vista lateral izquierda. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.6: Prueba 0. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida



Observaciones:

- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,24. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 11 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.1**.
- **Escalón No. 5:** Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón. Ver **Fotografía No. 4.2** y **Fotografía No. 4.4**.
- **Escalón No. 6:** Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo descende por la rápida escalonada. La capa límite se interseca con la superficie libre del flujo y se observa una formación constante de vórtices en las cavidades de los escalones desde este escalón hacia aguas abajo. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 1,9$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,36$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.3**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia de 5,59 m, medido desde la cresta de la rápida y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado con una concentración de aire aproximadamente del 90%. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 2,9$ cm. Ver **Fotografía No. 4.5**.

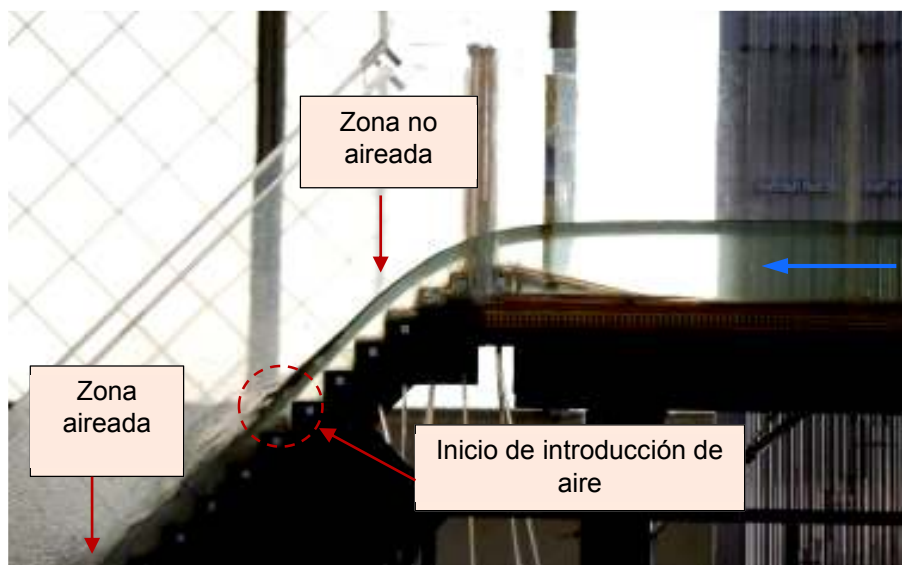
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 2,4$ cm. Ver **Fotografía No. 4.6**.

b) PRUEBA P1: $Q = 23.37$ l/s

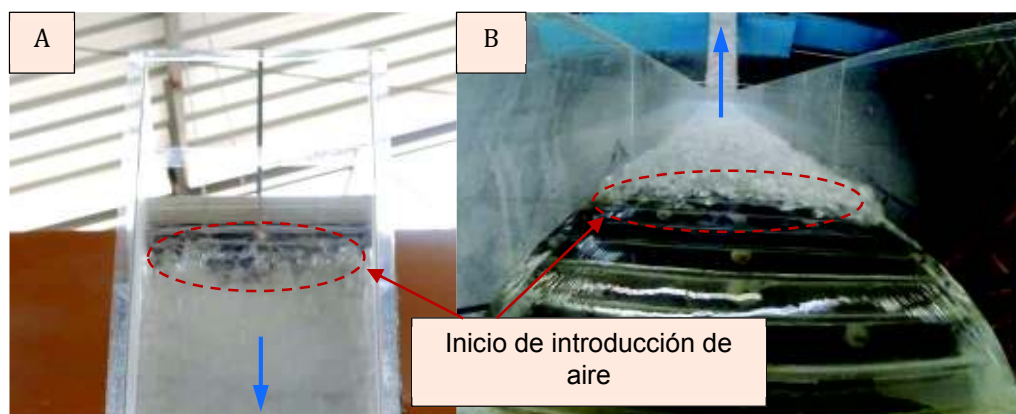
Fotografía No. 4.7: Prueba 1. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



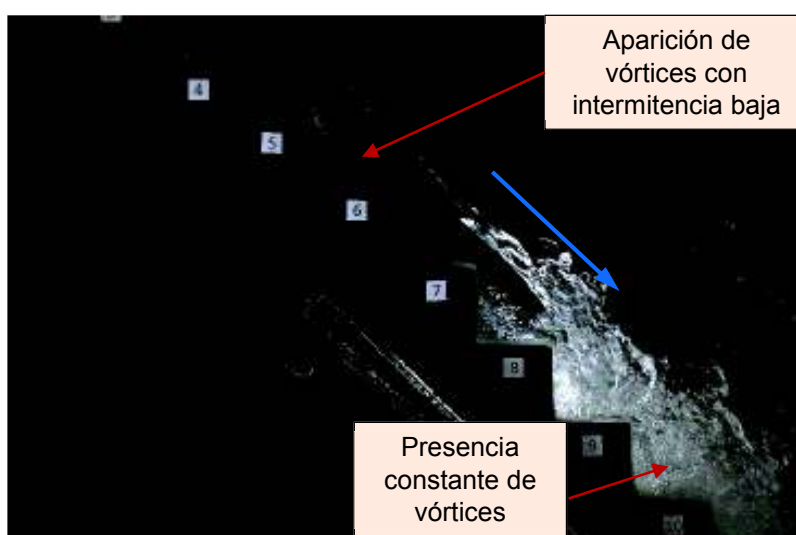
Fotografía No. 4.8: Prueba 1. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



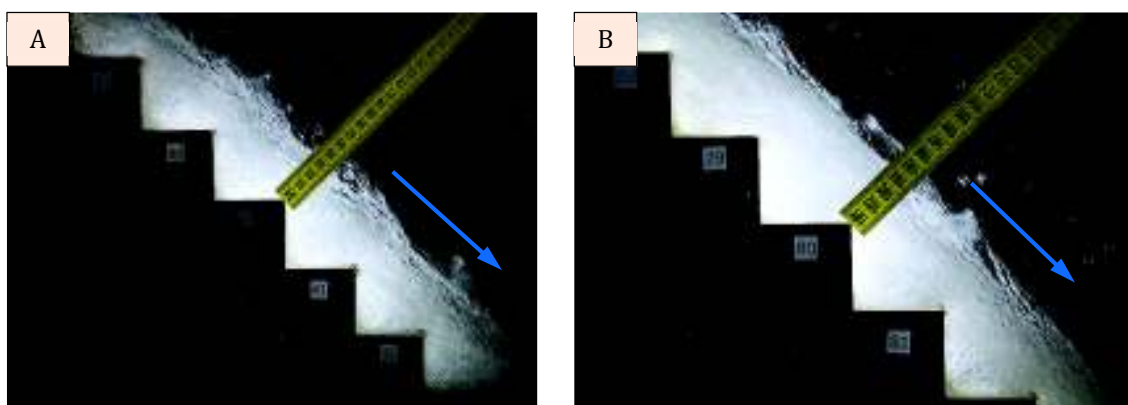
Fotografía No. 4.9: Prueba 1. (A) Vista frontal y (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada



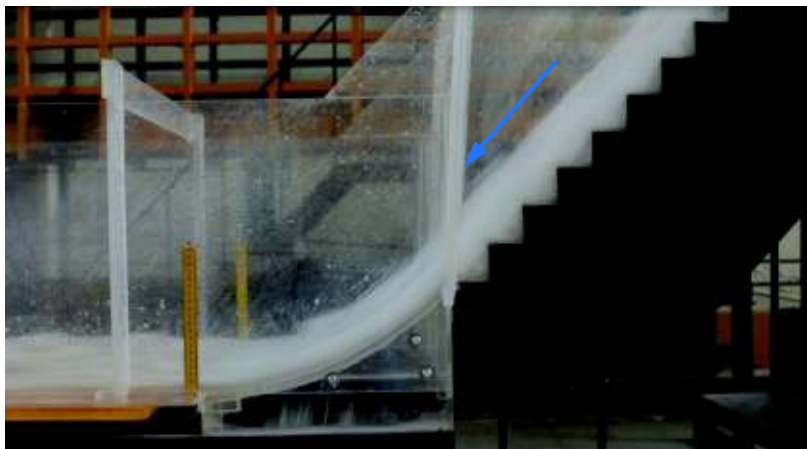
Fotografía No. 4.10: Prueba 1. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.11: Prueba 1. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.12: Prueba 1. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida



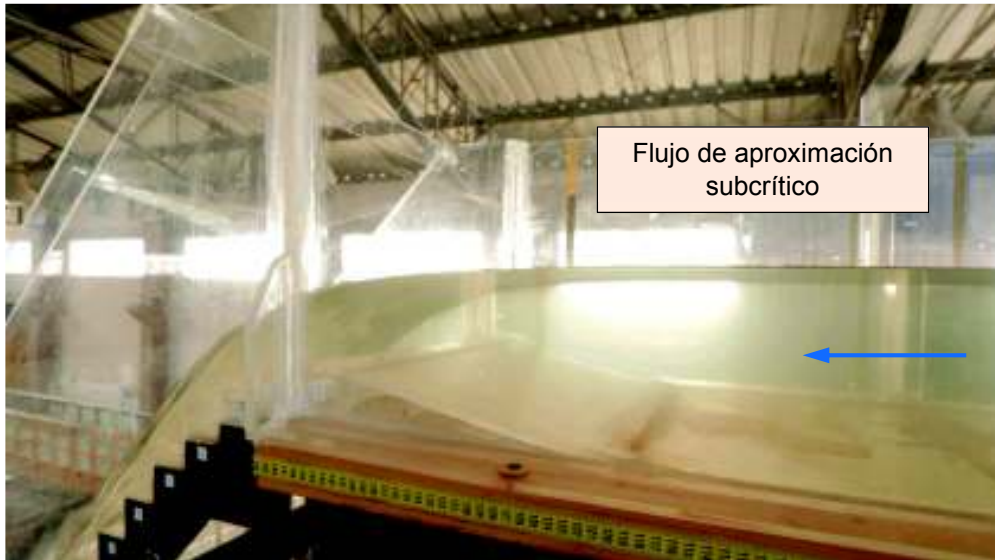
Observaciones:

- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,30. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 13,2 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.7**.
- **Escalón No. 6.** Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, se produce el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón y va en aumento hacia aguas abajo. Ver **Fotografía No. 4.8** y **Fotografía No. 4.10**.
- **Escalón No. 7:** Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. La capa límite se interseca con la superficie libre del flujo y se observa una formación constante de vórtices en las cavidades de los escalones desde este escalón hacia aguas abajo. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 3,3$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,43$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.9**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia de 5,59 m, medido desde la cresta de la rápida y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado con una concentración de aire aproximadamente del 90%. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 4,0$ cm. Ver **Fotografía No. 4.11**.

- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 3,0$ cm. Ver **Fotografía No. 4.12**.

c) **PRUEBA P2: $Q = 33.89$ l/s**

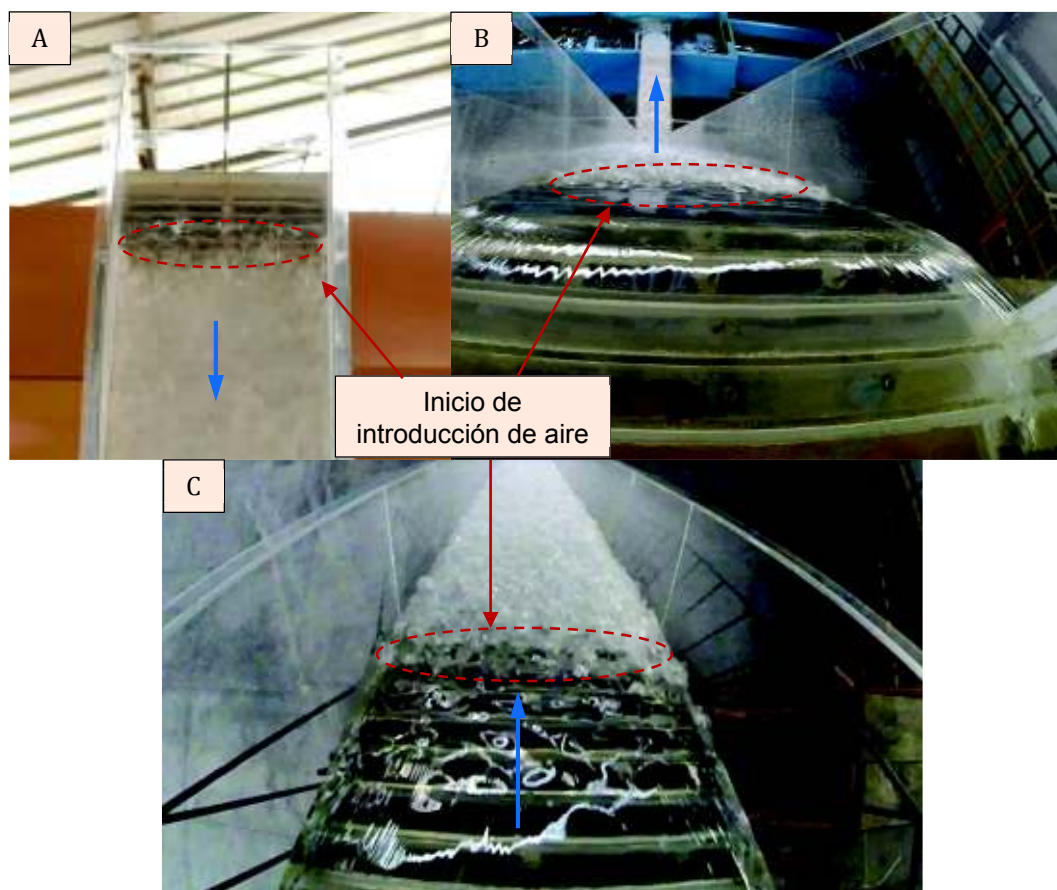
Fotografía No. 4.13: Prueba 2. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



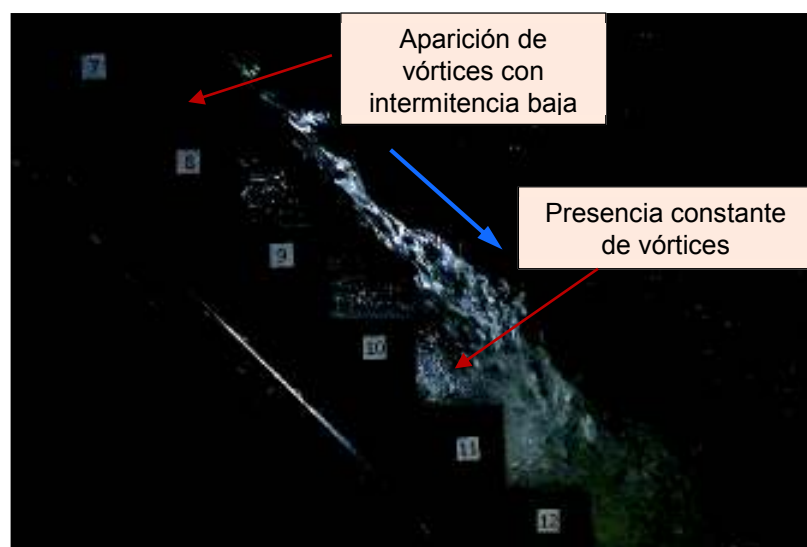
Fotografía No. 4.14: Prueba 2. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



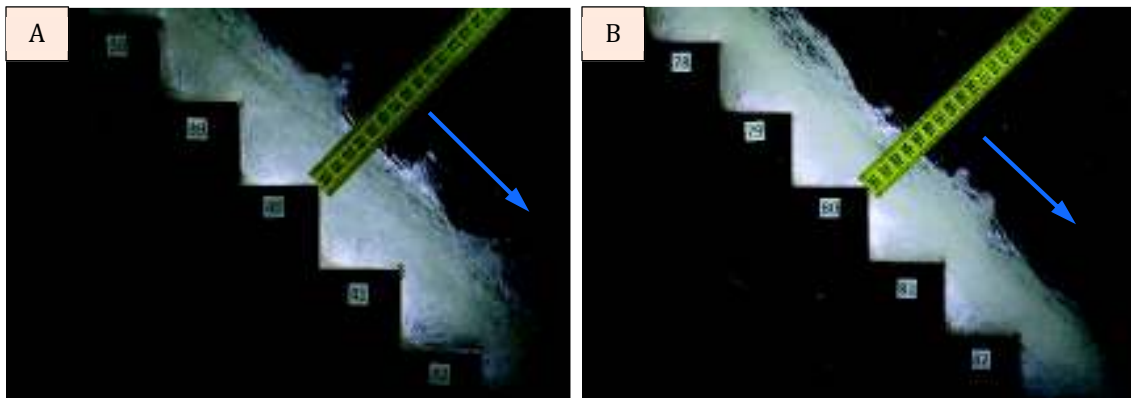
Fotografía No. 4.15: Prueba 2. (A) Vista frontal, (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (C) Identificación del inicio de autoaireación



Fotografía No. 4.16: Prueba 2. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.17: Prueba 2. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.18: Prueba 2. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida



Observaciones:

- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,35. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 15,1 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.13**.
- **Escalón No. 8:** Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, se produce el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón y va en aumento hacia aguas abajo. Ver **Fotografía No. 4.14** y **Fotografía No. 4.16**.

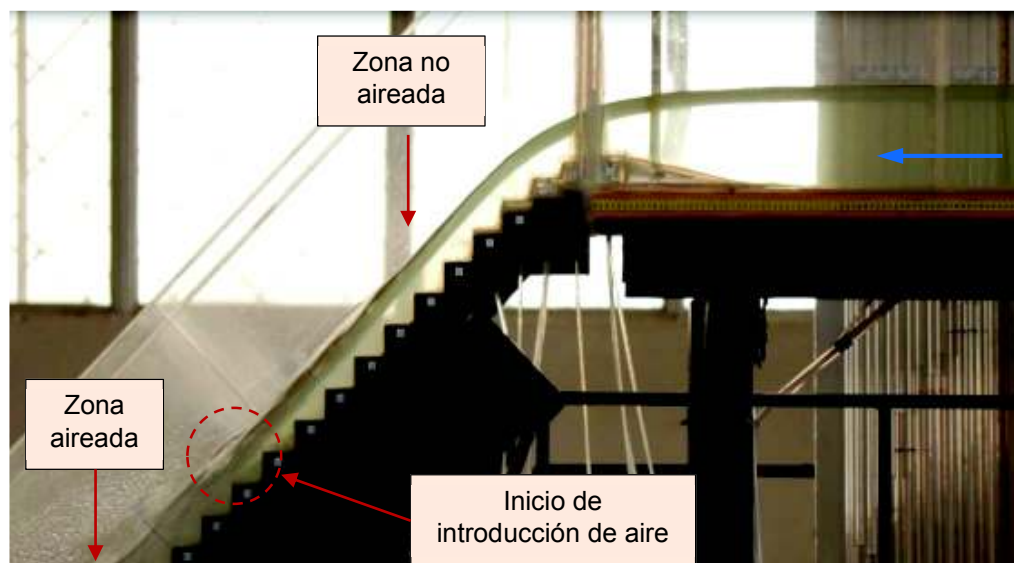
- **Escalón No. 9:** Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo descende por la rápida escalonada. La capa límite se interseca con la superficie libre del flujo y se observa una formación constante de vórtices en las cavidades de los escalones desde este escalón hacia aguas abajo. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 4,1$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,57$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.15**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia de 5,59 m, medido desde la cresta de la rápida y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado con una concentración de aire aproximadamente del 90%. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 4,5$ cm. Ver **Fotografía No. 4.17**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 3,2$ cm. Ver **Fotografía No. 4.18**.

d) PRUEBA P3: $Q = 44.44$ l/s

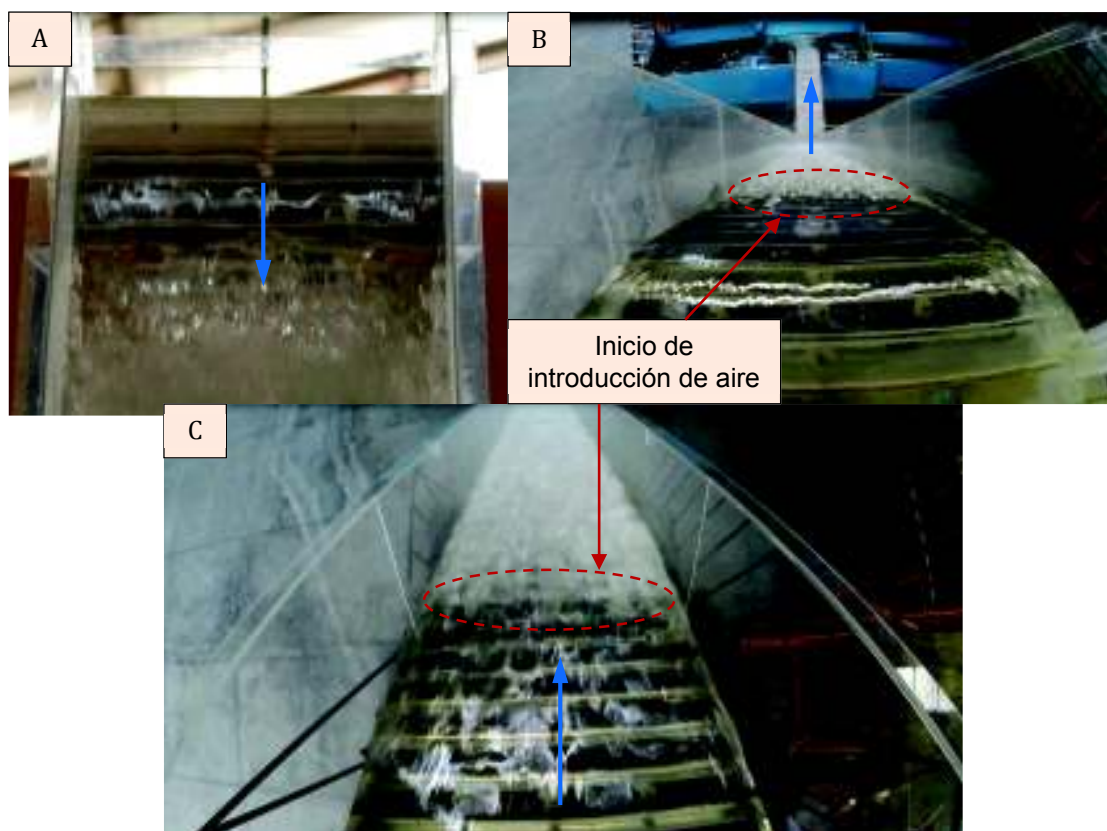
Fotografía No. 4.19: Prueba 3. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



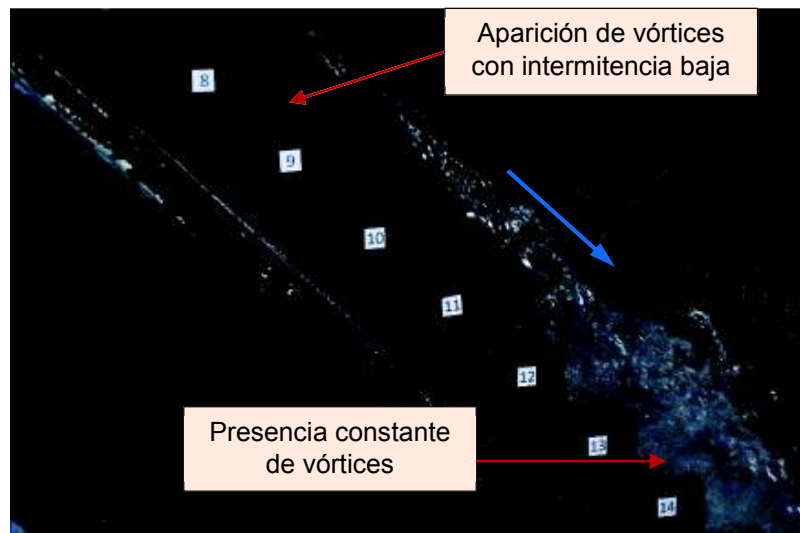
Fotografía No. 4.20: Prueba 3. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



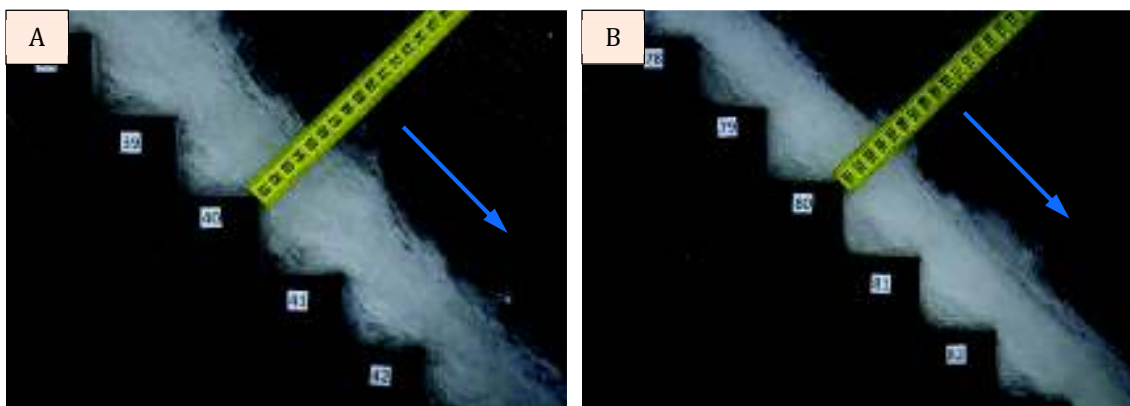
Fotografía No. 4.21: Prueba 3. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



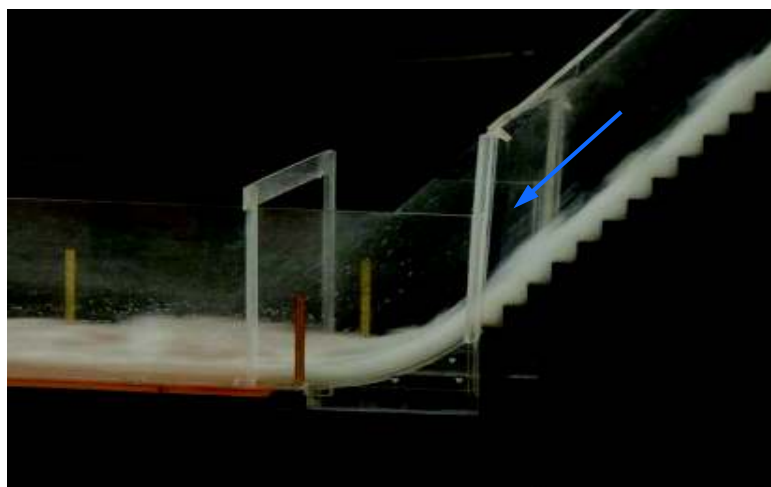
Fotografía No. 4.22: Prueba 3. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.23: Prueba 3. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.24: Prueba 3. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida



Observaciones:

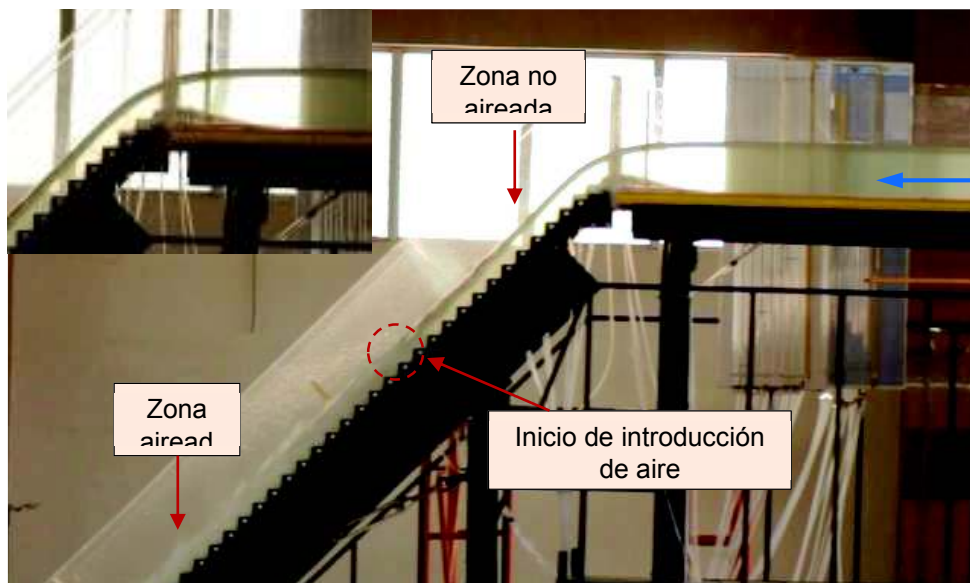
- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,40. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 16,6 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.19**.
- **Escalón No. 9:** Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, se produce el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón y va en aumento hacia aguas abajo. Ver **Fotografía No. 4.20** y **Fotografía No. 4.22**.
- **Escalón No. 11:** Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. La capa límite se interseca con la superficie libre del flujo y se observa una formación constante de vórtices en las cavidades de los escalones desde este escalón hacia aguas abajo. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 5,1$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,71$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.21**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia de 5,59 m, medido desde la cresta de la rápida y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado con una concentración de aire del 90%. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 5,2$ cm. Ver **Fotografía No. 4.23**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 4,0$ cm. Ver **Fotografía No. 4.24**.

e) PRUEBA P4: $Q = 55.82 \text{ l/s}$

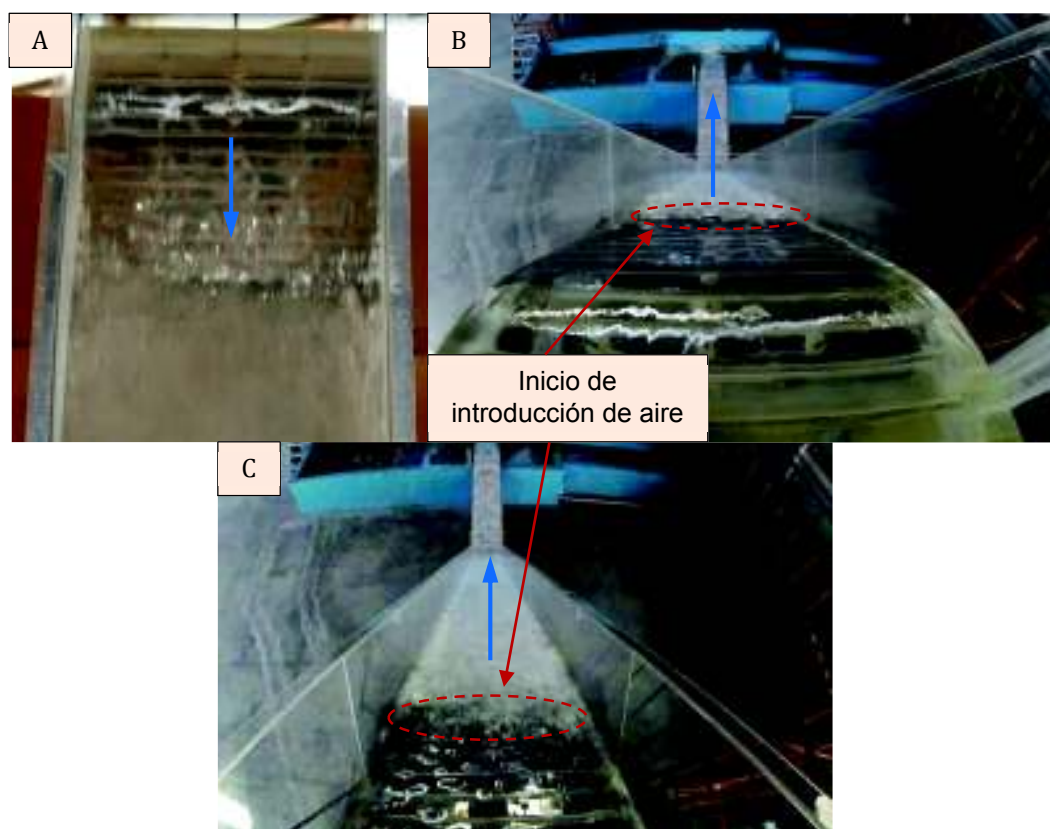
Fotografía No. 4.25: Prueba 4. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



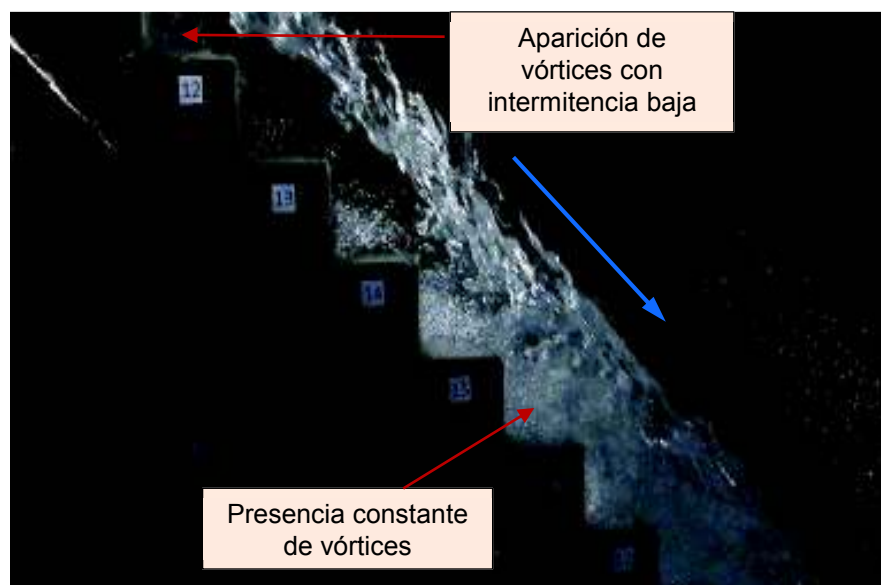
Fotografía No. 4.26: Prueba 4. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



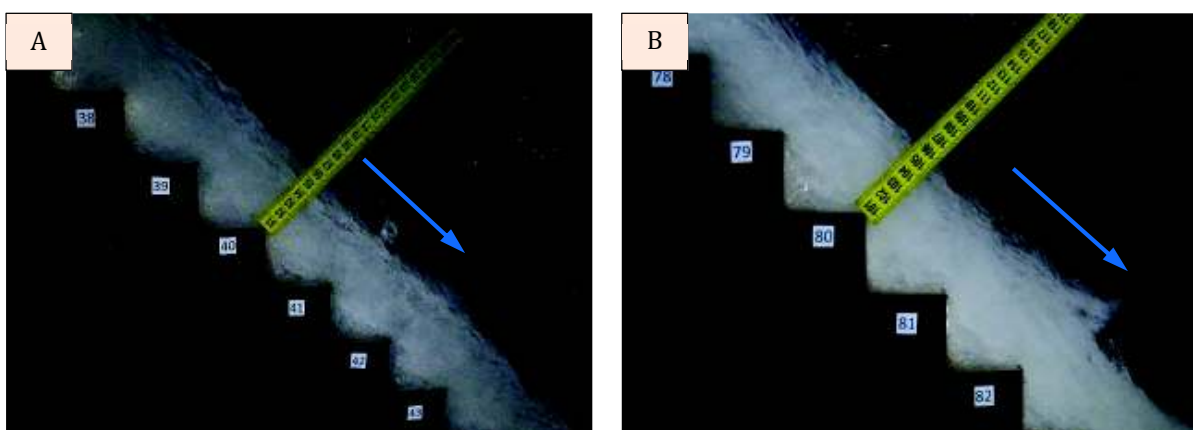
Fotografía No. 4.27: Prueba 4. Prueba 3. (A) Vista frontal, (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (C) Identificación del inicio de autoaireación



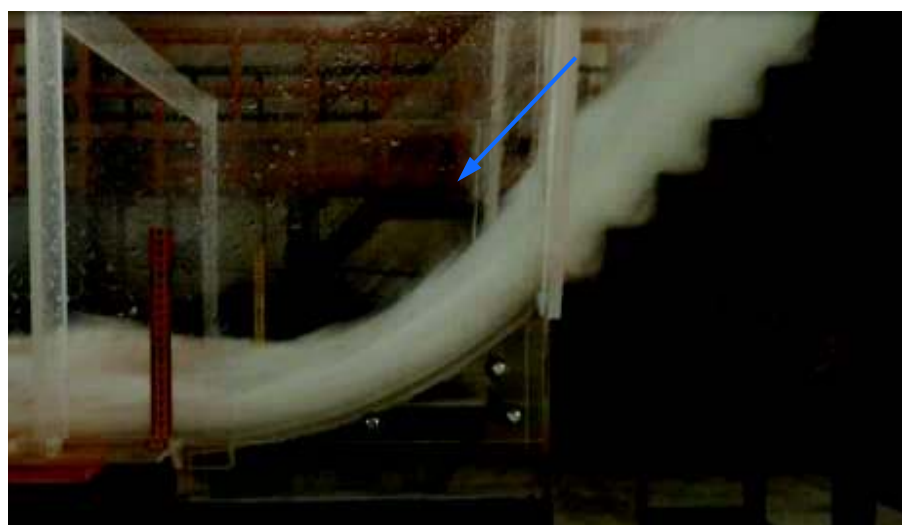
Fotografía No. 4.28: Prueba 4. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.29: Prueba 4. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.30: Prueba 4. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida



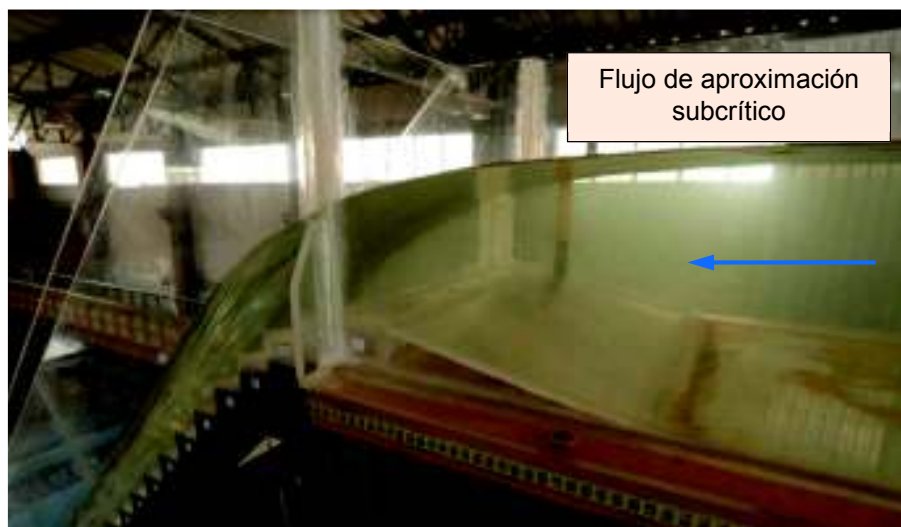
Observaciones:

- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,45. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 18,1 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.25**.
- **Escalón No. 9:** Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, se produce el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón y va en aumento hacia aguas abajo. Ver **Fotografía No. 4.26** y **Fotografía No. 4.28**.

- **Escalón No. 13:** Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. La capa límite se interseca con la superficie libre del flujo y se observa una formación constante de vórtices en las cavidades de los escalones desde este escalón hacia aguas abajo. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 5,9$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,85$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.27**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia de 5,59 m, medido desde la cresta de la rápida y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado con una concentración de aire aproximadamente del 90%. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 5,7$ cm. Ver **Fotografía No. 4.29**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 4,5$ cm. Ver **Fotografía No. 4.30**.

f) **PRUEBA P5: $Q = 77.86$ l/s**

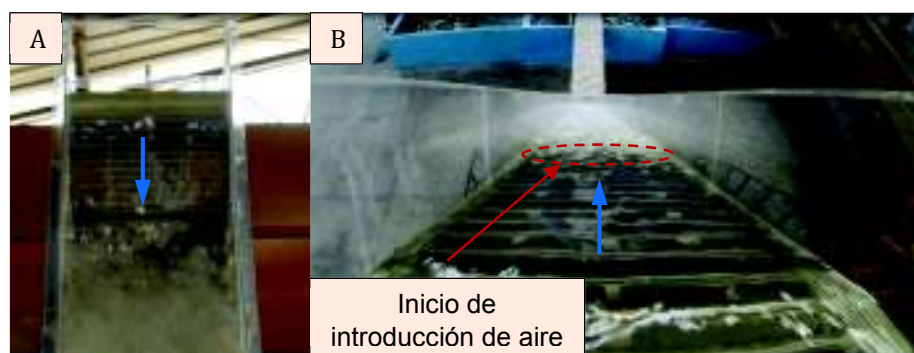
Fotografía No. 4.31: Prueba 5. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



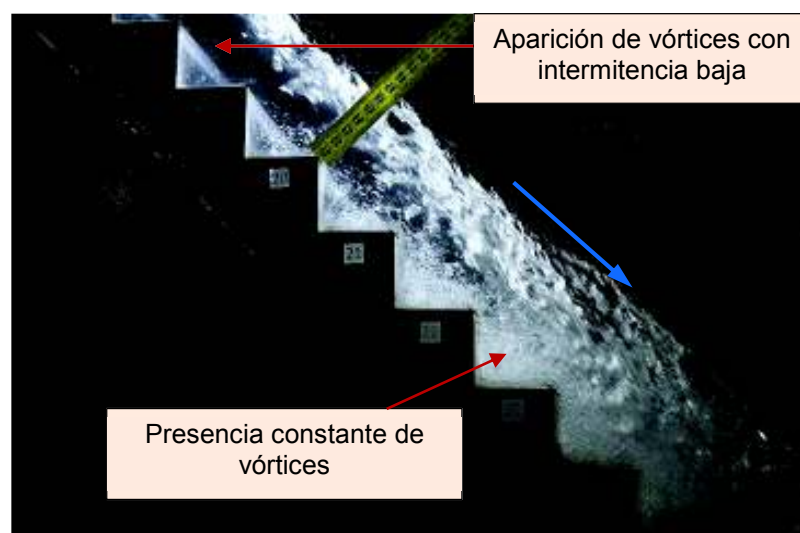
Fotografía No. 4.32: Prueba 5. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



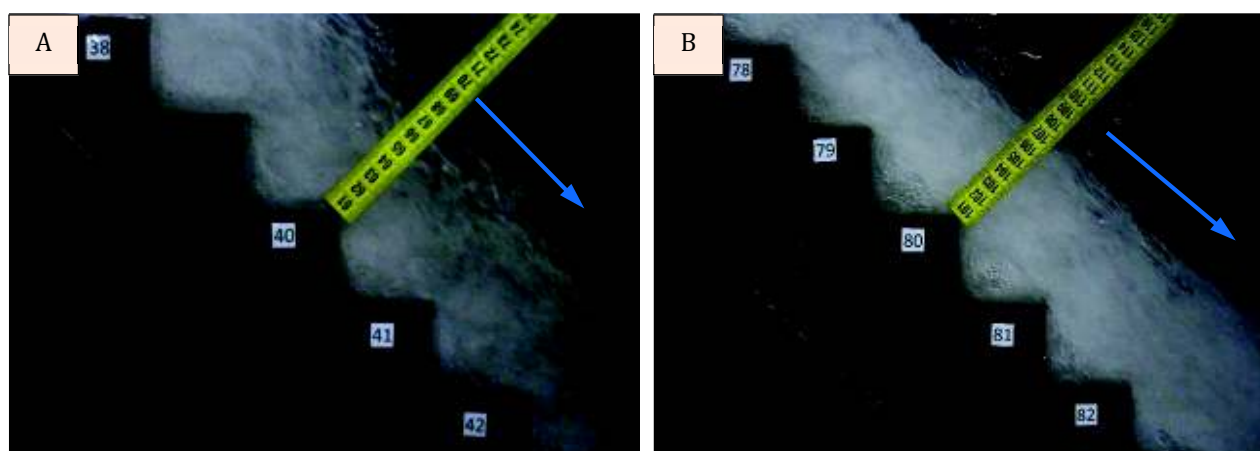
Fotografía No. 4.33: Prueba 5. (A) Vista frontal y (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada



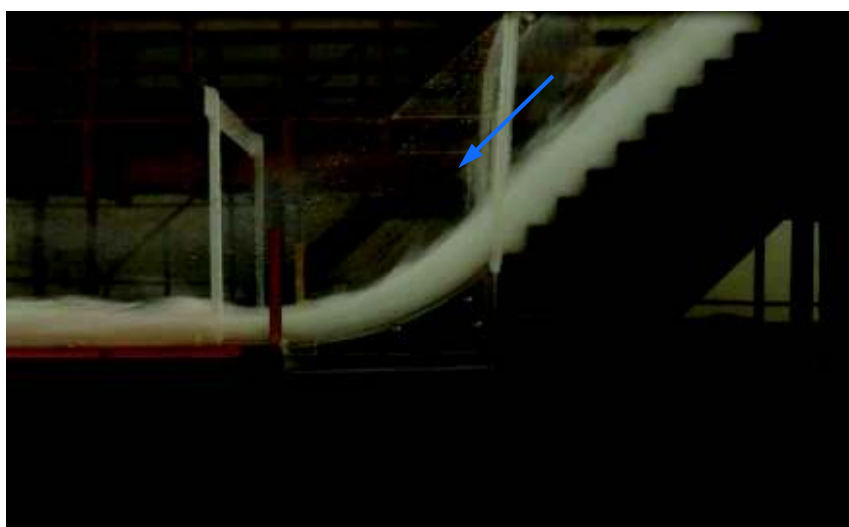
Fotografía No. 4.34: Prueba 5. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.35: Prueba 5. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.36: Prueba 5. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida



Observaciones:

- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,51. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 20,8 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.31**.
- **Escalón No. 11:** Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, se produce el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón y va en aumento hacia aguas abajo. Ver **Fotografía No. 4.32** y **Fotografía No. 4.34**.

- **Escalón No. 17:** Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. La capa límite se interseca con la superficie libre del flujo y se observa una formación constante de vórtices en las cavidades de los escalones desde este escalón hacia aguas abajo. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 6,5$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 1,13$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.33**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia de 5,59 m, medido desde la cresta de la rápida y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado con una concentración de aire aproximadamente del 90%. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 7,8$ cm. Ver **Fotografía No. 4.35**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 5,7$ cm. Ver **Fotografía No. 4.36**.

4.2.2 CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE EN LA REGIÓN UNIFORME: DISEÑO ORIGINAL

Para determinar el valor de la concentración media de aire en la región uniforme del flujo bifásico se puede medir directamente dicho parámetro con un equipo de alta precisión o se puede apoyar de algunas ecuaciones empíricas dentro del rango de aplicabilidad de estas. Debido a la limitación de la instrumentación necesaria para medir la concentración de aire, se plantea realizar un cálculo para determinar la concentración media de aire, a partir de las velocidades medias del flujo obtenidas mediante la modelación numérica tridimensional con la ayuda del paquete computacional ANSYS CFX 19 (Proyecto PIMI 16-06) y de las profundidades de agua que se miden directamente en la Instalación Experimental como se detalla en el **Cuadro No. 4.1**.

Cuadro No. 4.1: Resultados de la modelación numérica en ANSYS CFX y los resultados experimentales para el diseño original

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EN LA REGION UNIFORME DEL FLUJO BIFÁSICO					
Prueba No.	Caudal	MODELO NUMÉRICO		INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	
		Velocidad media del flujo al pie de la rápida	Profundidad del flujo bifásico, pie de la rápida	Profundidad del flujo bifásico, pie de la rápida	Desviación (Profundidad)
	Q	V _m	Y _u	y _u	e
	(l/s)	(m/s)	(m)	(m)	(%)
P0 - DO	14,23	2,71	0,023	0,024	4,3
P1 - DO	23,37	3,23	0,030	0,030	0,0
P2 - DO	33,89	3,70	0,034	0,032	5,9
P3 - DO	44,44	4,60	0,037	0,040	8,1
P4 - DO	55,82	5,30	0,039	0,045	16,3
P5 - DO	77,86	5,85	0,050	0,057	14,0

Elaborado por: Equipo de Investigación PIMI 16 06 – CIERHI EPN

La validación del modelo numérico con la Instalación Experimental se realizó comparando los resultados de las características del patrón del flujo de aproximación y del flujo rasante sobre la rápida escalonada, mientras que la calibración del modelo se efectuó con las profundidades del flujo a lo largo de la estructura hidráulica, verificando además que se cumpla la continuidad del flujo tanto en el modelo numérico como en la Instalación Experimental. La desviación de los resultados sobre la profundidad del flujo al pie de la rápida escalonada entre el modelo numérico y la instalación experimental es menor al 16,3%, valores aceptables debido a que el flujo rasante sobre la rápida es altamente turbulento. A partir de la modelación numérica se obtuvo la velocidad representativa media del flujo al pie de la rápida y con este valor se calcula la profundidad de agua clara.

$$y_w = \frac{q}{v_m} \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Dónde:

y_w: Profundidad de agua clara (cm)

q: Caudal unitario (m³/s.m)

v_m: Velocidad media del flujo, obtenida con la modelación numérica (m/s)

Se sabe que la profundidad de agua clara es determinada mediante la siguiente expresión:

$$y_w = (1 - C_m) \cdot y_u \quad \text{Ec. (4.2)}$$

Dónde:

y_w : Profundidad de agua clara (m)

C_m : Concentración media de aire

y_u : Profundidad del flujo bifásico en la zona uniforme (m)

Una vez que se obtiene la profundidad de agua clara con la **Ec. (4.1)** y con la profundidad del flujo bifásico medido al pie de la rápida escalonada, se puede despejar de la fórmula anterior la concentración media de aire.

$$C_m = \left(1 - \frac{y_w}{y_u} \right) \quad \text{Ec. (4.3)}$$

Los resultados de la concentración media de aire con diseño original se presentan en el **Cuadro No. 4.2**.

Cuadro No. 4.2: Concentración media de aire con diseño original

Prueba No.	Caudal Q	Caudal Q	Caudal Unitario q	V_m (Modelo Numérico)	Profundidad de agua clara y_w (Modelo Numérico - Calculado con la Ec. 4.1)	y_u Profundidad del flujo bifásico, pie de la rápida (Instalación Experimental)	Concentración media de aire
	(l/s)	(m ³ /s)	(m ³ /s.m)	(m/s)	(cm)	(cm)	
P0 - DO	14,23	0,014	0,027	2,71	1,01	2,4	0,578
P1 - DO	23,37	0,023	0,045	3,23	1,40	3,0	0,534
P2 - DO	33,89	0,034	0,065	3,70	1,77	3,2	0,447
P3 - DO	44,44	0,044	0,086	4,60	1,87	4,0	0,534
P4 - DO	55,82	0,056	0,108	5,30	2,03	4,5	0,548
P5 - DO	77,86	0,078	0,150	5,85	2,57	5,7	0,549

C_m	0,532
-------	-------

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

El promedio de la concentración media de aire en la región uniforme para los caudales de operación con diseño original es de 0.532, este resultado es acorde con el valor reportado en la literatura técnica, Matos (1999) establece que en régimen uniforme la concentración media de aire depende únicamente de la pendiente de la rápida escalonada, con lo cual plantea la siguiente ecuación $C_m = 0.76 * (\sin \alpha)^{0.82}$, si se reemplaza el valor de la pendiente de la rápida escalonada del presente estudio, se obtiene un valor de concentración media de 0.572.

4.2.3 FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY – WEISBACH EN LA REGIÓN UNIFORME: DISEÑO ORIGINAL

Con fines de calcular el factor de fricción, se determina previamente la profundidad de agua clara, para ello se emplea la **Ec. (4.2)** mencionada anteriormente y las profundidades del flujo medidas en la zona uniforme de la rápida escalonada (Escalón No 80 a 93). En el presente análisis se toma en cuenta la ecuación de Darcy – Weisbach para el cálculo del factor de fricción (f_e) entre el fondo virtual y el flujo que pasa por encima de este, flujo rasante.

$$f_e = \frac{8 * g * \sin \alpha * y_w^3}{q^2} \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Esta ecuación es válida para el caso en el que se alcanza el régimen uniforme en el tramo final de la rápida escalonada, condición que ha sido constatada en la Instalación Experimental durante las pruebas.

Cuadro No. 4.3: Factor de Fricción de Darcy - Weisbach para flujo bifásico con diseño original

Número de Prueba	Caudal	Caudal Unitario	Ángulo de Inclinación de la Rápida	Concentración media de aire	Profundidad del flujo bifásico, (escalón No 80 a 93)	Profundidad de agua clara	Factor de fricción de Darcy (bifásico flujo aire-agua)
	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	α (°)	Cm	y _u (cm)	y _w (cm)	f _e
P0 - DO	14,23	0,027	45	0,532	2,90	1,36	0,18
P1 - DO	23,37	0,045			4,00	1,87	0,18
P2 - DO	33,89	0,065			4,50	2,11	0,12
P3 - DO	44,44	0,086			5,20	2,43	0,11
P4 - DO	55,82	0,108			5,70	2,67	0,09
P5 - DO	77,86	0,150			7,80	3,65	0,12

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

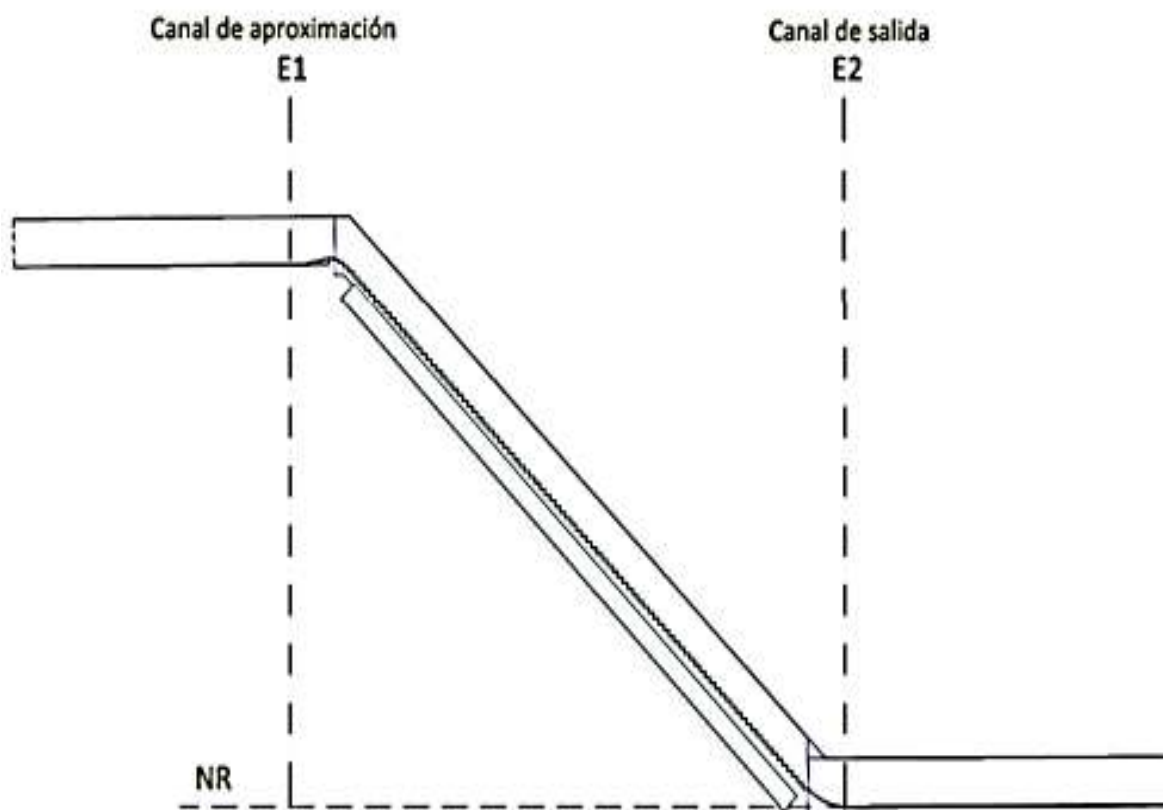
Del **Cuadro No. 4.3**, se deduce que el rango del factor de fricción de Darcy – Weisbach en la región uniforme se encuentra entre 0.09 y 0.18 para la gama de caudales experimentados y representado por un valor medio de 0.13. Estos resultados obtenidos están dentro de los valores reportado en la literatura técnica Chanson, H., Bung, D., & Matos, J. (2015) y que corresponden a valores de factores de fricción en un rango de 0,06 a 1,1 para rápidas escalonadas con las siguientes características $\alpha > 10^\circ$; $h > 0.02$ m ; $Re > 1.10^5$.

4.2.4 DISIPACIÓN DE ENERGÍA: DISEÑO ORIGINAL

Uno de los principales objetivos de la presente investigación es la evaluación de la disipación de energía al pie de la rápida escalonada en condiciones de flujo rasante.

El cálculo de la disipación de energía se realizó mediante el Principio de Conservación de Energía. De este modo se consideró la energía total aguas arriba de la rápida ($E_1 = E_i$), en el canal de aproximación, y la energía al pie de la rápida ($E_2 = E_r$).

Figura No. 4.1: Volumen de control y secciones de frontera para el cálculo de la disipación de energía.



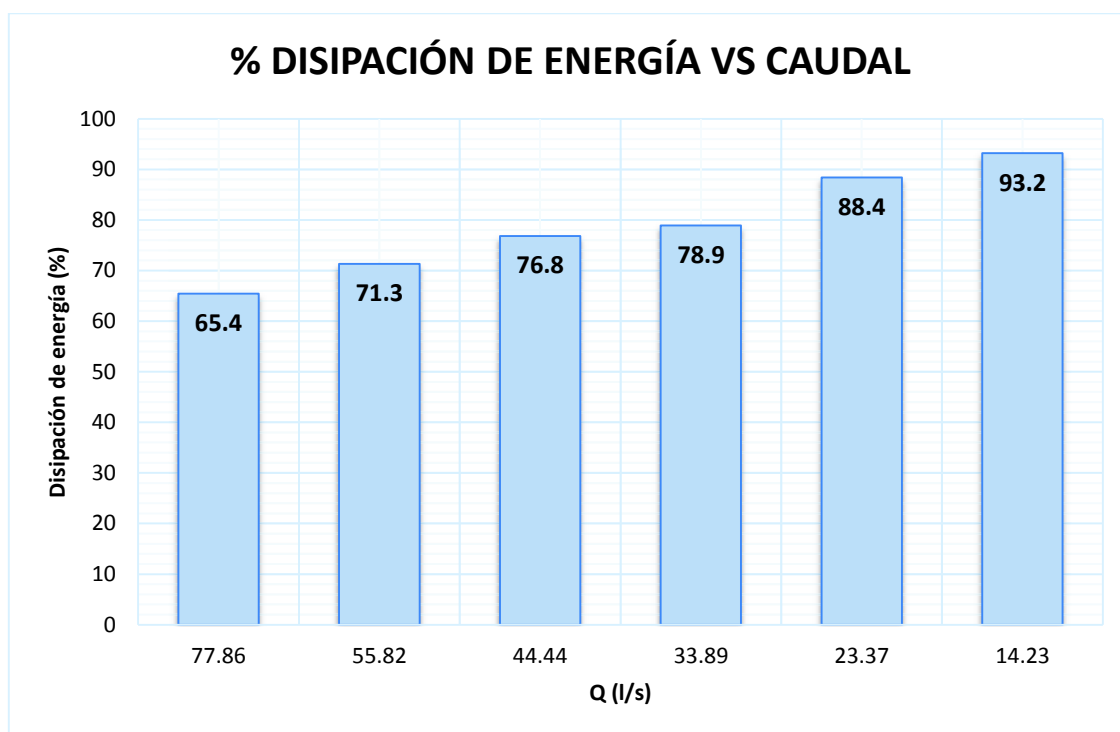
Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Cuadro No. 4.4: Porcentaje de disipación de energía en la rápida escalonada para condiciones de flujo rasante con diseño original

Número de Prueba	Caudal	Caudal Unitario	E. Canal de Aproximación	E. Canal de Salida	ΔE (m)	Disipación de Energía
	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	E ₁ (m)	E ₂ (m)	ΔE (m) = E ₁ -E ₂	$\Delta E/E_1$ (%)
P0 - DO	14,23	0,027	4,63	0,32	4,32	93,2
P1 - DO	23,37	0,045	4,66	0,54	4,12	88,4
P2 - DO	33,89	0,065	4,68	0,99	3,69	78,9
P3 - DO	44,44	0,086	4,70	1,09	3,61	76,8
P4 - DO	55,82	0,108	4,72	1,35	3,37	71,3
P5 - DO	77,86	0,150	4,75	1,64	3,11	65,4

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Gráfico No. 4.1: Porcentajes de disipación de energía para cada uno de los caudales establecidos en el plan de pruebas con diseño original



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Según el **Cuadro No. 4.4** y el **Gráfico No. 4.1**, la rápida escalonada genera una disipación de energía entre el 65.4% y 93.2% para un rango de caudales unitarios de 0.027 a 0.15 (m³/s)/s. La disipación de energía al pie de la misma es baja para caudales altos, mientras que para caudales bajos el porcentaje de disipación de energía aumenta.

4.2.5 CURVAS ADIMENSIONALES: DISEÑO ORIGINAL

a) ZONA NO AIREADA

En el **Anexo No. 4** se detalla el procedimiento del análisis dimensional del fenómeno físico hidráulico del flujo rasante sobre una rápida escalonada en la **zona no aireada**. En resumen, los parámetros π más relevantes obtenidos a partir del análisis dimensional para la zona no aireada son:

$$\varphi \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}, \frac{L_i}{k_s}, \frac{y_i}{k_s} \right) = 0 \quad \text{Ec. (4.5)}$$

Dónde:

q : Caudal unitario ($\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$)

k_s : Macrorugosidad del escalón (m)

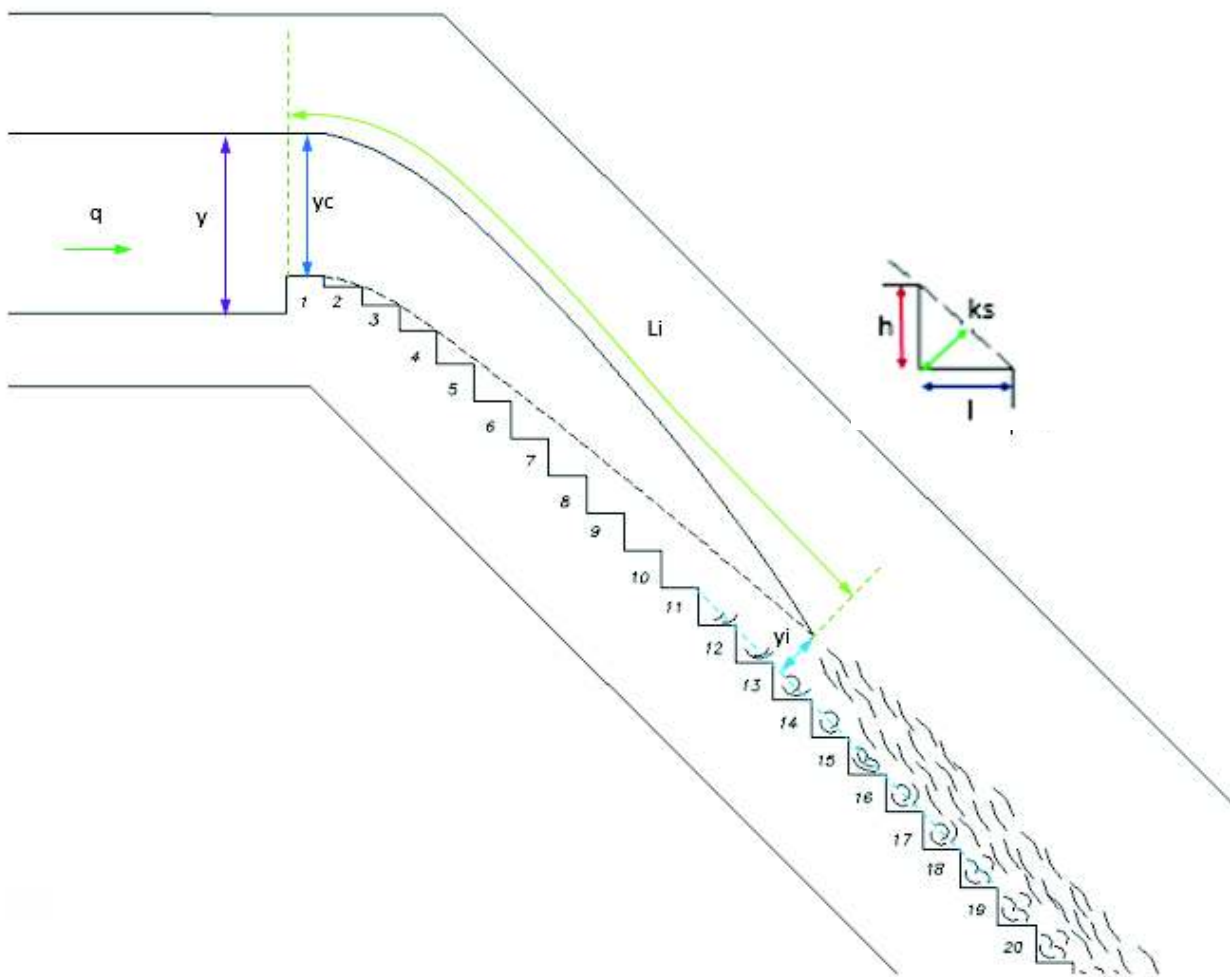
g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

L_i : Longitud medida desde la cresta de la rápida escalonada hasta el punto de inicio de la autoaireación (m)

y_i : Profundidad de flujo en el punto de inicio de la autoaireación (m)

En la **Figura No. 4.2** se indica el esquema donde se identifican algunas variables que intervienen en el análisis dimensional del fenómeno físico.

Figura No. 4.2: Esquema para la identificación de variables que intervienen en el fenómeno hidráulico, zona no aireada



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los parámetros adimensionales de la ecuación **Ec. (4.5)** pueden ser objeto de ciertas operaciones aritméticas, que permiten combinar de cierta manera un parámetro con otro, como se indica a continuación:

$$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}} = \frac{L_i}{k_s} \quad \text{Ec. (4.6)}$$

$$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}} = \frac{y_i}{k_s} \quad \text{Ec. (4.7)}$$

Con la **Ec. (4.6)** y la **Ec. (4.7)** se analiza la tendencia y la variación de la longitud de inicio de la autoaireación (L_i) y la profundidad del flujo en el punto de inicio de la autoaireación natural (y_i) para el plan de pruebas establecido.

Previamente hay que definir el valor de k_s , sabiendo que:

$$k_s = h \cos \alpha \quad \text{Ec. (4.8)}$$

Dónde: h , es la altura del escalón (contrahuella), está mide 5 cm y α , es el ángulo de inclinación de la rápida escalonada igual a 45° .

Remplazando estos valores en la ecuación **Ec. (4.8)**, se obtiene:

$$k_s = 0.05 \cos 45$$

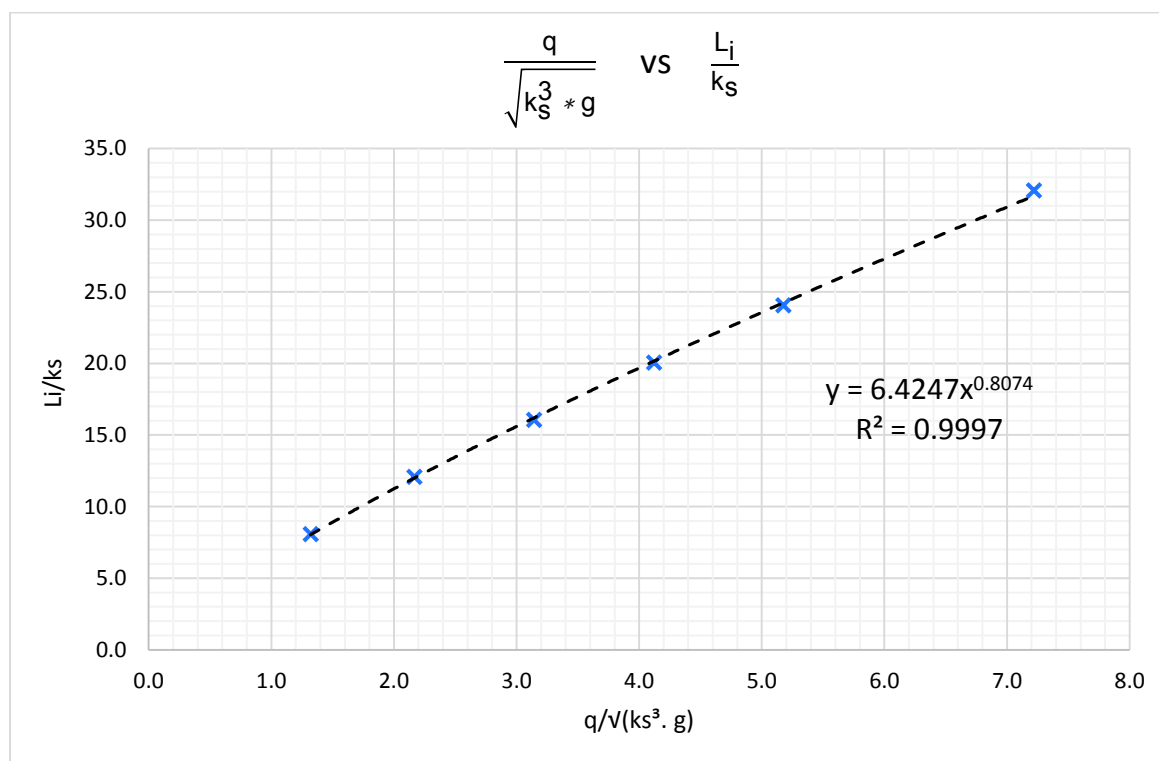
$$k_s = 0.035 \text{ m}$$

En el **Cuadro No. 4.5**, se presentan los calculo con base en los registros de datos experimentales obtenidos para cada caudal de operación.

Cuadro No. 4.5: Parámetros adimensionales para la zona no aireada. Diseño original

Número de Prueba	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	k _s (m)	g (m/s ²)	L _i (m)	y _i (cm)	$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$	$\frac{L_i}{k_s}$	$\frac{y_i}{k_s}$
P5 - DO	77,86	0,150	0,035	9,81	1,13	6,5	7,2	32,1	1,8
P4 - DO	55,82	0,108			0,85	5,9	5,2	24,1	1,7
P3 - DO	44,44	0,086			0,71	5,1	4,1	20,1	1,4
P2 - DO	33,89	0,065			0,57	4,1	3,1	16,1	1,2
P1 - DO	23,37	0,045			0,43	3,3	2,2	12,1	0,9
P0 - DO	14,23	0,027			0,29	1,9	1,3	8,1	0,5

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

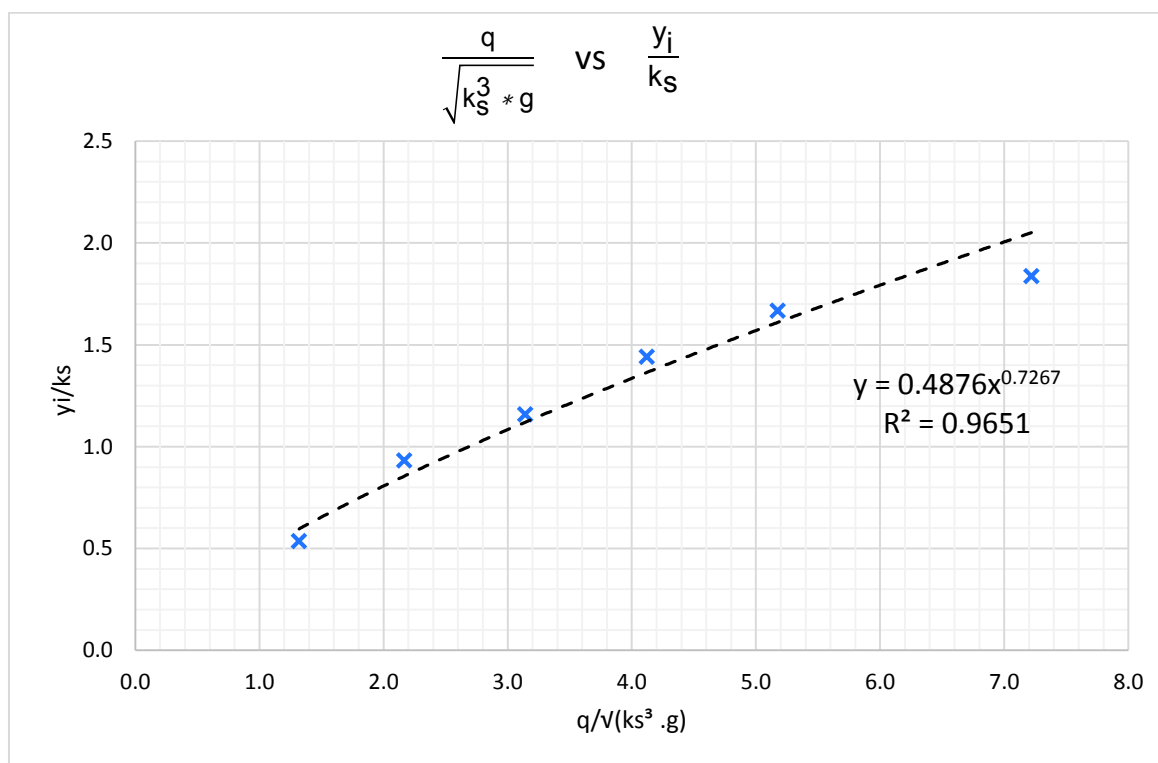
Gráfico No. 4.2: Grafico adimensional para la zona no aireada $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$ vs $\frac{L_i}{k_s}$.

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

$$\frac{L_i}{k_s} = 6.4247 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}} \right)^{0.8074} \quad \text{Ec. (4.9)}$$

A partir del **Gráfico No. 4.2** se obtiene una tendencia que viene dada por la ecuación experimental **Ec. (4.9)**, la misma que permite determinar la longitud L_i medida desde la cresta de la rápida escalonada hasta el punto en donde se inicia la introducción natural de aire para una rápida escalonada con inclinación a 45° y flujo de aproximación subcrítico. El coeficiente de correlación de esta función es de $R^2 = 0,9997$. Se observa además en el **Gráfico No. 4.2** que cuando se incrementa la relación $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$, es decir, se incrementa el caudal unitario, la longitud de inicio de la autoaireación también aumenta, desplazándose la misma hacia aguas abajo de la rápida escalonada.

Gráfico No. 4.3: Curva adimensional para la zona no aireada $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$ vs $\frac{y_i}{k_s}$



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.4876 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}} \right)^{0.7267} \quad \text{Ec. (4.10)}$$

A partir del **Gráfico No. 4.3** se obtiene una tendencia que viene dada por la ecuación experimental **Ec. (4.10)**, la misma que permite determinar la profundidad de agua y_i en el punto de inicio de introducción natural de aire para una rápida escalonada con inclinación a 45° y flujo de aproximación subcrítico. El coeficiente de correlación de esta función es $R^2 = 0,9651$. Se observa además en el **Gráfico No. 4.3** que cuando se incrementa la relación $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$, es decir, se incrementa el caudal unitario, la profundidad del flujo en el punto de inicio de la autoaireación también se incrementa.

b) ZONA AIREADA

En el **Anexo No. 4** se detalla el procedimiento del análisis dimensional del fenómeno físico hidráulico del flujo rasante sobre la rápida escalonada en la **zona aireada, región uniforme**. En resumen, los parámetros π más relevantes obtenidos a partir del análisis dimensional para esta zona son:

$$\varphi\left(\frac{k_s}{y_c}, \frac{H_d}{y_c}, \frac{b_e}{y_c}, \frac{y_u}{y_c}, \frac{\Delta E}{y_c}, \frac{E_t}{y_c}\right) = 0 \quad \text{Ec. (4.11)}$$

Dónde:

k_s : Macrorugosidad del escalón (m)

y_c : Profundidad crítica (m)

y_u : Profundidad de flujo bifásico en la zona uniforme (m)

H_d : Altura de la rápida escalonada (m)

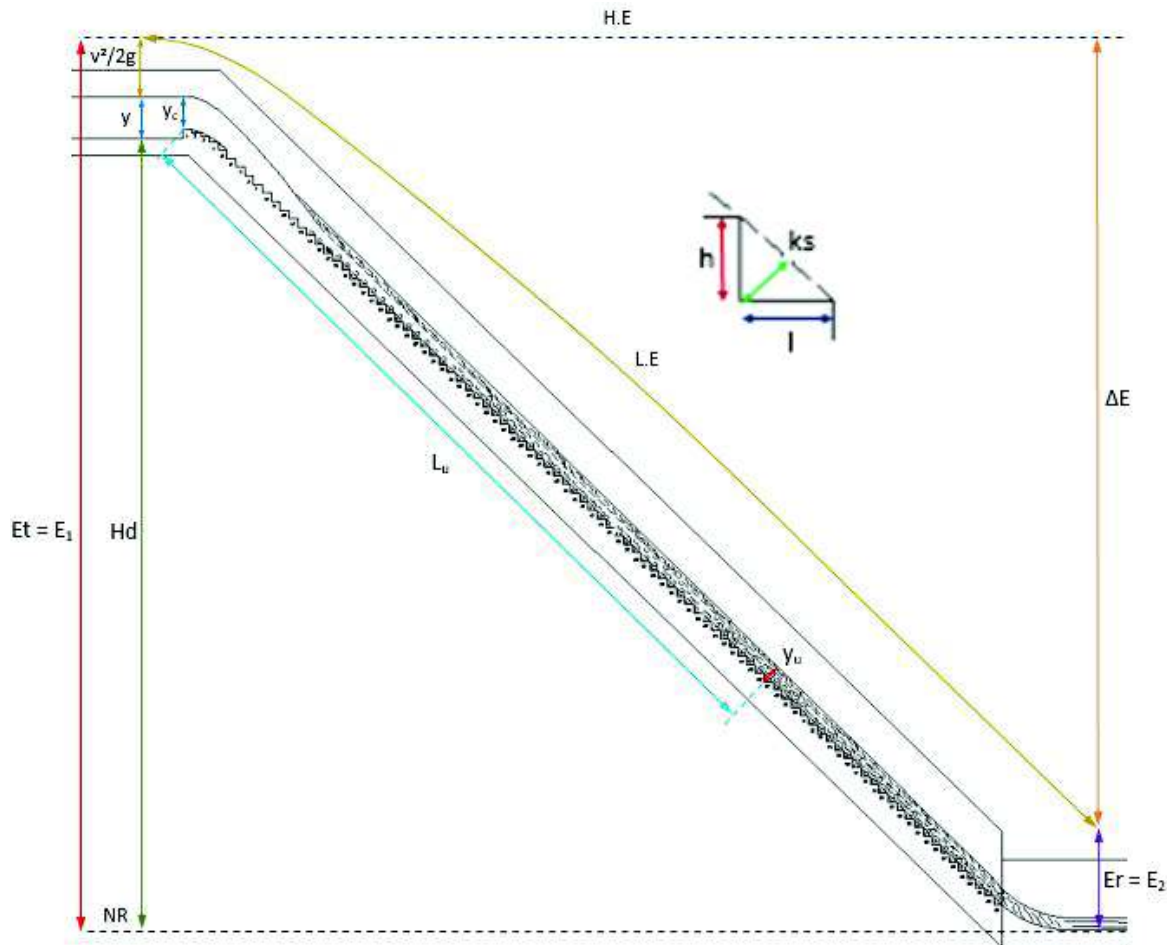
b_e : Longitud efectiva en la cual se desarrolla el vórtice de eje horizontal. Para el análisis con diseño original, $b_e = B$, siendo B el ancho de la rápida (m).

$E_t = E_1$: Energía total (m)

ΔE : Pérdida de energía (m)

En la **Figura No. 4.3** se indica el esquema donde se identifican algunas variables que intervienen en el análisis dimensional del fenómeno físico.

Figura No. 4.3: Esquema de identificación de variables que intervienen en el fenómeno hidráulico en la zona aireada



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Los parámetros adimensionales de la ecuación **Ec. (4.11)** pueden ser objeto de ciertas operaciones aritméticas, que permiten combinar de cierta manera un parámetro con otro, como se indica a continuación:

$$\frac{\Delta E}{E_t} (\%) = \frac{H_d}{y_c} \quad \text{Ec. (4.12)}$$

$$\frac{y_u}{b_e} = \frac{k_s}{y_c} \quad \text{Ec. (4.13)}$$

Con la **Ec. (4.12)** y la **Ec. (4.13)** se analizó la tendencia de la disipación de energía $\left(\frac{\Delta E}{E_t}\right)$ y la variación de la profundidad del flujo bifásico para el plan de pruebas seleccionado.

En el **Cuadro No. 4.6**, se presentan los calculo con base en los resultados experimentales obtenidos para cada caudal de operación.

Cuadro No. 4.6: Parámetros adimensionales para la zona aireada, región uniforme.

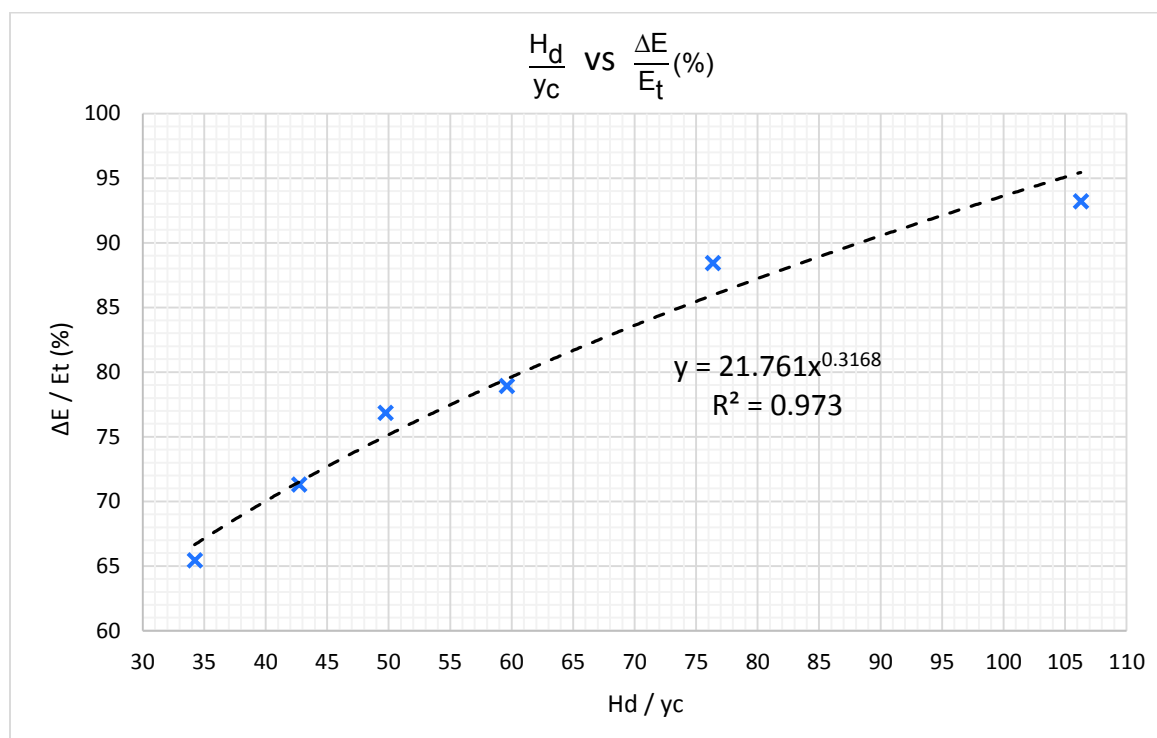
Diseño original

Número de Prueba	Q (l/s)	y_c (m)	y_u (m)	E_t (m)	E_r (m)	ΔE (m)	$\frac{\Delta E}{E_t}$ (%)	$\frac{H_d}{y_c}$	$\frac{y_u}{b_e}$	$\frac{k_s}{y_c}$
P5 - DO	77,86	0,132	0,078	4,75	1,64	3,11	65,4	34,2	0,15	0,27
P4 - DO	55,82	0,106	0,057	4,72	1,35	3,37	71,3	42,7	0,11	0,33
P3 - DO	44,44	0,091	0,052	4,70	1,09	3,61	76,8	49,7	0,10	0,39
P2 - DO	33,89	0,076	0,045	4,68	0,99	3,69	78,9	59,6	0,09	0,47
P1 - DO	23,37	0,059	0,040	4,66	0,54	4,12	88,4	76,3	0,08	0,60
P0 - DO	14,23	0,043	0,029	4,63	0,32	4,32	93,2	106,3	0,06	0,83

k_s	(m)	0,035
H_d	(m)	4,52
$b_e = B$	(m)	0,518

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Gráfico No. 4.4: Curva adimensional para la zona aireada $\frac{H_d}{y_c}$ vs $\frac{\Delta E}{E_t}$ (%), región uniforme.

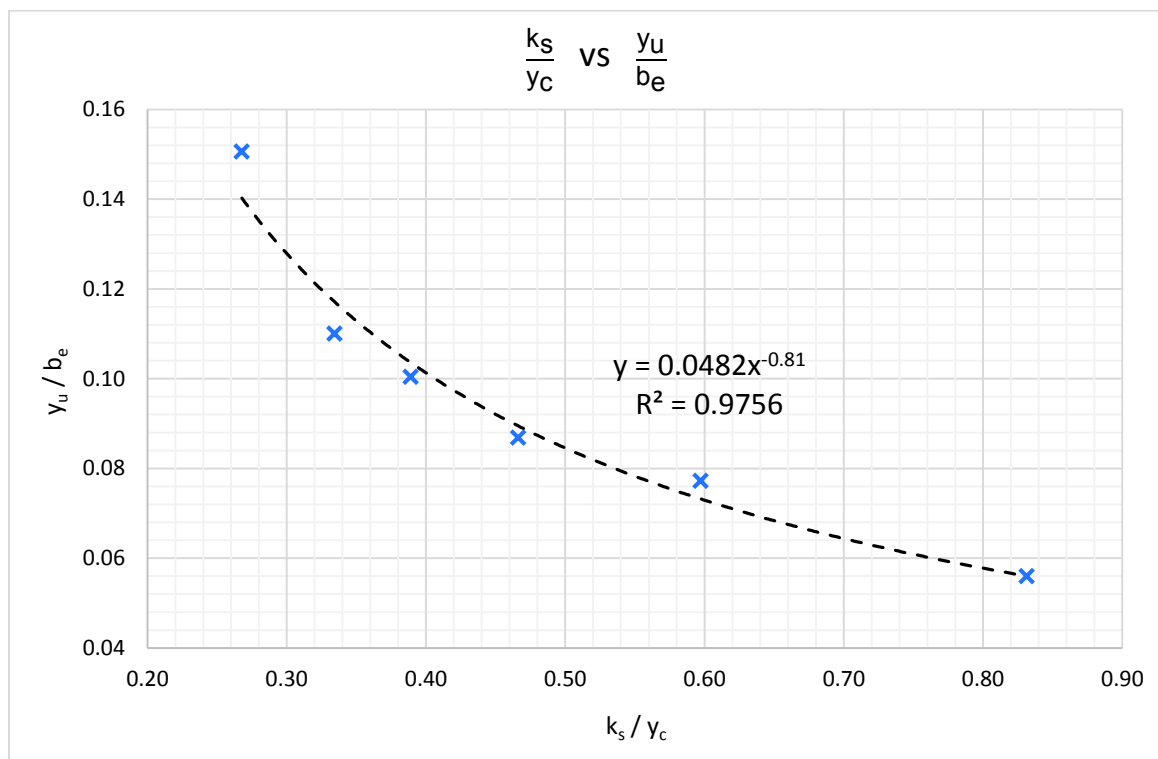


Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

$$\frac{\Delta E}{E_t} (\%) = 21,761 \left(\frac{H_d}{y_c} \right)^{0,3168} \quad \text{Ec. (4.14)}$$

La ecuación experimental **Ec. (4.14)**, obtenida a partir del **Gráfico No. 4.4** con los valores del registro de datos experimentales establece una función para obtener directamente la disipación de energía $\left(\frac{\Delta E}{E_t} \right)$, al final de la rápida escalonada, con respecto a la relación $\frac{H_d}{y_c}$. También con base en esta ecuación se puede determinar la pérdida de energía ΔE y por lo tanto la energía residual E_r ($E_r = E_t - \Delta E$). La ecuación experimental obtenida tiene un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,973$. Además en el **Gráfico No. 4.4** se observa que cuando se incrementa la relación $\frac{H_d}{y_c}$, es decir, disminuye la profundidad crítica y por lo tanto disminuye el cauda unitario sobre la rápida escalonada la disipación de energía al pie de la rápida aumenta.

Gráfico No. 4.5: Curva adimensional para la zona aireada $\frac{k_s}{y_c}$ vs $\frac{y_u}{b_e}$, región uniforme



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

$$\frac{y_u}{b_e} = 0,0482 \left(\frac{k_s}{y_c} \right)^{-0,81} \quad \text{Ec. (4.15)}$$

La ecuación **Ec. (4.15)**, obtenida a partir del **Gráfico No. 4.5** con los valores del registro de datos experimentales establece una función para obtener la profundidad del flujo bifásico y_u en la zona uniforme del flujo rasante. La ecuación experimental obtenida tiene un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,976$. Se observa además en el **Gráfico No. 4.5** que cuando aumenta la relación $\frac{k_s}{y_c}$, la relación $\frac{y_u}{b_e}$ disminuye.

4.3 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN AL DISEÑO ORIGINAL

Una vez finalizado el análisis experimental con respecto al funcionamiento hidráulico de la Instalación Experimental de la rápida escalonada con diseño original, se procede a realizar una modificación sobre el fondo escalonado (colocación de tabiques) que, según la literatura técnica (Gonzalez & Chanson, Air Entrainment and Energy Dissipation on Embankment Spillways, 2006), permite obtener mayores porcentajes de disipación de energía en comparación con vertederos escalonados tradicionales (diseño original en este estudio). Hay que tener en cuenta que las investigaciones realizadas por Gonzalez & Chanson (2006), fueron para rápidas cuyas dimensiones de altura (contrahuella) y longitud (huella) de escalón fue de $h = 0.10$ m y $l = 0.25$ respectivamente, la inclinación de la rápida fue de 21.8° y el ancho de la misma de 1 m.

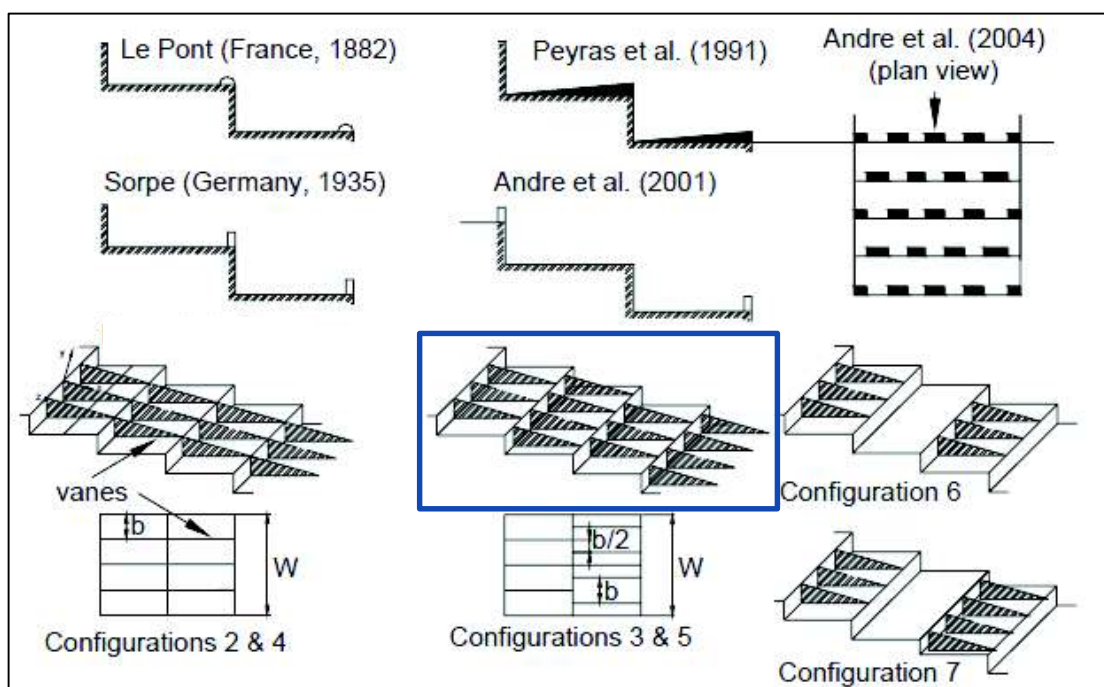
Una vez construida la propuesta de optimización, debe verificarse si dichos porcentajes de disipación de energía aumentan para el caso de este estudio en el cual se tiene una rápida escalonada con inclinación de 45° cuyos escalones son de 5cm de huella y 5cm de contrahuella y altura total de la rápida de 4,52 m. Dado que las estructuras adicionales colocados sobre el perfil escalonado y que son tomados de la literatura técnica no son para rápidas escalonadas a 45° se busca analizar la influencia de estas estructuras adicionales en la disipación de energía continua a lo largo de la rápida para este caso particular.

4.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN

En general los disipadores de energía son útiles porque como su nombre mismo lo indica, disipan el exceso de energía que posee la masa de agua, con lo cual se previenen daños por erosión en las estructuras o cauces que reciben la descarga de la misma.

Actualmente la mayoría de los aliviaderos escalonados han sido construidos de tal manera que su diseño se asemeja a una escalera; estudios recientes han sugerido diferentes configuraciones (**Figura No. 4.4**) a ser colocadas en los escalones de la rápida, para mejorar la tasa de disipación de energía (Andre et al., 2004, Chanson & González, 2004).

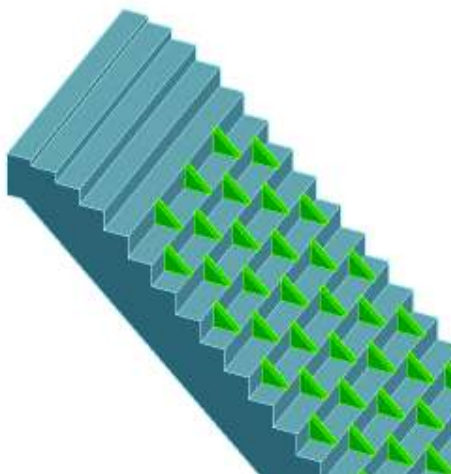
Figura No. 4.4: Modificaciones y propuestas de optimización para rápidas escalonadas, en cuanto a disipación de energía se refiere



Fuente: Gonzalez, C., & Chanson, H. (2006).

Con los resultados obtenidos en investigaciones anteriores, se determinó que la mayor resistencia del flujo y por ende la mayor tasa de disipación de energía se obtiene con configuraciones en zigzag (seleccionada de color azul en la **Figura No. 4.4**) bajo la condición de flujo rasante. Por tal motivo en la presente investigación se considera construir ese tipo de configuración, para así realizar el respectivo análisis experimental y verificar si para el tipo de rápida escalonada ($\alpha = 45^\circ$) en estudio, esa consideración es aplicable.

Figura No. 4.5: Esquema tridimensional de la configuración tipo zigzag implementada en la rápida escalonada a 45°



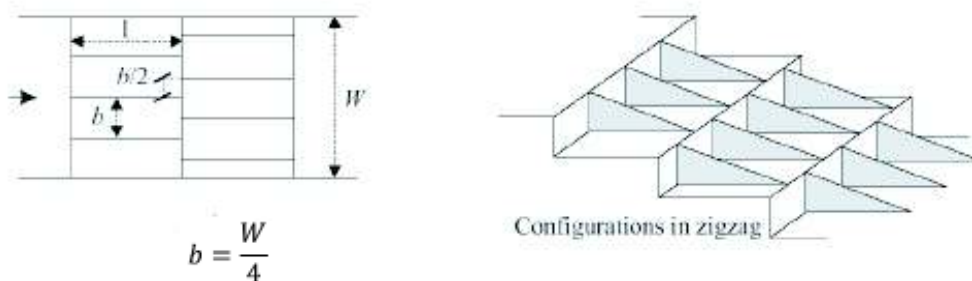
Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Como se puede observar en la **Figura No. 4.5**, no se colocan tabiques triangulares en los 5 primeros escalones (Perfil hidrodinámico con escalones de altura variable) ya que estos poseen diferente tamaño de contrahuella. Las estructuras adicionales se empiezan a colocar a partir del escalón 6 en el cual $h = l = 5$ cm, por lo tanto, $h/l = 1$ (donde h : contrahuella y l : huella).

4.3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS TABIQUES TRIANGULARES

El dimensionamiento de este tipo de tabique y su ubicación en la rápida escalonada, se realiza con base en las relaciones disponibles en la literatura técnica (Gonzalez & Chanson, 2006), como se indica a continuación:

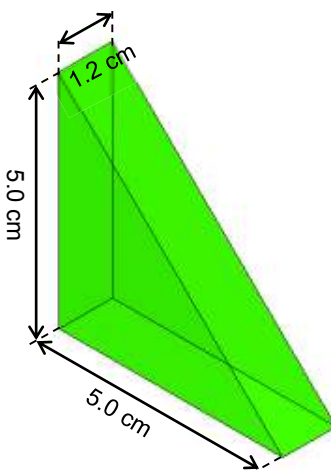
Figura No. 4.6: Dimensionamiento de la propuesta de optimización con tabiques triangulares



Fuente: Gonzalez, C., & Chanson, H. (2006).

En la **Figura No. 4.7**, **Figura No. 4.8** y en el **Cuadro No. 4.7**, se indican las dimensiones que poseen los tabiques triangulares y las respectivas distancias con las cuales serán colocados en la rápida escalonada.

Figura No. 4.7: Dimensiones del tabique triangular



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Cuadro No. 4.7: Distancias a las cuales son colocados los tabiques triangulares (Vista en Planta)

TABIQUES TRIANGULARES		
Parámetro	Unidad	Dimensión
B	(cm)	51,8
b_e	(cm)	12,0
$b_{e'}$	(cm)	5,5
l	(cm)	5,0
t	(cm)	1,2
n	u	308

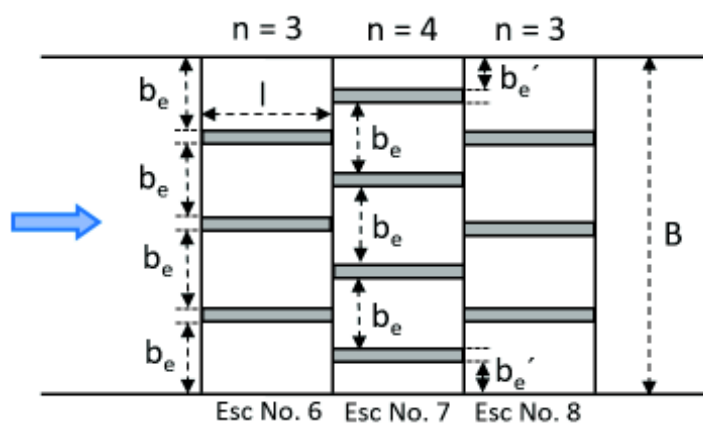
Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Dónde:

n: Número de tabiques triangulares colocados conforme a la distribución de zigzag a lo largo de toda la rápida escalonada (u)

t: Espesor de los tabiques triangulares (cm)

Figura No. 4.8: Esquema en planta de la distribución en zigzag de los tabiques triangulares



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

4.3.3 CONSTRUCCIÓN DE LA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN

Se indica en las siguientes fotografías, la implantación de los tabiques triangulares a lo largo de toda la rápida escalonada.

Fotografía No. 4.37: Colocación de tabiques triangulares a lo largo de toda la rápida escalonada



Con más detalle se muestra todo el proceso constructivo de la propuesta de modificación en el perfil escalonado en el **Anexo No. 6**.

4.3.4 PLAN DE PRUEBAS CORRESPONDIENTE AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL CON DISEÑO MODIFICADO

El plan de pruebas para el diseño modificado debe tener correspondencia con el plan de pruebas detallado en el **Cuadro No. 3.20** para el diseño original, puesto que de esta manera es posible realizar una comparación de resultados entre ambos diseños.

Cuadro No. 4.8: Plan de pruebas Diseño Modificado

PRUEBA No.	CAUDAL EXPERIMENTAL (DISEÑO ORIGINAL) (l/s)	CAUDAL EXPERIMENTAL (DISEÑO MODIFICADO) (l/s)	OBSERVACIONES
P0	14.23	14.42	Caudal mínimo (para cumplir con la condición de flujo rasante)
P1	23.37	23.51	Caudal bajo (Aprox. 30% del caudal de diseño de la instalación experimental)
P2	33.89	33.72	Caudal bajo (Aprox. 40% del caudal de diseño de la instalación experimental)
P3	44.44	44.42	Caudal intermedio (Aprox. 50% del caudal de diseño de la instalación experimental)
P4	55.82	55.59	Caudal alto (Aprox. 70% del caudal de diseño de la instalación experimental)
P5	77.86	78.34	Caudal máximo (caudal de diseño de la instalación experimental)

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

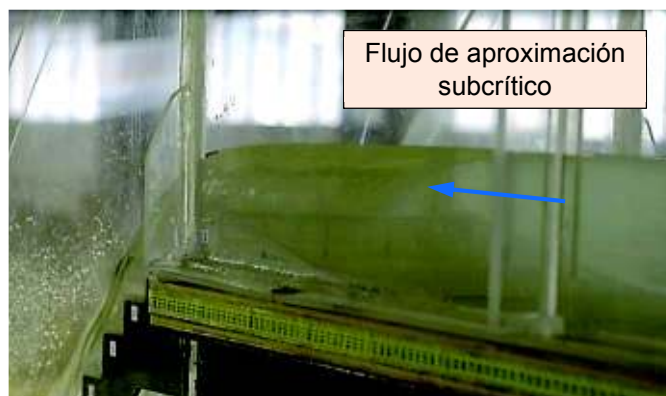
4.4 RESULTADOS OBTENIDOS: DISEÑO MODIFICADO

4.4.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO

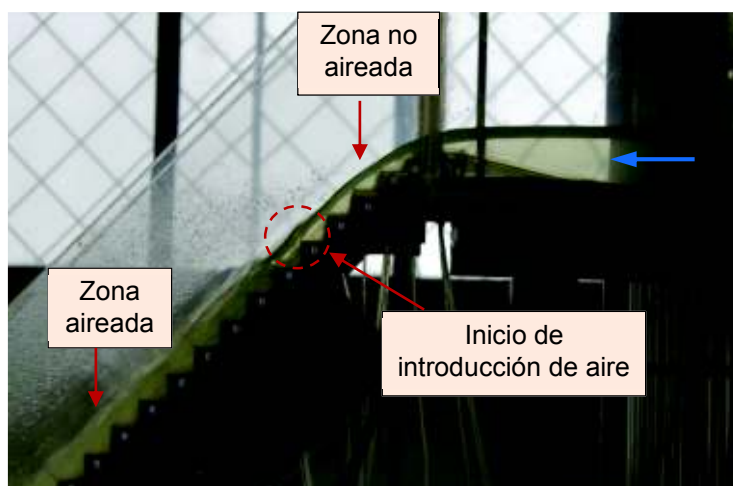
En las siguientes fotografías se observan las principales características del comportamiento hidráulico del flujo sobre la rápida escalonada correspondientes al plan de pruebas propuesto en el **Cuadro No. 4.8** para la operación de la Instalación Experimental con Diseño Modificado.

a) PRUEBA P0: $Q = 14.42$ l/s

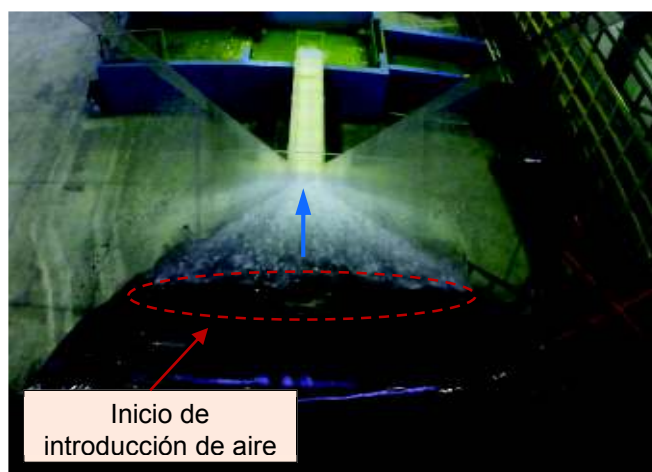
Fotografía No. 4.38: Prueba 0. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



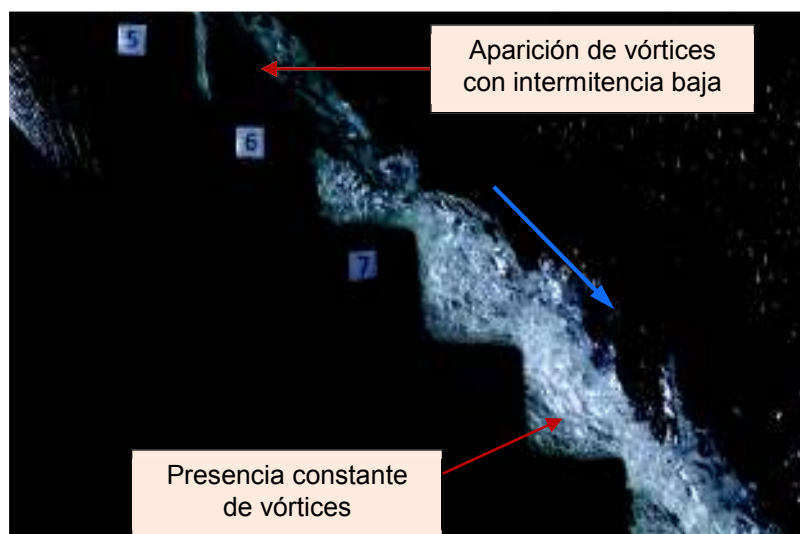
Fotografía No. 4.39: Prueba 0. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



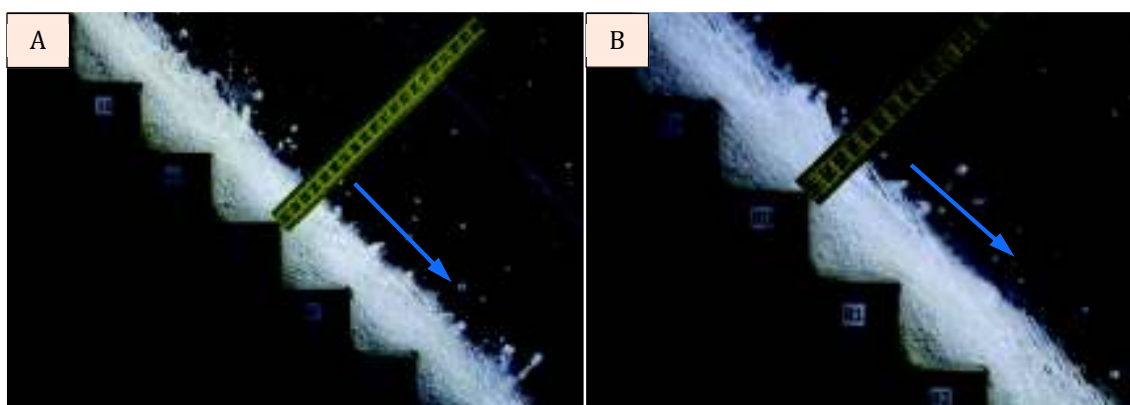
Fotografía No. 4.40: Prueba 0. Vista superior del inicio de la rápida escalonada



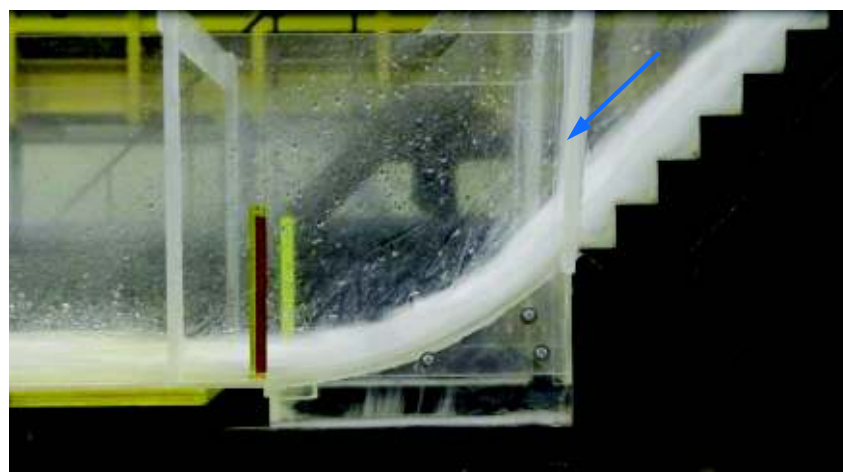
Fotografía No. 4.41: Prueba 0. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.42: Prueba 0. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme

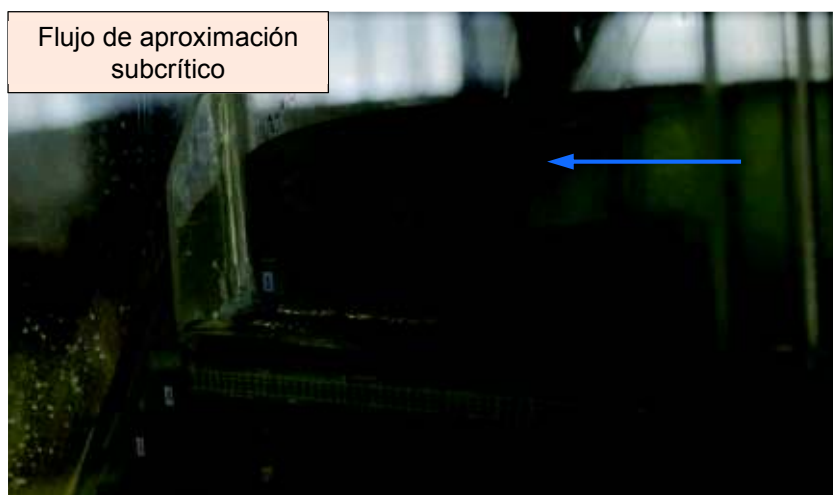
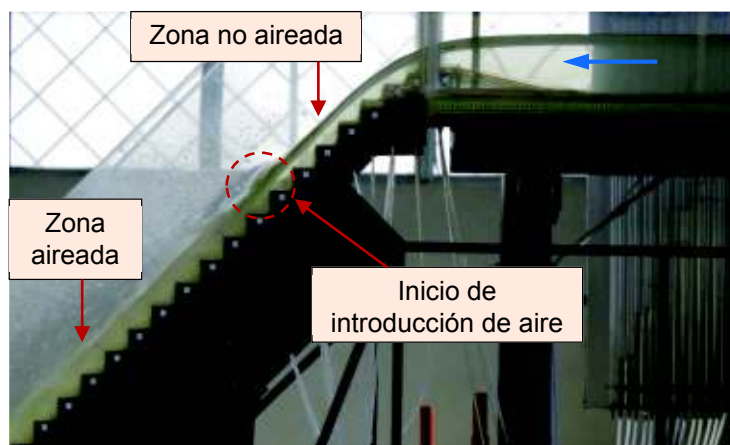
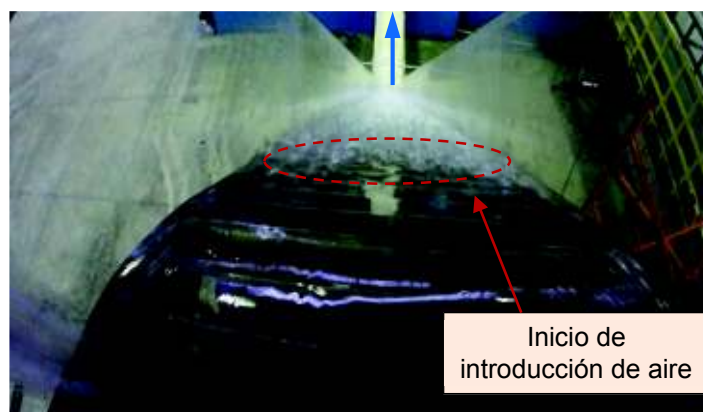


Fotografía No. 4.43: Prueba 0. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida

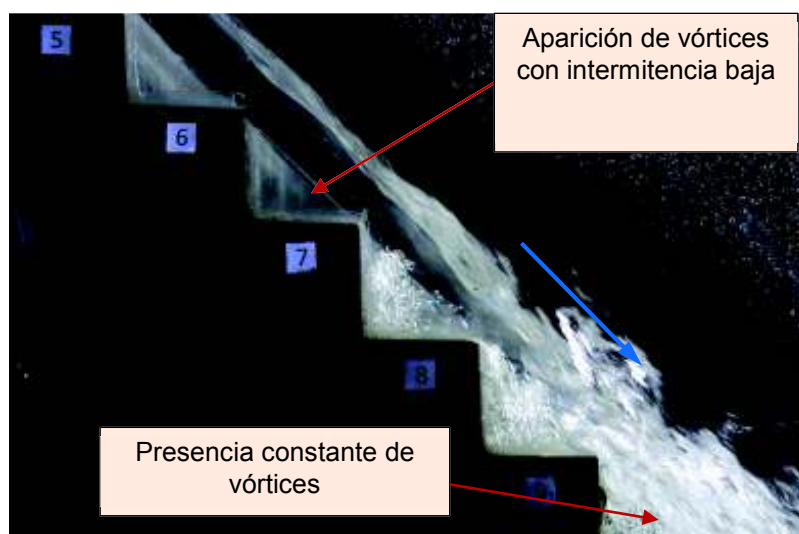


Observaciones:

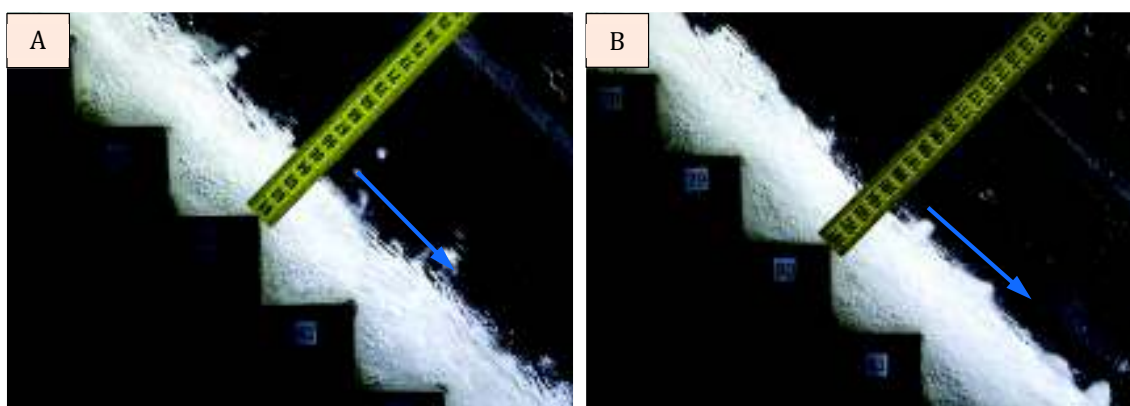
- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,24. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 11 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.38**.
- **Escalón No. 5:** Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón. Ver **Fotografía No. 4.39** y **Fotografía No. 4.41**.
- **Escalón No. 6:** Este escalón consta de tres tabiques triangulares y se observa la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades centrales la presencia de vórtices es esporádica. Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 2,2$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,36$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.41**.
- **Escalón No. 7:** Está conformado por cuatro tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, en las dos cavidades subsiguientes la presencia de vórtices es esporádica y en la cavidad central no existe la formación del vórtice de eje horizontal. Ver **Fotografía No. 4.41**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia medido desde la cresta de 5,59 m y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado. En comparación con el diseño original se puede apreciar un aumento del volumen del flujo rasante a lo largo del perfil escalonado debido a la presencia de los tabiques triangulares. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 3,0$ cm. Ver **Fotografía No. 4.42**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 2,5$ cm. Se aprecia en el flujo un aumento de volumen del flujo bifásico y mayor velocidad en el canal de salida en comparación con el diseño original. Ver **Fotografía No. 4.43**.

b) PRUEBA P1: $Q = 23.51$ l/s**Fotografía No. 4.44:** Prueba 1. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada**Fotografía No. 4.45:** Prueba 1. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire**Fotografía No. 4.46:** Prueba 1. Vista superior del inicio de la rápida escalonada

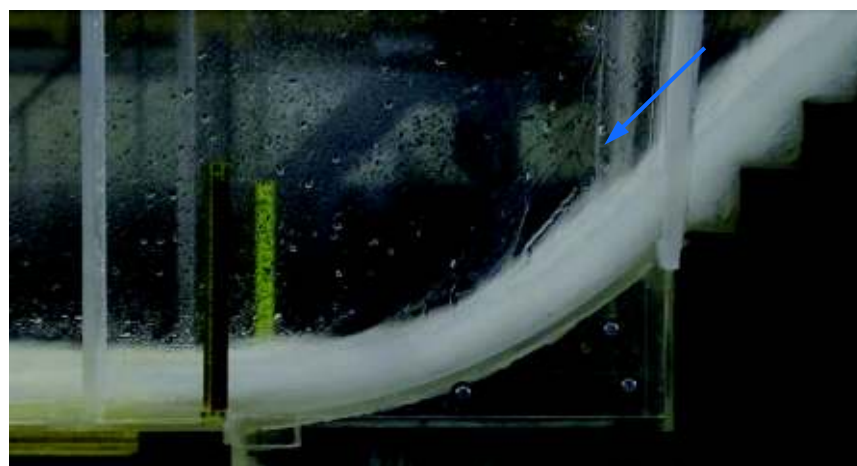
Fotografía No. 4.47: Prueba 1. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.48: Prueba 1. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.49: Prueba 1. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida

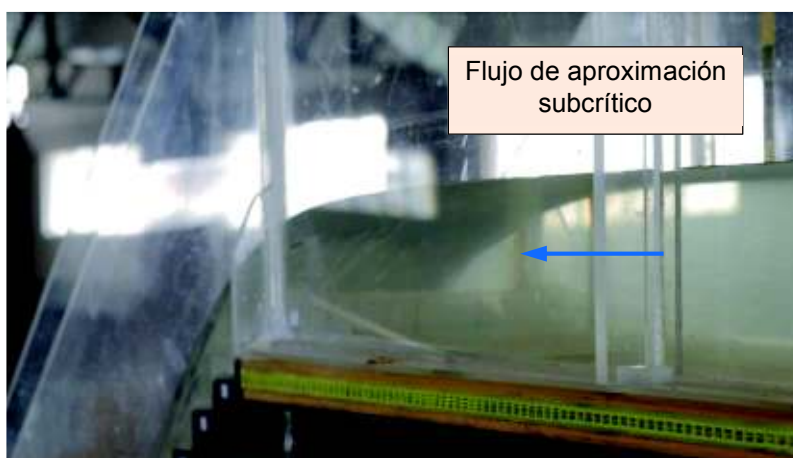


Observaciones:

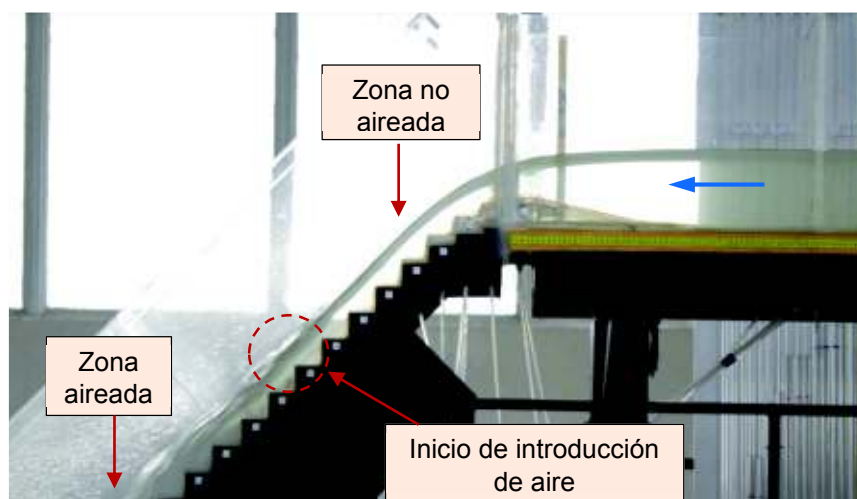
- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,31. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 13,1 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.44**.
- **Escalón No. 7:** Este escalón consta con cuatro tabiques triangulares. Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón. Ver **Fotografía No. 4.45** y **Fotografía No. 4.47**.
- **Escalón No. 8:** Este escalón consta de tres tabiques triangulares y se observa la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades centrales la presencia de vórtices es esporádica. Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 2,6$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,50$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.47**.
- **Escalón No. 9:** Está conformado por cuatro tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, en las dos cavidades subsiguientes la presencia de vórtices es esporádica y en la cavidad central no existe la formación del vórtice de eje horizontal. Ver **Fotografía No. 4.47**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia medido desde la cresta de 5,59 m y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado. En comparación con el diseño original se puede apreciar un aumento del volumen del flujo rasante a lo largo del perfil escalonado debido a la presencia de los tabiques triangulares. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 4,2$ cm. Ver **Fotografía No. 4.48**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 2,8$ cm. Se aprecia en el flujo un aumento de volumen del flujo bifásico y mayor velocidad en el canal de salida en comparación con el diseño original. Ver **Fotografía No. 4.49**.

c) PRUEBA P2: $Q = 33.72$ l/s

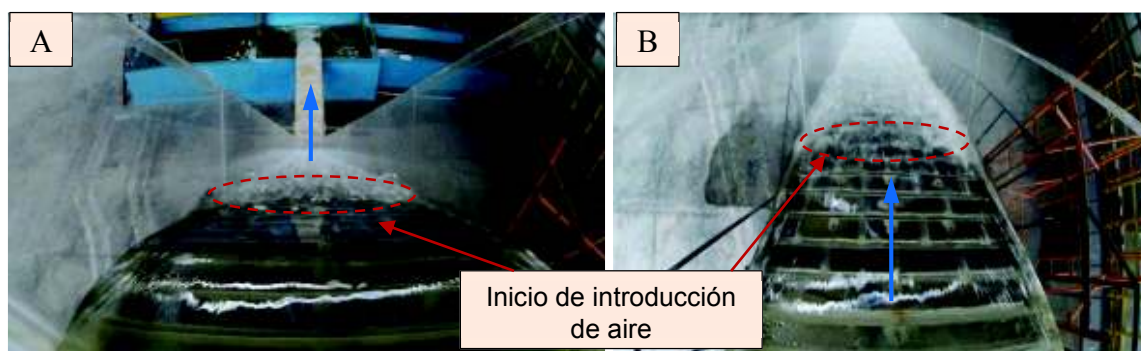
Fotografía No. 4.50: Prueba 2. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



Fotografía No. 4.51: Prueba 2. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



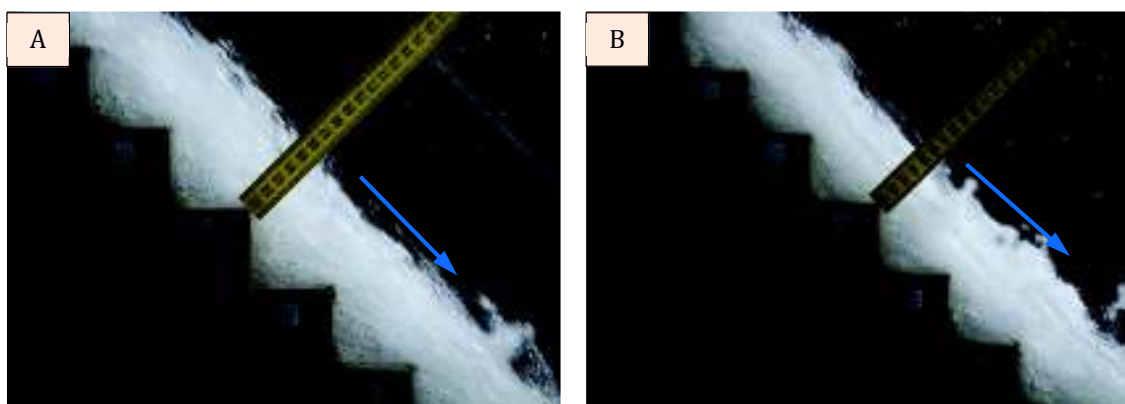
Fotografía No. 4.52: Prueba 2. (A) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (B) Identificación del inicio de autoaireación



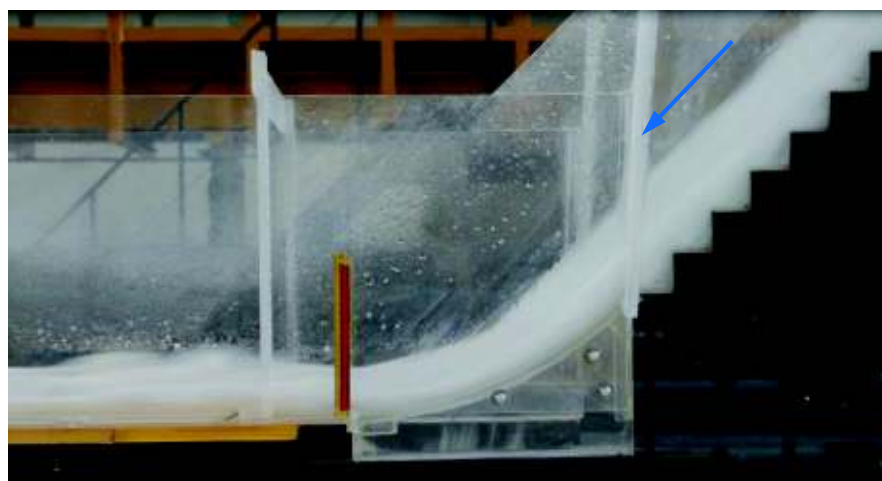
Fotografía No. 4.53: Prueba 2. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.54: Prueba 2. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.55: Prueba 2. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida

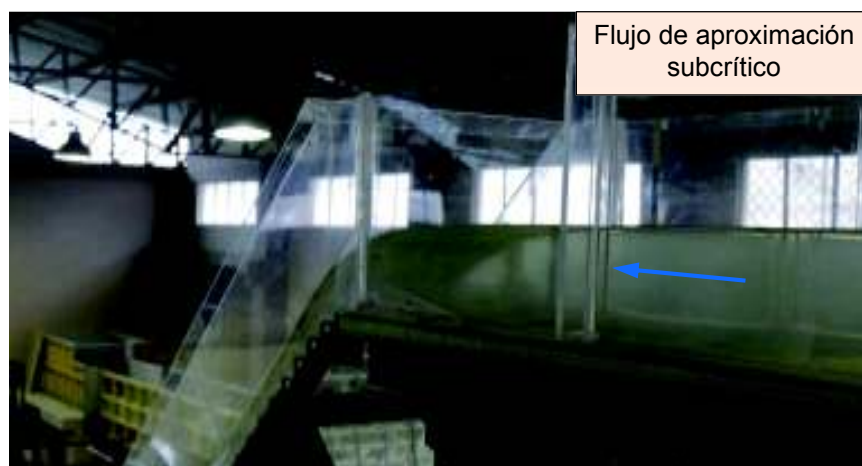


Observaciones:

- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,36. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 15 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.50**.
- **Escalón No. 8:** En este escalón se encuentran colocados 3 tabiques triangulares. Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón. Ver **Fotografía No. 4.51** y **Fotografía No. 4.53**.
- **Escalón No. 9:** Está conformado por cuatro tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades subsiguientes la presencia de vórtices es esporádica y en la cavidad central no existe formación de vórtices. Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 2,7$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,57$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.53**.
- **Escalón No. 10:** Está conformado por tres tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades centrales la presencia de vórtices es esporádica. Ver **Fotografía No. 4.53**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia medido desde la cresta de 5,59 m y a un desnivel de 3,87 m. Este tramo se encuentra en la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado. En comparación con el diseño original se puede apreciar un aumento del volumen del flujo rasante a lo largo del perfil escalonado debido a la presencia de los tabiques triangulares. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 5,5$ cm. Ver **Fotografía No. 4.54**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 3,7$ cm. Se aprecia en el flujo un aumento de volumen del flujo bifásico y mayor velocidad en el canal de salida en comparación con el diseño original. Ver **Fotografía No. 4.55**.

d) PRUEBA P3: $Q = 44.42 \text{ l/s}$

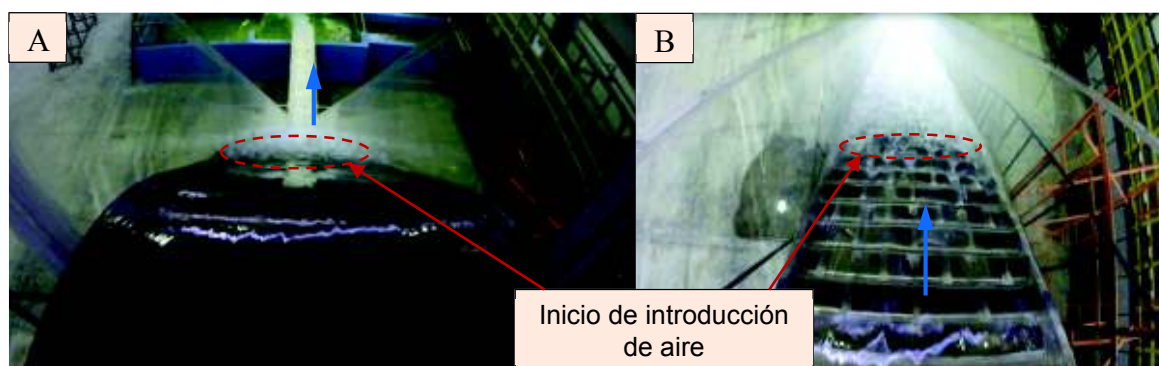
Fotografía No. 4.56: Prueba 3. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



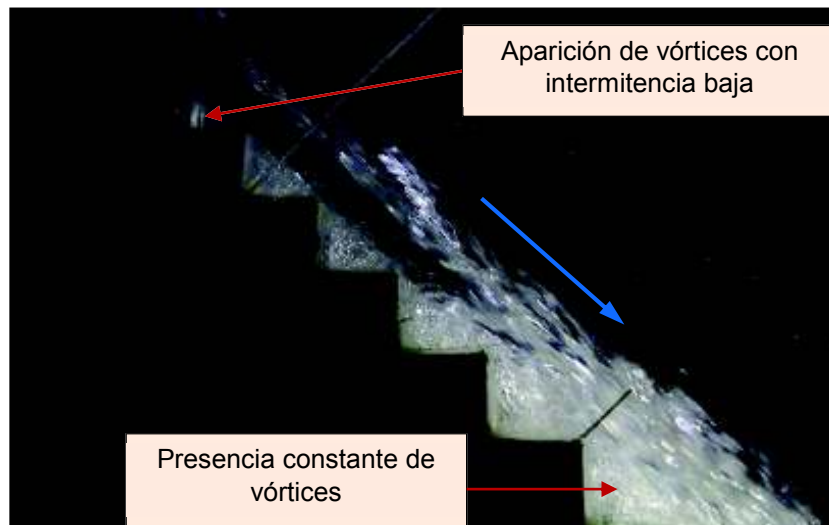
Fotografía No. 4.57: Prueba 3. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



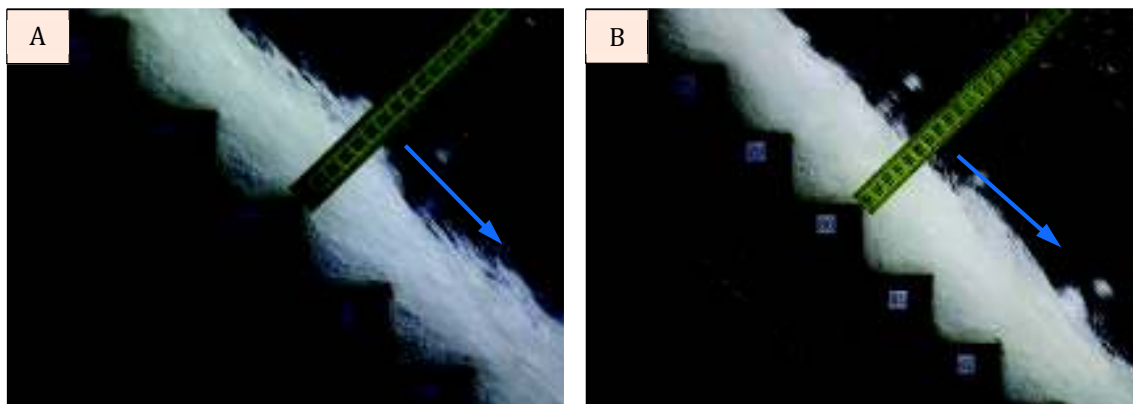
Fotografía No. 4.58: Prueba 3. (A) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (B) Identificación del inicio de autoaireación



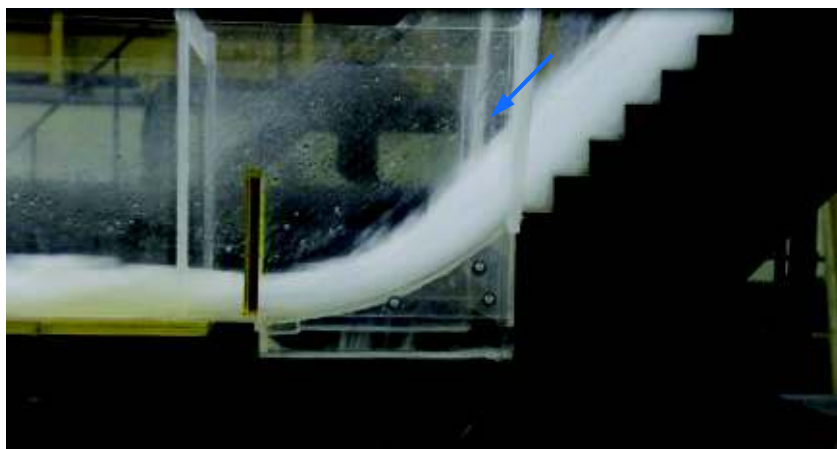
Fotografía No. 4.59: Prueba 3. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.60: Prueba 3. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.61: Prueba 3. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida

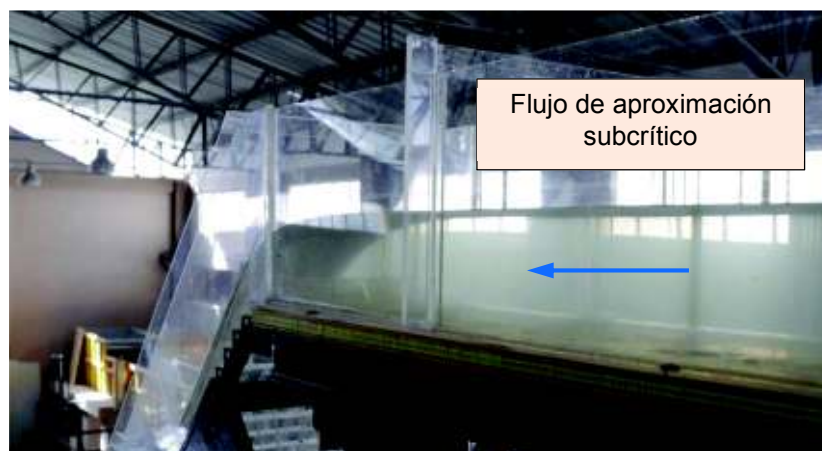


Observaciones:

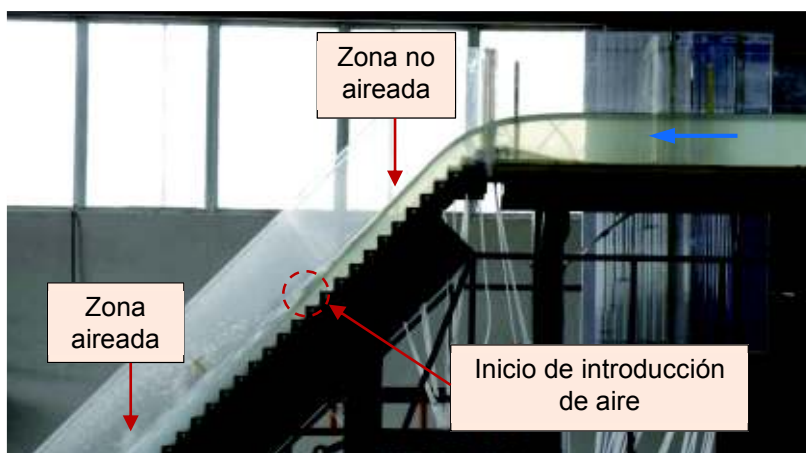
- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,41. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 16,6 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.56**.
- **Escalón No. 10:** Está conformado por 3 tabiques triangulares. Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón. Ver **Fotografía No. 4.57** y **Fotografía No. 4.59**.
- **Escalón No. 11:** Está conformado por cuatro tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades subsiguientes la presencia de vórtices es esporádica y en la cavidad central no existe formación de vórtices. Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 4,5$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,71$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.59**.
- **Escalón No. 12:** Está conformado por tres tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades centrales la presencia de vórtices es esporádica. Ver **Fotografía No. 4.59**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia medido desde la cresta de 5,59 m y a un desnivel de 3,87 m. En este tramo se alcanza la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado. En comparación con el diseño original se puede apreciar un aumento del volumen del flujo rasante a lo largo del perfil escalonado debido a la presencia de los tabiques triangulares. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 6,6$ cm. Ver **Fotografía No. 4.60**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 4,2$ cm. Se aprecia en el flujo un aumento de volumen del flujo bifásico y mayor velocidad en el canal de salida en comparación con el diseño original. Ver **Fotografía No. 4.61**.

e) PRUEBA P4: $Q = 55.59$ l/s

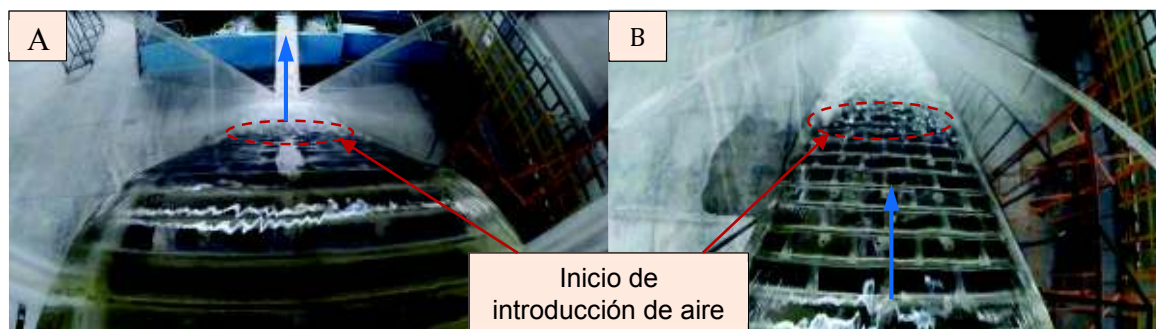
Fotografía No. 4.62: Prueba 4. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



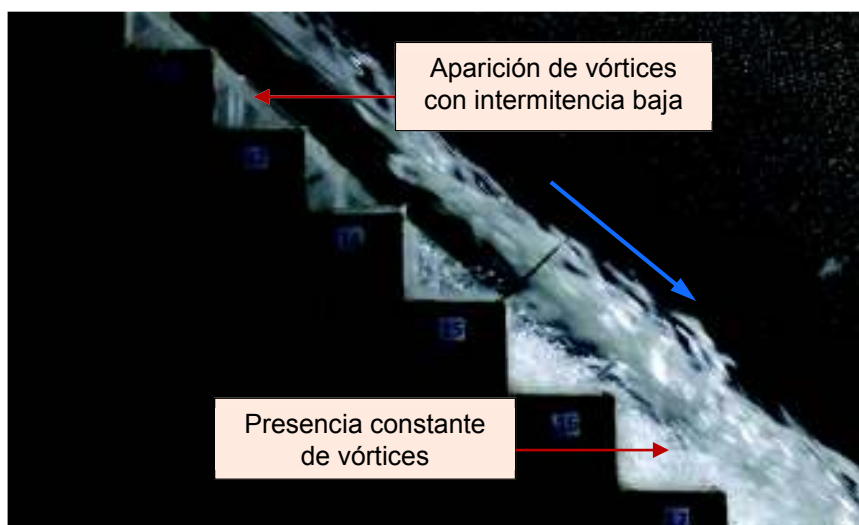
Fotografía No. 4.63: Prueba 4. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



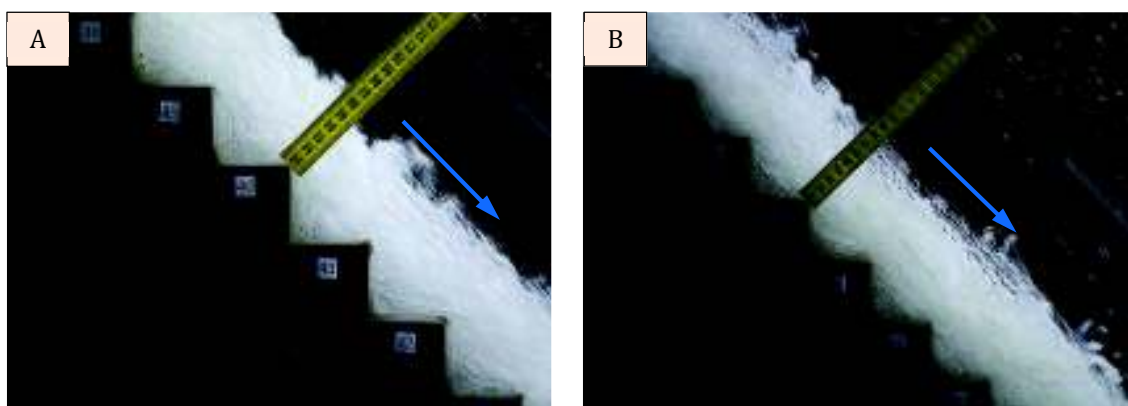
Fotografía No. 4.64: Prueba 4. (A) Vista superior del inicio de la rápida escalonada y (B) Identificación del inicio de autoaireación



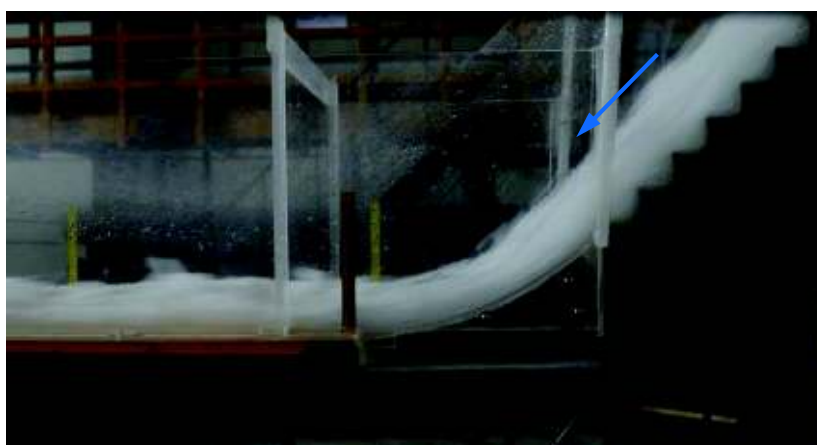
Fotografía No. 4.65: Prueba 4. Vista lateral derecha. Identificación de la presencia de vórtices



Fotografía No. 4.66: Prueba 4. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.67: Prueba 4. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida

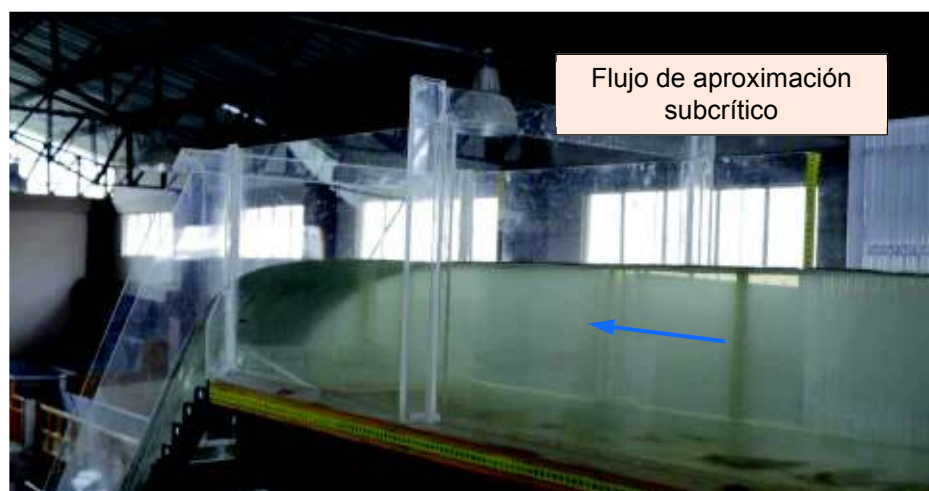


Observaciones:

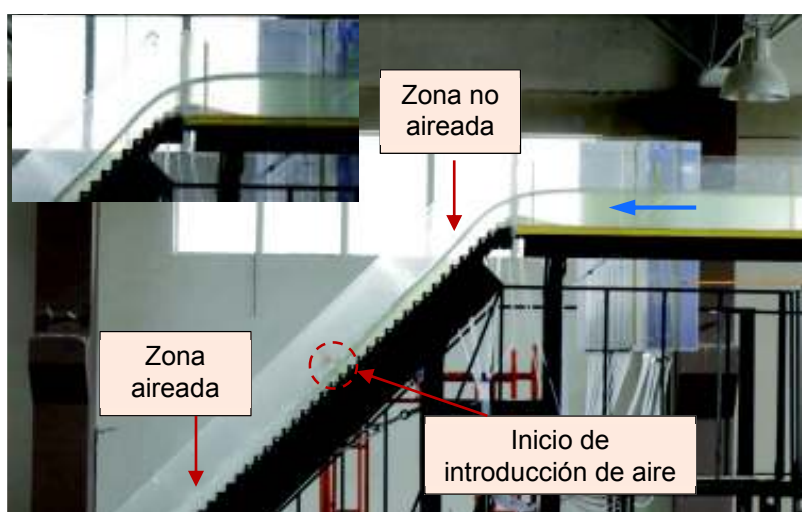
- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,44. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 18,2 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.62**.
- **Escalón No. 12:** Está conformado por 3 tabiques triangulares. Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón. Ver **Fotografía No. 4.63** y **Fotografía No. 4.65**.
- **Escalón No. 13:** Está conformado por cuatro tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades subsiguientes la presencia de vórtices es esporádica y en la cavidad central no existe formación de vórtices. Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo desciende por la rápida escalonada. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 4,5$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 0,85$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.65**.
- **Escalón No. 14:** Está conformado por tres tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades centrales la presencia de vórtices es esporádica. Ver **Fotografía No. 4.65**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia medido desde la cresta de 5,59 m y a un desnivel de 3,87 m. En este tramo se alcanza la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado. En comparación con el diseño original se puede apreciar un aumento del volumen del flujo rasante a lo largo del perfil escalonado debido a la presencia de los tabiques triangulares. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 7,3$ cm. Ver **Fotografía No. 4.66**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 5,2$ cm. Se aprecia en el flujo un aumento de volumen del flujo bifásico y mayor velocidad en el canal de salida en comparación con el diseño original. Ver **Fotografía No. 4.67**.

f) PRUEBA P5: $Q = 78.34 \text{ l/s}$

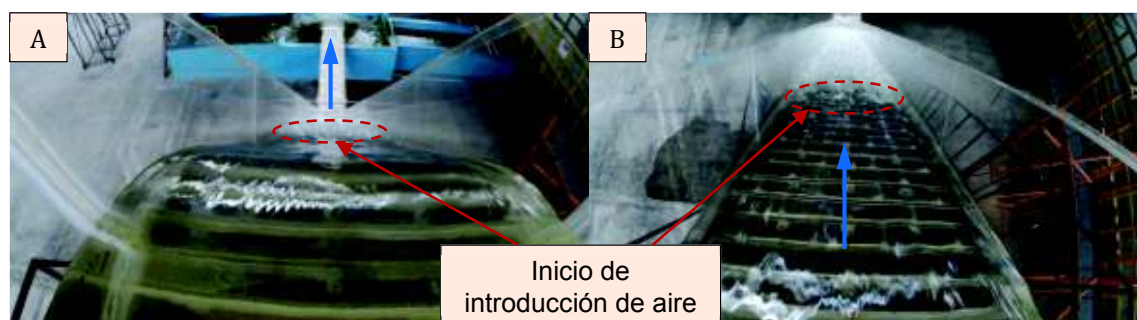
Fotografía No. 4.68: Prueba 5. Vista lateral izquierda del tramo de aproximación hacia la rápida escalonada



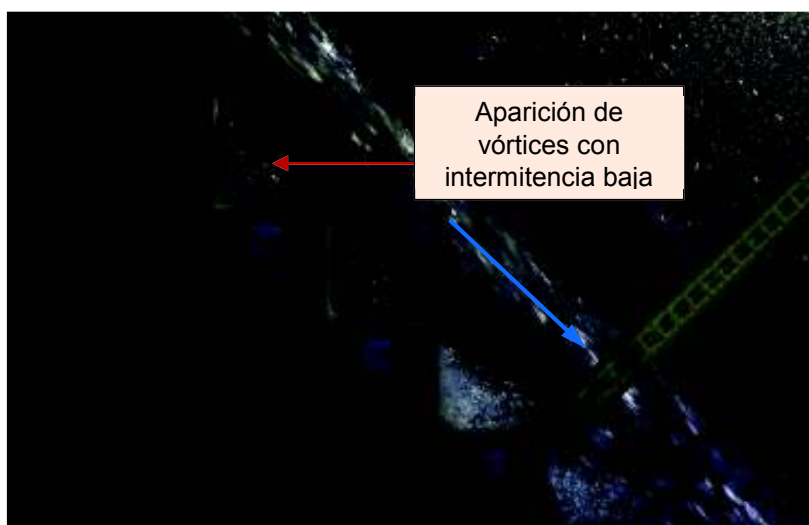
Fotografía No. 4.69: Prueba 5. Vista lateral izquierda del inicio de la rápida escalonada, se puede observar el comienzo de la introducción de aire



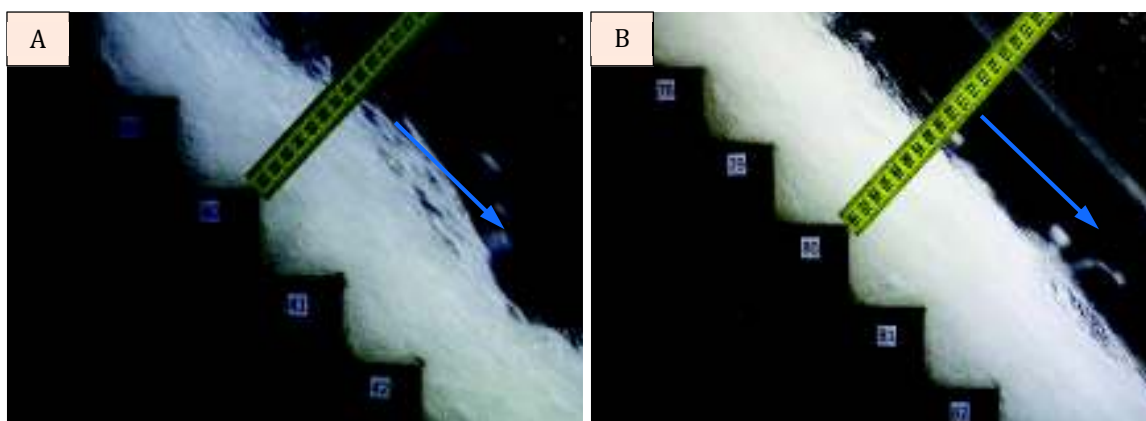
Fotografía No. 4.70: Prueba 5. (A) Vista frontal y (B) Vista superior del inicio de la rápida escalonada



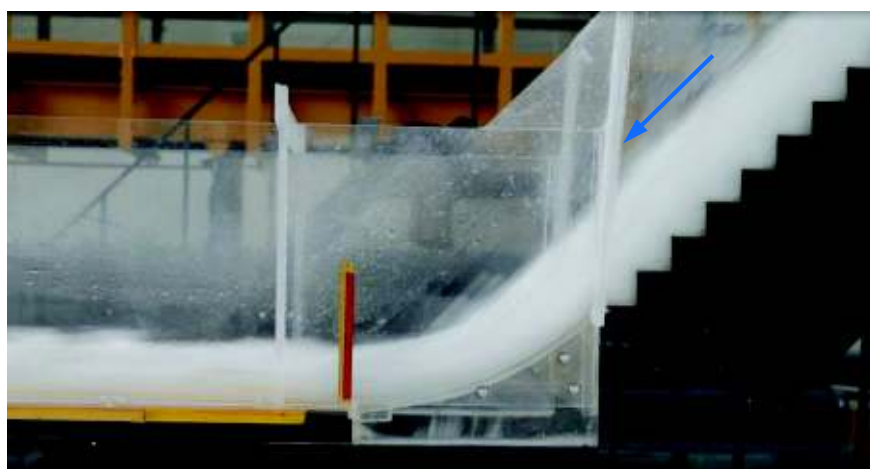
Fotografía No. 4.71: Prueba 5. Vista lateral derecha. Identificación del inicio de la formación de vórtices



Fotografía No. 4.72: Prueba 5. Vista lateral derecha. (A) Flujo completamente aireado y (B) Flujo aireado en estado de equilibrio o uniforme



Fotografía No. 4.73: Prueba 5. Vista lateral izquierda, inicio del canal de salida



Observaciones:

- **Canal de aproximación:** El flujo es subcrítico con un número de Froude de 0,51. A una distancia de 29,5 cm, medido desde la cresta de la rápida hacia aguas arriba, la profundidad del flujo en el canal es de 20,8 cm. En la superficie libre del flujo no existe presencia de ondas. Ver **Fotografía No. 4.68**.
- **Escalón No. 17:** Está conformado por 4 tabiques triangulares. Se observa el crecimiento de la capa límite y, por lo tanto, el inicio de la formación de vórtices en las cavidades de los escalones caracterizado como intermitencia baja a partir de este escalón. Ver Fotografía No. 4.69 y **Fotografía No. 4.71**.
- **Escalón No. 18:** Está conformado por tres tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, mientras que en las cavidades centrales la presencia de vórtices es esporádica. Se tiene un flujo aireado, con introducción y transporte de aire que va en aumento conforme el flujo descende por la rápida escalonada. El valor experimental medido de la profundidad del flujo en este punto es $y_i = 6,2$ cm y se desarrolla a una distancia $L_i = 1,20$ m medida desde la cresta de la rápida. Ver **Fotografía No. 4.71**.
- **Escalón No. 19:** Está conformado por cuatro tabiques triangulares y su presencia genera la formación constante de vórtices en las cavidades laterales, en las 2 cavidades subsiguientes la presencia de vórtices es esporádica y en la cavidad central no existe formación de vórtices. Ver **Fotografía No. 4.71**.
- **Tramo final de la rápida, escalón (80-93):** El inicio de este tramo se encuentra a una distancia medido desde la cresta de 5,59 m y a un desnivel de 3,87 m. En este tramo se alcanza la región uniforme, por tal motivo, el flujo es totalmente aireado. En comparación con el diseño original se puede apreciar un aumento del volumen del flujo rasante a lo largo del perfil escalonado debido a la presencia de los tabiques triangulares. El valor experimental medido de la profundidad del flujo bifásico en esta zona es $y_u = 8,5$ cm. Ver **Fotografía No. 4.72**.
- **Canal de salida:** Flujo bifásico altamente turbulento. La profundidad del flujo en la entrada del canal, es decir al final del tramo curvo que une a la rápida con el canal es $y_u = 6,5$ cm. Se aprecia en el flujo un aumento de volumen del flujo bifásico y mayor velocidad en el canal de salida en comparación con el diseño original. Ver **Fotografía No. 4.73**.

4.4.2 CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE EN LA REGION UNIFORME: DISEÑO MODIFICADO

Al igual que en el diseño original, se calculó la concentración media de aire en la región uniforme siguiendo la metodología planteada en el literal 4.2.2, obteniendo para la rápida con diseño modificado los siguientes resultados:

Cuadro No. 4.9: Resultados obtenidos a partir de la modelación numérica en ANSYS y comparación con los resultados obtenidos mediante el análisis experimental para el diseño modificado

COMPARACIÓN DE RESULTADOS					
Prueba No.	Caudal	MODELO NUMÉRICO		INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	
		Velocidad del flujo al pie de la rápida escalonada	Profundidad del flujo bifásico al pie de la rápida	Profundidad del flujo bifásico al pie de la rápida.	Desviación (Profundidad)
-	Q	V_m	Y_u	y_u	e
	l/s	m/s	m	m	%
P0 - DM	14,42	3,61	0,023	0,025	11,1
P1 - DM	23,51	4,30	0,028	0,028	0,0
P2 - DM	33,72	4,87	0,032	0,037	17,5
P3 - DM	44,42	5,13	0,043	0,042	2,6
P4 - DM	55,59	5,59	0,045	0,052	15,6
P5 - DM	78,34	6,83	0,051	0,065	27,5

Elaborado por: Equipo de Investigación PIMI 16 06 – CIERHI EPN

Cuadro No. 4.10: Determinación de la concentración media de aire con diseño modificado

Prueba No.	Caudal Q	Caudal Q	Caudal Unitario q	V_w (Modelo Numérico)	Profundidad de agua clara y_w (Modelo Numérico – Calculado con la Ec. 4.1)	y_u Profundidad del flujo bifásico al pie de la rápida. (Instalación Experimental)	Concentración media de aire
	(l/s)	(m ³ /s)	(m ³ /s.m)	(m/s)	(cm)	(cm)	-
P0 - DM	14,42	0,014	0,028	3,61	0,77	2,5	0,692
P1 - DM	23,51	0,024	0,045	4,30	1,06	2,8	0,623
P2 - DM	33,72	0,034	0,065	4,87	1,34	3,7	0,639
P3 - DM	44,42	0,044	0,086	5,13	1,67	4,2	0,602
P4 - DM	55,59	0,056	0,107	5,59	1,92	5,2	0,631
P5 - DM	78,34	0,078	0,151	6,83	2,21	6,5	0,659

C_m	0,641
-------	-------

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

El promedio de la concentración media de aire para los caudales de operación en esta fase de estudio es de 0.641, este resultado es mayor que el valor promedio determinado para el análisis con diseño original el cual se obtuvo un promedio de la concentración media de aire igual a 0.532.

4.4.3 FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY – WEISBACH EN LA REGIÓN UNIFORME: DISEÑO MODIFICADO

Siguiendo el método de cálculo descrito en el literal 4.2.3 para el diseño original, con el diseño modificado de la rápida escalonada se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro No. 4.11: Factor de Fricción de Darcy - Weisbach para flujo bifásico con diseño modificado

Número de Prueba	Caudal	Caudal Unitario	Ángulo de Inclinación de la Rápida	Concentración media de aire	Profundidad del flujo bifásico (Escalón No 80 a 93)	Profundidad de agua clara	Factor de fricción de Darcy (bifásico flujo aire-agua)
	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	α (°)	Cm	y _u (cm)	y _w (cm)	f _e
P0 - DM	14,42	0,028	45	0,641	3,00	1,08	0,09
P1 - DM	23,51	0,045			4,20	1,51	0,09
P2 - DM	33,72	0,065			5,50	1,97	0,10
P3 - DM	44,42	0,086			6,60	2,37	0,10
P4 - DM	55,59	0,107			7,30	2,62	0,09
P5 - DM	78,34	0,151			8,50	3,05	0,07

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Del **Cuadro No. 4.11**, se deduce que el rango del factor de fricción de Darcy – Weisbach en la región uniforme se encuentra entre 0.07 y 0.10 para la gama de caudales experimentados y representado por un valor medio de 0.19. Estos resultados obtenidos están dentro de los valores reportado en la literatura técnica Chanson, H., Bung, D., & Matos, J. (2015) y que corresponden a valores de factores de fricción en un rango de 0,06 a 1,1 para rápidas escalonadas con las siguientes características $\alpha > 10^\circ$; $h > 0.02$ m ; $Re > 1.10^5$.

4.4.4 DISIPACIÓN DE ENERGÍA: DISEÑO MODIFICADO

Al igual que en el diseño original, se mide la tasa de disipación de energía, a fin de comprobar si las modificaciones realizadas en la Instalación Experimental generan o no una mayor disipación de energía a lo largo de la rápida escalonada.

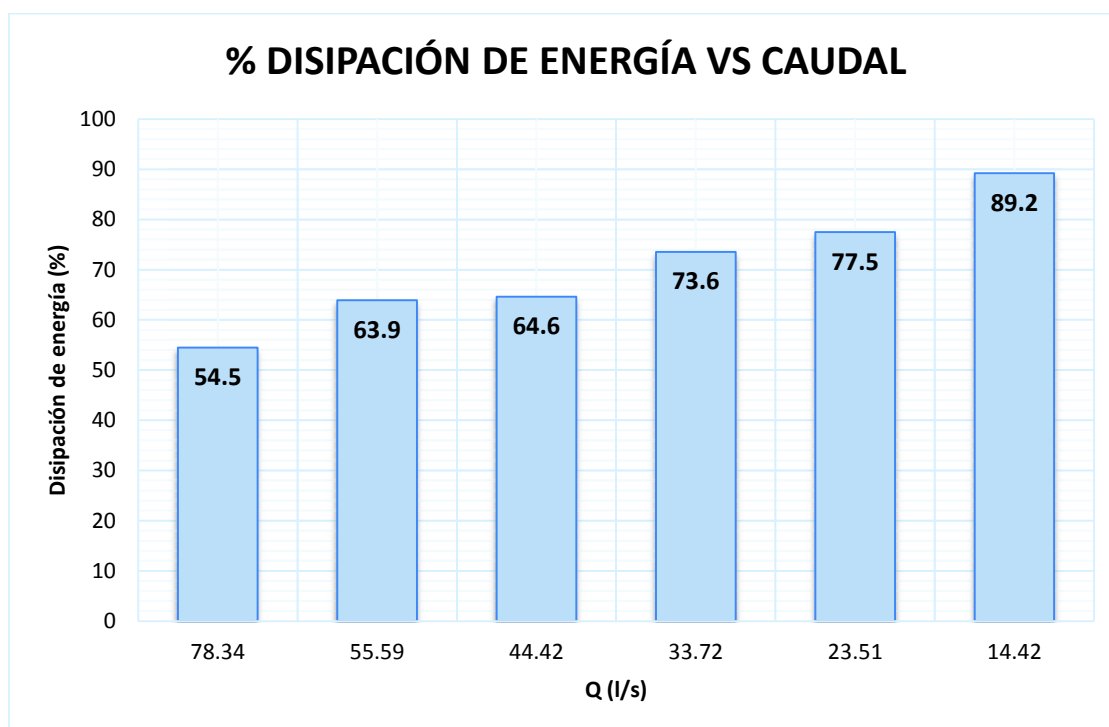
Usando la metodología descrita en el literal 4.2.4 con el diseño original, se obtiene para el diseño modificado los siguientes resultados:

Cuadro No. 4.12: Porcentaje de disipación de energía en la rápida escalonada para condiciones de flujo rasante. Diseño modificado

Número de Prueba	Caudal	Caudal Unitario	E. Canal de Aproximación	E. Canal de Salida	ΔE (m)	Disipación de Energía
	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	E ₁ (m)	E ₂ (m)	ΔE (m) = E ₁ -E ₂	$\Delta E/E_1$ (%)
P0 - DM	14,42	0,028	4,63	0,50	4,13	89,2
P1 - DM	23,51	0,045	4,66	1,05	3,61	77,5
P2 - DM	33,72	0,065	4,68	1,24	3,44	73,6
P3 - DM	44,42	0,086	4,70	1,66	3,04	64,6
P4 - DM	55,59	0,107	4,72	1,70	3,02	63,9
P5 - DM	78,34	0,151	4,76	2,16	2,59	54,5

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Gráfico No. 4.6: Porcentajes de disipación de energía para cada uno de los caudales establecidos en el plan de pruebas. Diseño modificado



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Según el **Cuadro No. 4.12** y el **Gráfico No. 4.6**, la rápida escalonada con la implementación de los tabiques triangulares, genera una disipación entre 54.5% y 89.2% para un rango de caudales unitarios de 0.028 a 0.15 (m³/s)/s. La disipación de energía al pie de la misma es baja para caudales altos, mientras que para caudales bajos el porcentaje de disipación de energía aumenta.

4.4.5 CURVAS ADIMENSIONALES: DISEÑO MODIFICADO

Usando la metodología detallada en el literal 4.2.5 para el diseño original, se procede a obtener las curvas adimensionales para el diseño modificado, con los mismos parámetros descritos en dicho literal, tanto para la zona no aireada como para la zona aireada.

a) ZONA NO AIREADA

De igual manera se realizan los respectivos cálculos y gráficos para las siguientes combinaciones de parámetros adimensionales:

$$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}} = \frac{L_i}{k_s} \quad \text{Ec. (4.16)}$$

$$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}} = \frac{y_i}{k_s} \quad \text{Ec. (4.17)}$$

Con la **Ec. (4.16)** y la **Ec. (4.17)** se analiza la tendencia y la variación de la longitud de inicio de la autoaireación (L_i) y la profundidad del flujo en el punto de inicio de la autoaireación natural (y_i) para el plan de pruebas establecido.

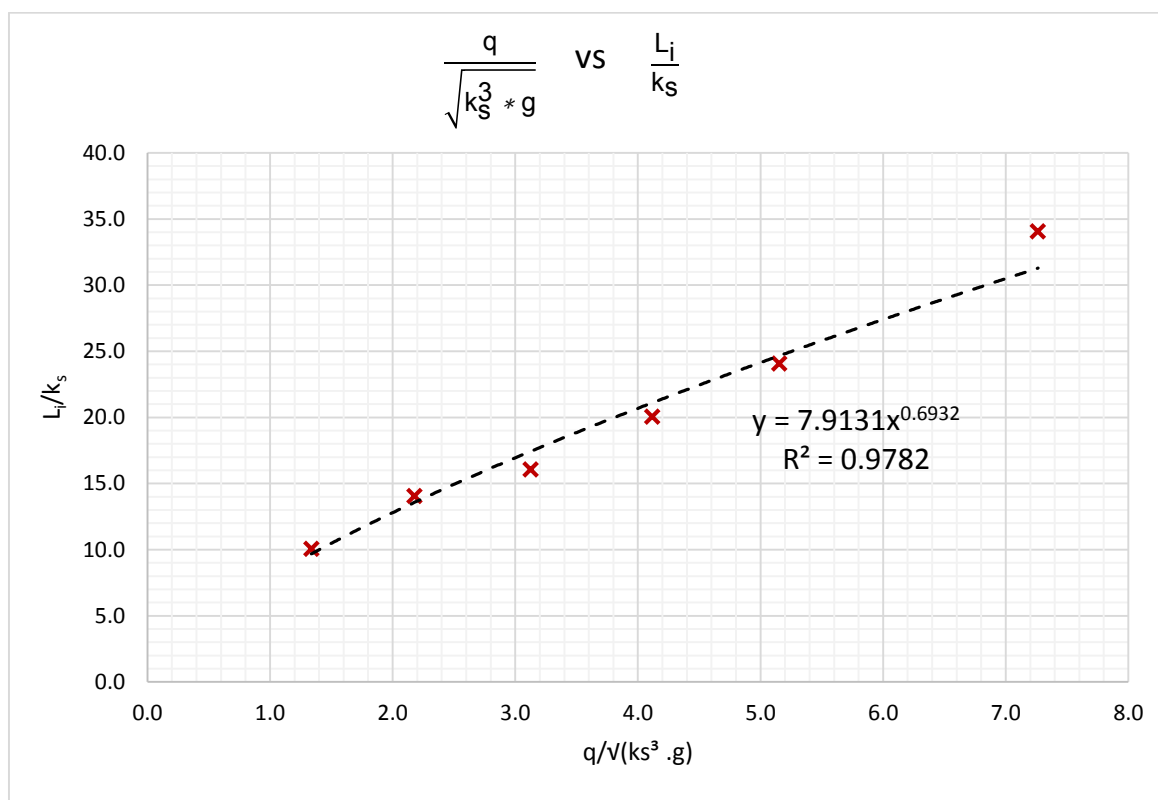
En el **Cuadro No. 4.13**, se presentan los calculo con base en los registros de datos experimentales obtenidos para cada caudal de operación.

Cuadro No. 4.13: Parámetros adimensionales para la zona no aireada. Diseño modificado

Número de Prueba	Q (l/s)	q (m ³ /s.m)	k _s (m)	g (m/s ²)	L _i (m)	y _i (cm)	$\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$	$\frac{L_i}{k_s}$	$\frac{y_i}{k_s}$
P5 – DM	78,34	0,151	0,035	9,81	1,20	6,2	7,3	34,1	1,7
P4 – DM	55,59	0,107			0,85	4,5	5,2	24,1	1,3
P3 – DM	44,42	0,086			0,71	4,5	4,1	20,1	1,3
P2 – DM	33,72	0,065			0,57	2,7	3,1	16,1	0,7
P1 – DM	23,51	0,045			0,50	2,6	2,2	14,1	0,7
P0 – DM	14,42	0,028			0,36	2,2	1,3	10,1	0,6

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Gráfico No. 4.7: Curva adimensional para la zona no aireada $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$ vs $\frac{L_i}{k_s}$

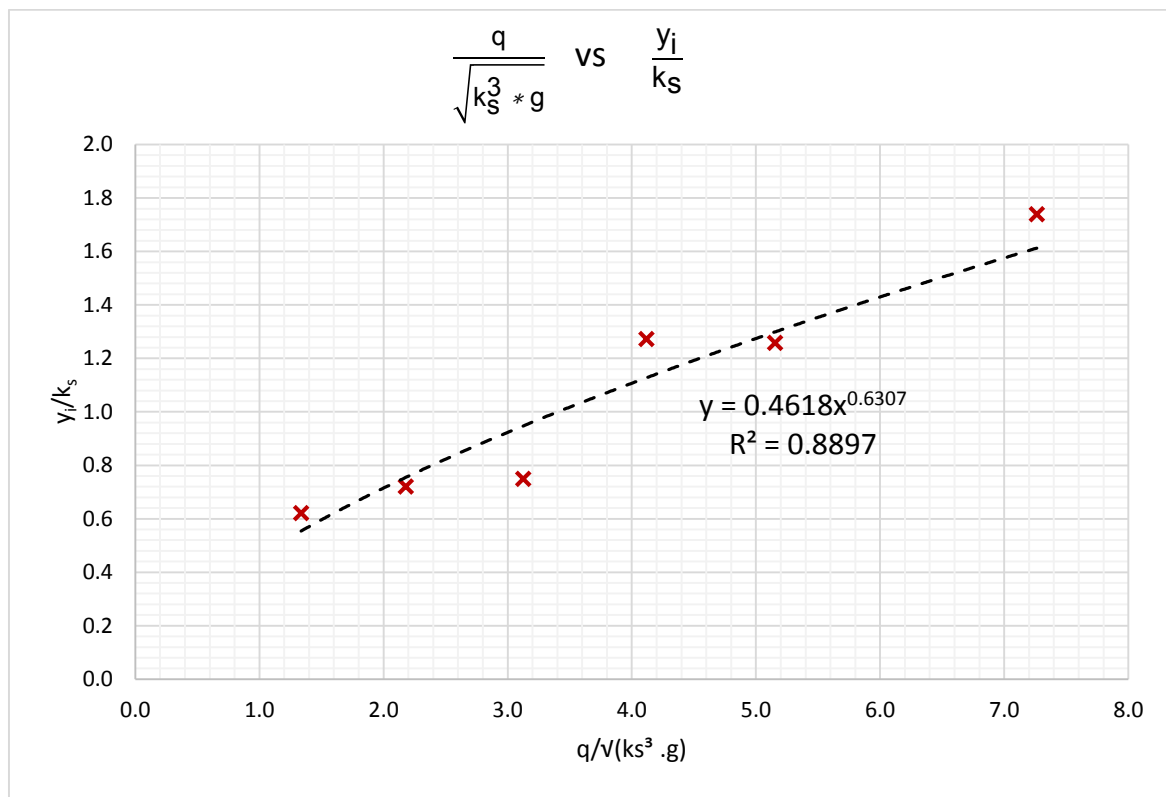


Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

$$\frac{L_i}{k_s} = 7.9131 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}} \right)^{0.6932} \quad \text{Ec. (4.18)}$$

La ecuación experimental **Ec. (4.18)**, obtenida a partir del **Gráfico No. 4.7** como resultado del análisis dimensional realizado a la zona no aireada del flujo rasante sobre la rápida escalonada con diseño modificado y con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9782$, permite determinar la longitud L_i medida desde la cresta de la rápida escalonada hacia aguas abajo, hasta el punto en donde inicia la introducción natural de aire. Además, se observa en el **Gráfico No. 4.7**, que cuando se incrementa la relación $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$, es decir, se incrementa el caudal unitario, la longitud de inicio de la autoaireación también aumenta, desplazándose hacia aguas abajo de la rápida escalonada.

Gráfico No. 4.8: Curva adimensional para la zona no aireada $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$ vs $\frac{y_i}{k_s}$



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

$$\frac{y_i}{k_s} = 0.4618 \left(\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}} \right)^{0.6307} \quad \text{Ec. (4.19)}$$

La ecuación experimental **Ec. (4.19)**, obtenida a partir del **Gráfico No. 4.8** como resultado del análisis dimensional realizado a la zona no aireada del flujo rasante sobre la rápida escalonada con diseño modificado y con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,8897$, permite determinar la profundidad de agua y_i en el punto de inicio de introducción natural de aire. Además, se observa en el **Gráfico No. 4.8**, que cuando se incrementa la relación $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$, es decir, se incrementa el caudal unitario sobre la rápida escalonada, la profundidad del flujo en el punto de inicio de la autoaireación también se incrementa.

b) ZONA AIREADA

Al igual que con el diseño original, se realizan los respectivos cálculos y gráficos para las siguientes combinaciones de parámetros adimensionales:

$$\frac{\Delta E}{E_t} (\%) = \frac{H_d}{y_c} \quad \text{Ec. (4.20)}$$

$$\frac{y_u}{b_e} = \frac{k_s}{y_c} \quad \text{Ec. (4.21)}$$

Para diseño modificado, se debe tener en cuenta que b_e : es la longitud efectiva en el cual se desarrollará el vórtice de eje horizontal.

Con la **Ec. (4.20)** y la **Ec. (4.21)** se analizó la tendencia de la disipación de energía $\left(\frac{\Delta E}{E_t}\right)$ y la variación de la profundidad del flujo bifásico respectivamente para el plan de pruebas seleccionado.

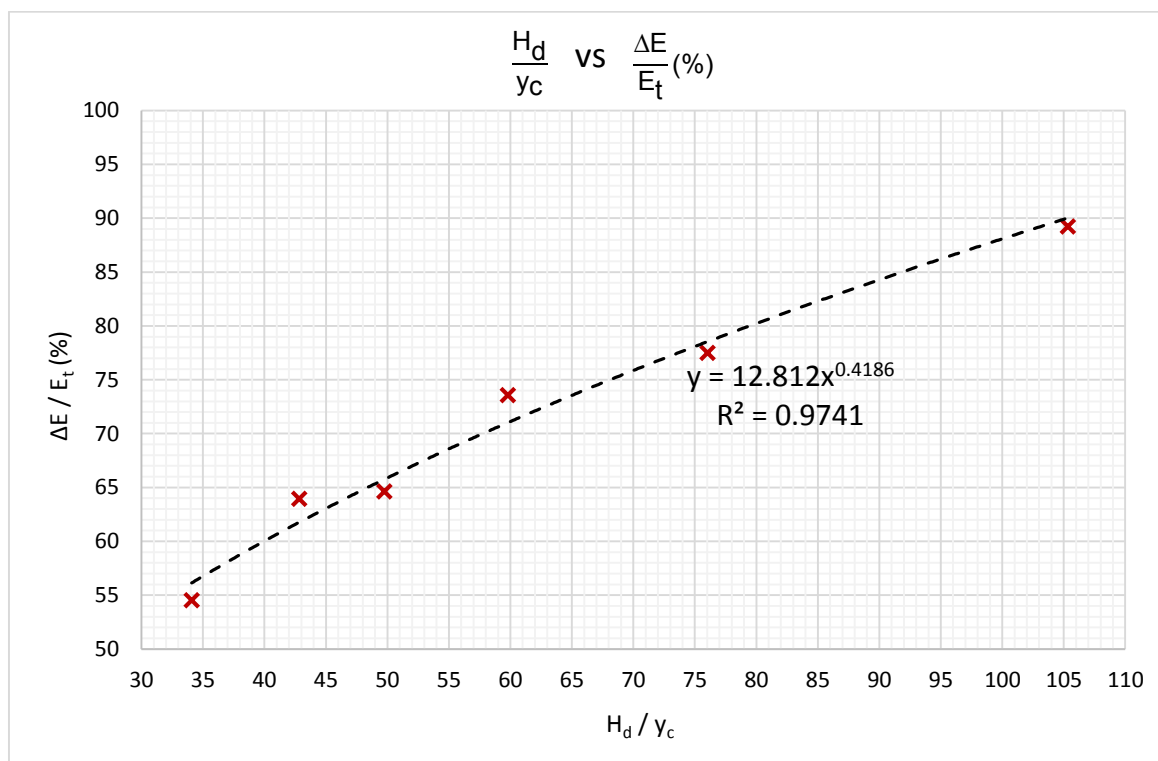
En el **Cuadro No. 4.14**, se presentan los calculo con base en los resultados experimentales obtenidos para cada caudal de operación.

Cuadro No. 4.14: Parámetros adimensionales para la zona aireada. Diseño modificado

Número de Prueba	Q (l/s)	y_c (m)	y_u (m)	E_t (m)	E_r (m)	ΔE (m)	$\frac{\Delta E}{E_t}$ (%)	$\frac{H_d}{y_c}$	$\frac{y_u}{b_e}$	$\frac{k_s}{y_c}$
P5 - DM	78,34	0,133	0,085	4,76	2,16	2,59	54,5	34,1	0,71	0,27
P4 - DM	55,59	0,105	0,073	4,72	1,70	3,02	63,9	42,8	0,61	0,34
P3 - DM	44,42	0,091	0,066	4,70	1,66	3,04	64,6	49,8	0,55	0,39
P2 - DM	33,72	0,076	0,055	4,68	1,24	3,44	73,6	59,8	0,46	0,47
P1 - DM	23,51	0,059	0,042	4,66	1,05	3,61	77,5	76,0	0,35	0,59
P0 - DM	14,42	0,043	0,030	4,63	0,50	4,13	89,2	105,3	0,25	0,82

k_s	(m)	0,035
H_d	(m)	4,52
b_e	(m)	0,12

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

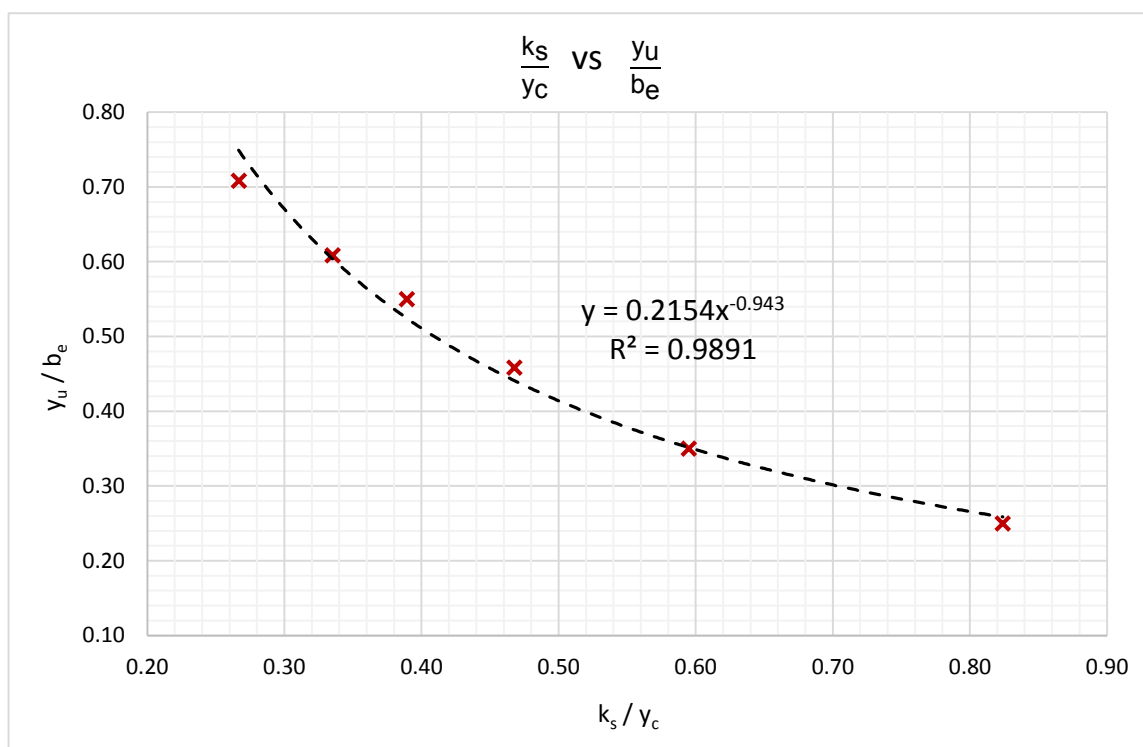
Gráfico No. 4.9: Curva adimensional para la zona aireada $\frac{H_d}{y_c}$ vs $\frac{\Delta E}{E_t}$ (%)

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

$$\frac{\Delta E}{E_t} (\%) = 12,812 \left(\frac{H_d}{y_c} \right)^{0,4186} \quad \text{Ec. (4.22)}$$

La ecuación experimental **Ec. (4.22)**, obtenida a partir del **Gráfico No. 4.9** con los valores del registro de datos experimentales establece una función para obtener directamente la disipación de energía $\left(\frac{\Delta E}{E_t}\right)$, al final de la rápida escalonada, con respecto a la relación $\frac{H_d}{y_c}$. También con base en esta ecuación se puede determinar la pérdida de energía ΔE y por lo tanto la energía residual E_r ($E_r = E_t - \Delta E$). La ecuación experimental obtenida tiene un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9741$. Se observa además en el **Gráfico No. 4.9** que cuando se incrementa la relación $\frac{H_d}{y_c}$, es decir, disminuye la profundidad crítica y por lo tanto disminuye el cauda unitario sobre la rápida escalonada la disipación de energía al pie de la rápida aumenta.

Gráfico No. 4.10: Curva adimensional para la zona aireada $\frac{k_s}{y_c}$ vs $\frac{y_u}{b_e}$



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

$$\frac{y_u}{b_e} = 0,2154 \left(\frac{k_s}{y_c} \right)^{-0,943} \quad \text{Ec. (4.23)}$$

La ecuación experimental **Ec. (4.23)**, obtenida a partir del **Gráfico No. 4.10** como resultado del análisis dimensional del flujo rasante en la zona aireada de la rápida escalonada con diseño modificado y con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9891$, permite determinar la profundidad del flujo bifásico y_u en la zona uniforme al final de la rápida escalonada. Se observa además en el **Gráfico No. 4.10** que cuando aumenta la relación $\frac{k_s}{y_c}$, la relación $\frac{y_u}{b_e}$ disminuye.

4.5 COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el objetivo de evaluar y comparar los resultados experimentales obtenidos del flujo rasante sobre la rápida escalonada con inclinación a 45 grados tanto con el diseño original y el modificado, se presenta a continuación un análisis de los resultados obtenidos experimentalmente y los calculados con las ecuaciones empíricas teóricas que se encuentra en la literatura técnica.

4.5.1 FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY – WEISBACH EN LA REGIÓN UNIFORME.

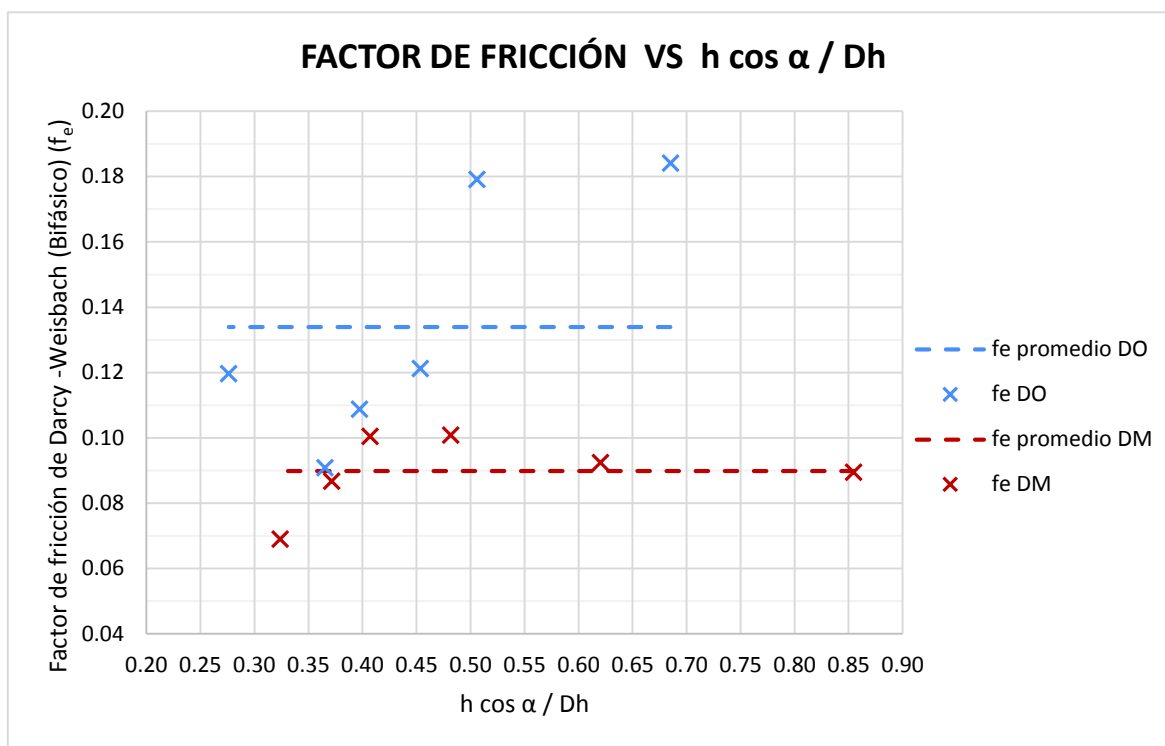
Se representa el Factor de Fricción de Darcy – Weisbach (f_e), en la región uniforme, en función de la altura de la rugosidad relativa del escalón ($h \cos \alpha / D_h$), tanto para el diseño original como para el diseño modificado, a fin de comparar los resultados obtenidos con los resultados que nos proporciona la literatura técnica (IAHR, 2015), para este tipo de rápidas escalonadas.

Cuadro No. 4.15: Datos para elaborar la gráfica de Factor de Fricción de Darcy – Weisbach vs Parámetro adimensional $h \cos \alpha / D_h$

PRUEBA No.	DISEÑO ORIGINAL				DISEÑO MODIFICADO			
	Caudal (Q)	f_e	f_e promedio	$h. \cos \alpha / D_h = K_s / D_h$	Caudal (Q)	f_e	f_e promedio	$h. \cos \alpha / D_h = K_s / D_h$
	(l/s)	-	-	-	(l/s)	-	-	-
P0	14,23	0,18	0,13	0,685	14,42	0,09	0,09	0,855
P1	23,37	0,18		0,506	23,51	0,09		0,620
P2	33,89	0,12		0,454	33,72	0,10		0,482
P3	44,44	0,11		0,397	44,42	0,10		0,407
P4	55,82	0,09		0,365	55,59	0,09		0,371
P5	77,86	0,12		0,276	78,34	0,07		0,324

Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Gráfico No. 4.11: Factor de Fricción de Darcy – Weisbach vs Parámetro adimensional $h \cos \alpha / Dh$



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Sobre la comparación de resultados del factor de fricción en la región uniforme presentado en el **Cuadro No. 4.15** y que corresponde al **Gráfico No. 4.11** se puede concluir que, para el diseño modificado, perfil escalonado con tabiques triangulares, se tiene un valor promedio de 0.09 siendo este valor menor que el diseño original. Con base en las observaciones del comportamiento hidrodinámico del flujo para la serie de caudales experimentados se concluye los siguientes aspectos.

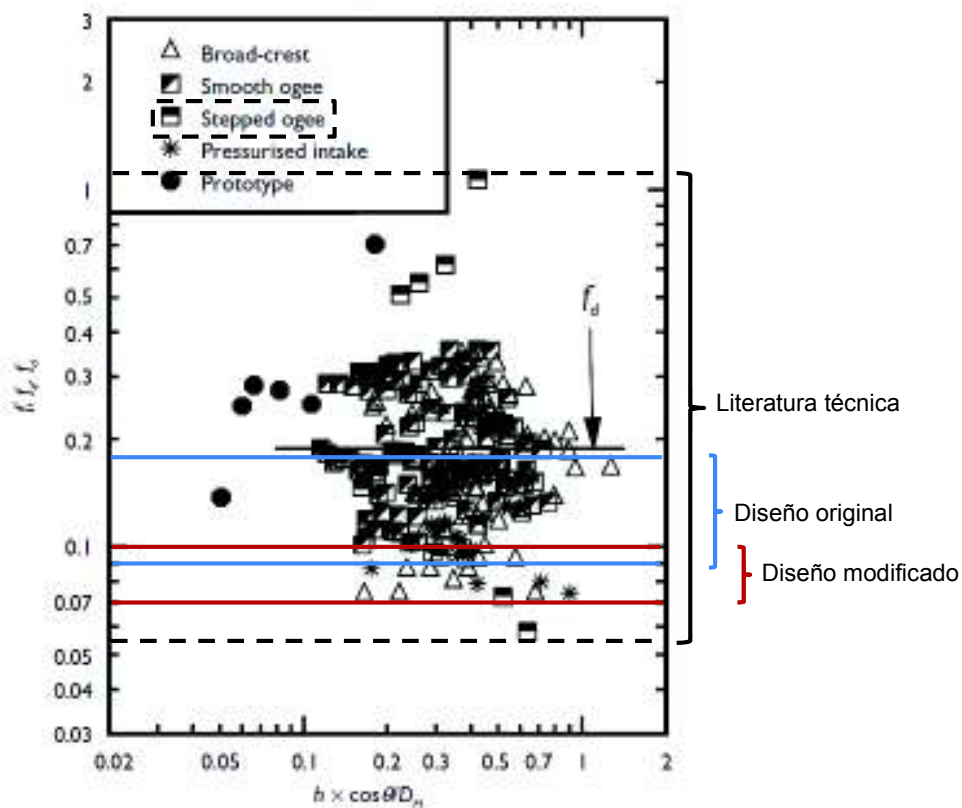
- Teniendo en cuenta que la recirculación del flujo en las cavidades es uno de los principales factores que interviene en la resistencia del movimiento del fluido y se esperaría un incremento del factor de fricción entre el fondo virtual y el flujo rasante si se coloca obstáculos sobre el perfil escalonado. Sin embargo, en una rápida a 45° , la disposición geométrica en zigzag de los tabiques triangulares redujo el ancho efectivo en el cual se desarrolla el vórtice de eje horizontal que a la vez reduce la eficiencia de la formación continua de este vórtice en la sección transversal. Por lo tanto, en lugar de incrementar el factor de fricción, estas estructuras adicionales disminuyen el factor de fricción.

- En el tramo inicial de la rápida se observó que en las cavidades laterales se forma más pronto la recirculación del flujo y que en la parte central de las cavidades, la vorticidad del flujo es casi despreciable. Esta observación nos hace pensar que en la sección transversal de la rápida y en cada una de las cavidades se tienen diferentes valores de cantidad de movimiento esto genera mayor turbulencia e inestabilidad de flujo en la superficie libre en la sección transversal y en toda la longitud de rápida en comparación con el diseño original.
- Finalmente, al disponer de algunos tabiques en un escalón, El vórtice de eje horizontal no logra desarrollarse completamente y el flujo tiende a disminuir su velocidad en los contornos cercanos a estas estructuras y a la vez se reduce la energía cinética turbulenta del vórtice horizontal. De esta manera el fondo virtual tiene un comportamiento menos rugoso, es decir genera menor oposición al movimiento. En comparación con el diseño original el vórtice horizontal no se desarrolla completamente en todo el ancho de la rápida y más bien al vórtice de eje horizontal se lo divide por la presencia de los tabiques lo cual se reduce la eficiencia de la disipación de energía para el caso particular de una rápida escalonada con inclinación a 45 grados.

De acuerdo con la **Figura No. 4.9**, es evidente que los rangos obtenidos para el Factor de Fricción de Darcy – Weisbach tanto para el diseño original como para el diseño modificado están dentro del rango establecido para este tipo de rápidas escalonadas según la literatura técnica (0,06 – 1,1). Sin embargo, ya que este factor está asociado a la disipación de energía (mientras mayor sea f_e mayor disipación de energía) y mientras mayor sea esta, más óptima es la Estructura Hidráulica, en cuanto a disipación de energía, por lo cual se puede concluir que el diseño original es el que permite que la Instalación Experimental de la Rápida Escalonada sea más óptima.

Figura No. 4.9: Factor de fricción de Darcy – Weisbach para flujo rasante sobre una rápida escalonada en función de la rugosidad relativa del escalón ($h \cos \alpha / D_h$). (Para:

$$\alpha > 10^\circ ; h > 0.02 \text{ m} ; R_e > 1.10^5)$$



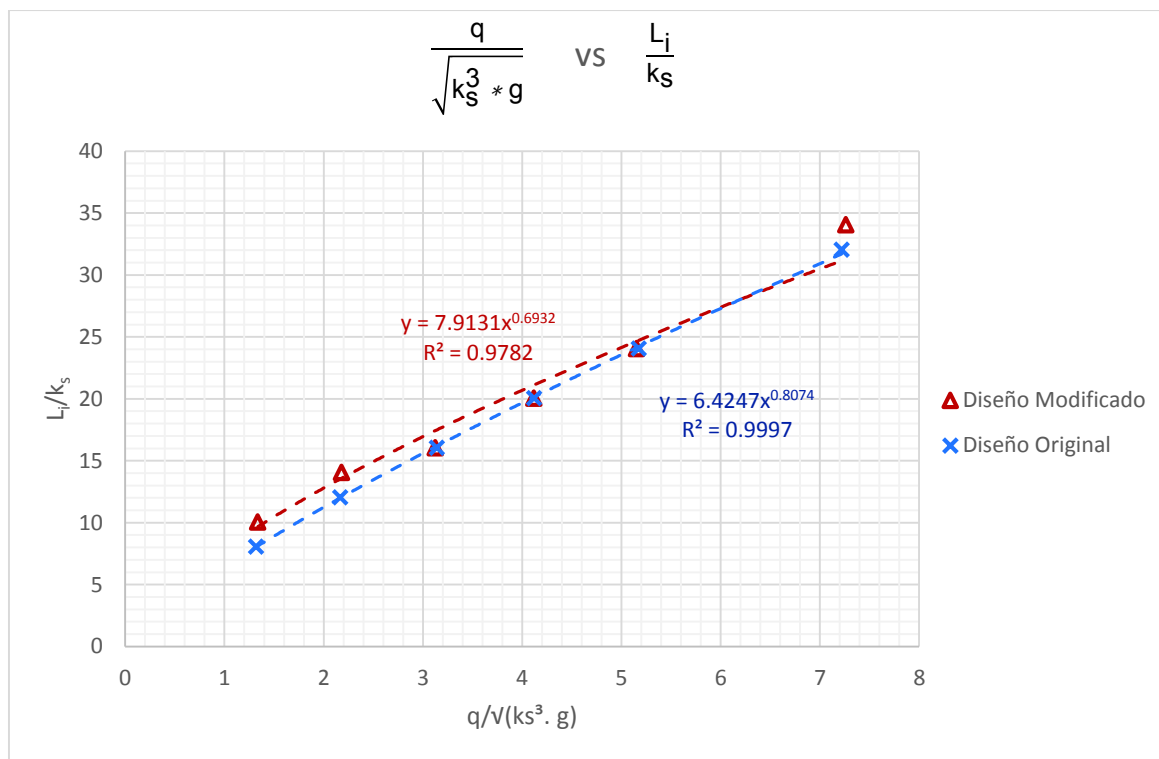
Description	Broad-crest	Smooth ogee	Ogee with steps	Pressurised intake	Prototype
Nb samples	86	121	19	17	6
Mean value	0.17	0.18	0.30	0.10	0.32
Range	0.07–0.35	0.10–0.36	0.06–1.1	0.07–0.13	0.14–0.70

Fuente: Chanson, H., Bung, D., & Matos, J. (2015).

4.5.2 CURVAS ADIMENSIONALES

a) ZONA NO AIREADA

Gráfico No. 4.12: Comparación de curvas adimensionales para la zona no aireada, entre el diseño original y modificado



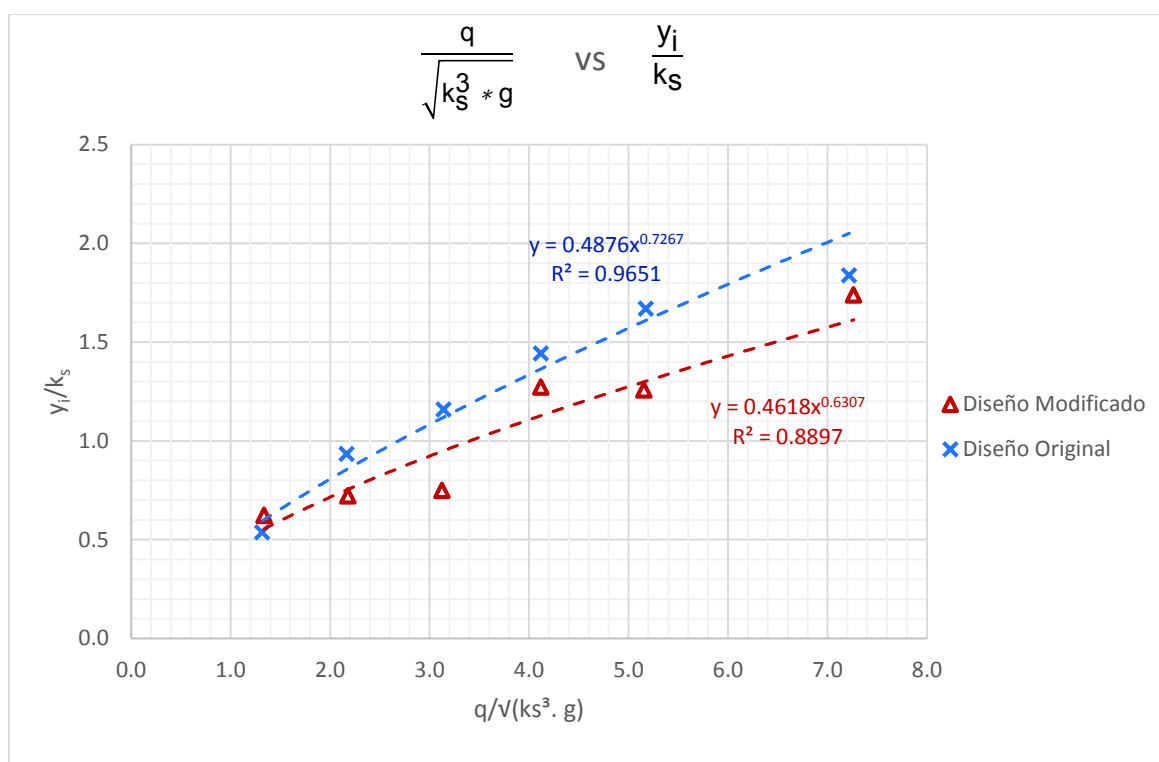
Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Del **Gráfico No. 4.12** se puede concluir los siguientes aspectos:

- Conforme los resultados obtenidos en este estudio sobre el factor de fricción en general se observó que los tabiques triangulares reducen la resistencia al movimiento del fluido, por lo tanto, se observa en el **Gráfico No. 4.12** que para el diseño original la introducción natural de aire se inicia ligeramente más hacia aguas arriba para caudales bajos en comparación con el diseño modificado, debido a que un contorno más rugoso hace que se desarrolle más pronto la capa límite. En consecuencia, se evidencia claramente que en una rápida escalonada a 45° tradicional (Diseño Original) es más rugoso que cuando se colocan estructuras adicionales en zigzag (Diseño Modificado).

- Al comparar las gráficas resultantes del análisis dimensional para la zona no aireada del flujo sobre la rápida escalonada tanto para el diseño original como para el modificado, se puede observar con base en el coeficiente R^2 que la gráfica que representa un mejor ajuste es la que corresponde al diseño original. Esto se debe a que, en el diseño modificado, los tabiques triangulares colocados a partir del escalón número 6 produce una mayor inestabilidad del flujo en la superficie libre, lo que dificulta medir con mayor precisión la variable hidrodinámica L_i .

Gráfico No. 4.13: Comparación de curvas adimensionales para la zona no aireada, entre el diseño original y modificado



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Del **Gráfico No. 4.13** se puede concluir los siguientes aspectos:

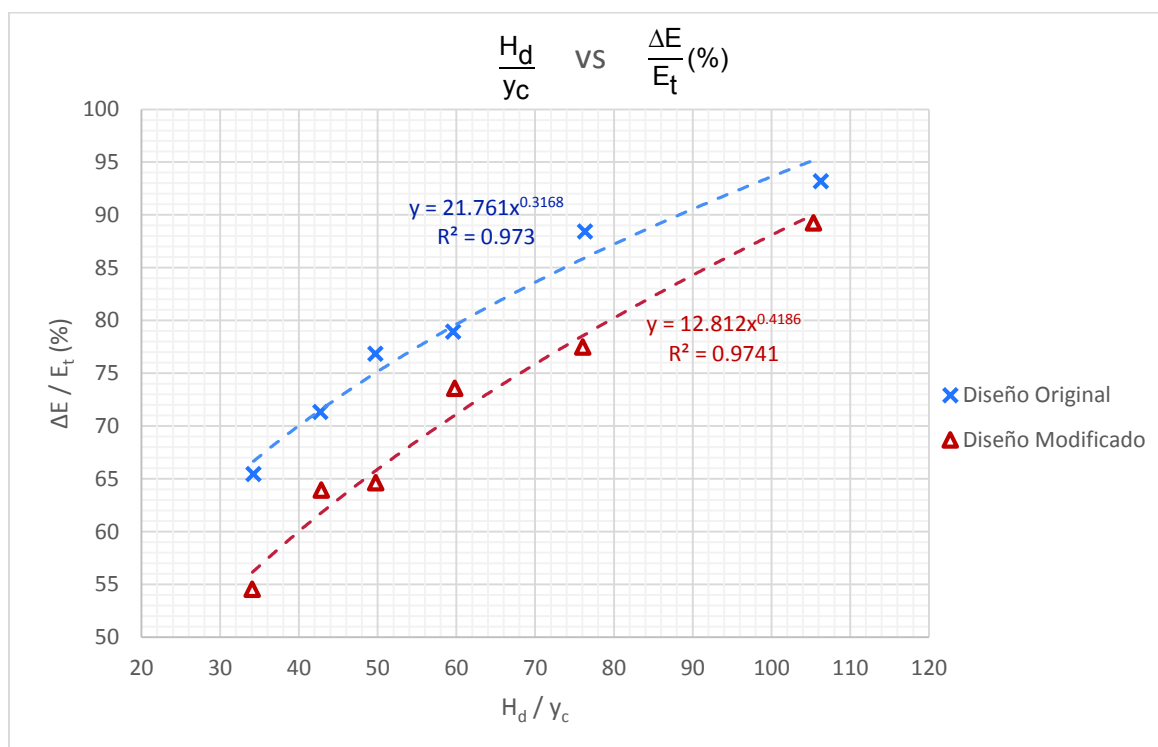
- Conforme el resultado obtenido en este estudio sobre el factor de fricción en general se observó que los tabiques triangulares reducen la resistencia al movimiento del fluido (factores de fricción menores), por lo tanto, en la zona no aireada del flujo rasante, el flujo es básicamente monofásico hasta cuando la capa límite se interseca con la superficie libre del agua. Entonces como se determinó que en el diseño modificado el fondo virtual es ligeramente menos rugosos que el diseño original

como se observa en el **Gráfico No. 4.13** para todos los caudales de operación la profundidad del flujo en el punto de inicio de la autoaireación resulta menor para el diseño modificado.

- Comparando las gráficas resultantes del análisis dimensional para la zona no aireada del flujo sobre la rápida escalonada se puede observar con base en el coeficiente R^2 que la gráfica que representa un mejor ajuste con los datos experimentales corresponde al diseño original. Esto se debe a que, en el diseño modificado, los tabiques triangulares colocados a partir del escalón número 6 produce una mayor inestabilidad del flujo en la superficie libre, lo que dificultó medir con mayor precisión las variables hidrodinámicas y_i .

b) ZONA AIREADA

Gráfico No. 4.14: Comparación de curvas adimensionales para la zona aireada, entre el diseño original y modificado

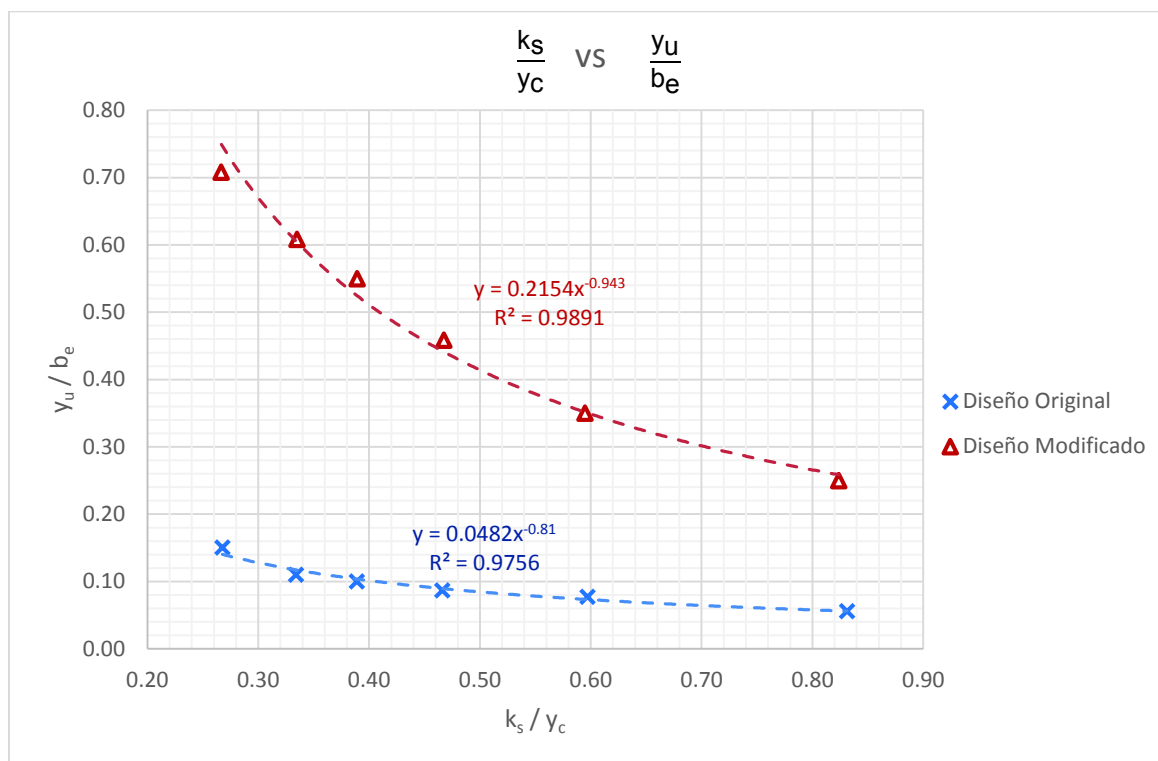


Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

En el **Gráfico No. 4.14** se observa mayores porcentajes de disipación de energía para el diseño original que para el diseño modificado. Esta tendencia es debido a que los tabiques triangulares colocados simétricamente con una disposición de 3 y 4 en cada escalón respectivamente a lo largo de la rápida escalonada originan las siguientes características en el comportamiento hidráulico del flujo rasante:

- En el diseño modificado, las cavidades de los escalones tienen una longitud efectiva, $b_e = 12 \text{ cm}$, para que en el cual se desarrolle el flujo rotacional que gasta energía e interviene en la fricción entre el fondo virtual y el flujo rasante sobre el mismo. Por lo tanto, este mecanismo permite la disipación continua de energía y para el caso de una rápida con inclinación a 45° se obtuvo que la mayor disipación de energía se produce cuando la longitud efectiva es $b_e = 51.8 \text{ cm}$ y que corresponde al diseño original.
- Los tabiques triangulares colocados en forma de zigzag producen mayor turbulencia en el descenso del flujo bifásico por la rápida debido a que en la sección transversal de la rápida existe la formación de 4 o 5 vórtices de eje horizontal con diferentes cantidades de energía cinética. Esta situación además genera una mayor autoaireación del flujo bifásico por lo que se observa un aumento de volumen del flujo rasante en comparación con el diseño original.

Gráfico No. 4.15: Comparación de curvas adimensionales para la zona aireada, entre el diseño original y modificado



Elaborado por: Katherine Guachamín y Angélica Simbaña

Del **Gráfico No. 4.15** se puede concluir los siguientes aspectos:

- Comparando las gráficas resultantes experimentales del flujo rasante en la región uniforme (zona aireada) se puede observar con base en el coeficiente de correlación R^2 que ambas graficas poseen un buen ajuste de los datos experimentales registrados en cada prueba.
- De igual manera se observa que para el diseño modificado se tienen mayores profundidades del flujo en la zona de flujo uniforme, esto se atribuye a que la presencia de los tabiques genera mayor turbulencia del flujo en el descenso por la rápida lo que incrementa el volumen del flujo autoaireado.

4.6 CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones sobre la caracterización del funcionamiento hidráulico del flujo bifásico y los resultados de los parámetros más importantes del flujo rasante con diseño original y diseño modificado.

4.6.1 CARACTERIZACIÓN HIDRAULICA CON DISEÑO ORIGINAL Y DISEÑO MODIFICADO

4.6.1.1 COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL FLUJO BIFÁSICO “AGUA – AIRE”

- Para los dos escenarios investigados tanto en diseño original como en diseño modificado, se identificó la presencia de flujo rasante donde su comportamiento es coherente y se evidencia el fondo virtual formado por los vértices de los escalones, se nota para el caso del diseño original la recirculación de flujo dentro de las cavidades formadas por los vértices de los escalones. En las cavidades de los escalones se aprecian de forma paulatina la aparición de los vórtices hasta cuando se desarrollan completamente y se forman constantemente en el punto de inicio de la autoaireación (la capa límite se interseca con la superficie libre del flujo). Para el segundo escenario se nota un similar comportamiento, sin embargo, la presencia de los tabiques triangulares forma cavidades más cortas a lo largo del escalón originando interrupción en la recirculación del flujo.
- Con la colocación de los tabiques triangulares, se observa una pérdida en la longitud efectiva de desarrollo del vórtice en el eje horizontal y por tanto se pierde de igual manera la continuidad del vórtice.
- En ambos escenarios los vórtices de eje horizontal se conservan por la transferencia de cantidad de movimiento entre la corriente principal (flujo rasante) y la región de la recirculación del flujo debajo del fondo virtual.
- El comportamiento del flujo para el caso de tabiques triangulares mostro ser más acelerado, esto se logró visualizar porque el punto de inicio de la autoaireación inicia

más aguas arriba en el diseño original, por otra parte, aguas abajo del punto de inicio de autoaireación en el diseño modificado se evidenció la presencia de salpicaduras significativas a lo largo de toda la rápida escalonada, cosa que no sucedía en el diseño original.

- Para el rango de caudales más pequeños en ambos escenarios se aprecia el sub-régimen SK2 por las condiciones que presenta, los vórtices de recirculación se extienden a lo largo del escalón y muchas veces interfieren con el desarrollo del siguiente escalón.

4.6.1.2 CONCENTRACIÓN MEDIA DE AIRE

- De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, existen algunas expresiones que permiten determinar la concentración media de aire en rápidas escalonadas no obstante estas expresiones están sujetas a estudios experimentales cuyas condiciones difieren dependiendo del estudio realizado razón por la cual nace cierta discrepancia al aplicarlas. Es así como tanto para el diseño original como para el diseño modificado nace la necesidad de encontrar una manera de determinar la concentración media de aire que se aplique a las condiciones existentes en laboratorio y para cada caso de estudio. Basándose en la ecuación enunciada por Matos (1999) donde la concentración media de aire depende únicamente de la pendiente del aliviadero $C_m = 0.76 * (\sin \alpha)^{0.82}$, se logra determinar experimentalmente, con ayuda de la modelación numérica y el ajuste matemático, las siguientes expresiones: $C_m = 0.71 * (\sin \alpha)^{0.82}$ para el diseño original y $C_m = 0,85 * (\sin \alpha)^{0.82}$ para el diseño modificado

4.6.1.3 FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY – WEISBACH EN LA REGIÓN UNIFORME

- De acuerdo con el análisis estadístico para ambos diseños se evidencia que los valores de factores de fricción disminuyen en el caso de diseño modificado.
- Los factores de fricción determinados experimentalmente varían entre 0,09 y 0,18 para el rango de caudales de operación propuestos en el plan de pruebas

correspondiente al diseño original, dicha variación y discrepancia se debe principalmente a que la determinación de estos valores se encuentra directamente relacionada con la medida de la profundidad del flujo aireado en la zona de flujo uniforme, dicho valor es complicado de obtener por las fuertes fluctuaciones que existen en el fluido.

- Los factores de fricción determinados experimentalmente varían entre 0,07 y 0,10 para el rango de caudales de operación propuestos en el plan de pruebas correspondiente al diseño modificado, dicha variación se debe a que la determinación de estos valores se encuentra directamente relacionada con la medida de la profundidad del flujo aireado en la zona de flujo uniforme, siendo un valor complicado de obtener por las fuertes fluctuaciones que existen en el fluido.

4.6.2 TASA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

- Conforme al análisis experimental realizado para condiciones de flujo rasante, la rápida escalonada con diseño original resulta ser una estructura de disipación de energía eficiente para caudales de operación pequeños, teniendo como resultado porcentajes de disipación de energía que se encuentran en un rango de valores que van desde el 88% hasta el 93%, a la vez es evidente que a medida que aumenta el caudal la disipación de energía disminuye llegando a ser del 65% para el caudal de máxima operación.
- Acorde al análisis experimental realizado para condiciones de flujo rasante, la rápida escalonada con diseño modificado resulta ser una estructura de disipación de energía eficiente para caudales de operación bajos, dando como resultado porcentajes de disipación de energía que se encuentran en un rango de valores que van desde el 77% hasta el 89%, además es evidente la disminución de este porcentaje conforme el caudal de operación va aumentando, llegando a ser del 54% para el caudal de máxima operación.

CAPITULO 5

SÍNTESIS, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presenta un breve resumen de la ejecución del trabajo de titulación, conclusiones referentes a las dos fases de estudio: diseño original y diseño modificado, con la incorporación de tabiques triangulares, el análisis del comportamiento hidráulico del flujo rasante. Finalmente, se mencionan algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

5.1 SÍNTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Numerosas rápidas escalonadas se han construido hasta la fecha, a fin de disipar la energía y mejorar la tasa de aireación del flujo. Las nuevas técnicas y materiales de construcción (HCR, gaviones rip-rap etc.) junto con el desarrollo de nuevas aplicaciones como escaleras de peces, aireación en plantas de tratamiento, solventar problemas de cambios de nivel, entre otras; han promovido el gran interés en canales de fondo escalonado.

La mayoría de las investigaciones realizadas abarcan el rendimiento global de las rápidas escalonadas y en los últimos años se evidencia alternativas de diseño que podrían contribuir con la optimización de estas, sin embargo, las estructuras que podrían incorporarse en el diseño no siempre logran mejorar la tasa disipación y no consideran los efectos de aireación del flujo.

La presente investigación está sujeta al estudio de las características físicas del comportamiento del flujo y de manera aún más importante la disipación de energía sobre una rápida escalonada con pendiente pronunciada a 45 grados en presencia de flujo rasante. Se incluyó conjuntamente un doble enfoque, en primer lugar, el estudio de la instalación experimental con diseño original proporcionó una investigación sistemática del comportamiento hidráulico, basada en una medición detallada de las características del flujo aire – agua, las mismas que se llevan a cabo con técnicas de medición limitadas y sus

resultados se encuentran dentro del margen de la literatura técnica. Los datos experimentales incluyeron la velocidad media del flujo de agua – aire, concentración media de aire, altura de flujo equivalente y altura de flujo característica, así como factor de fricción de Darcy-Weisbach y la tasa de disipación de energía. En segundo lugar, el estudio se centró en estudio de flujo rasante y los medios para mejorar la resistencia al flujo manipulando la turbulencia por cuanto se llevó a cabo colocando diferentes juegos de tabiques en todo el fondo escalonado a lo largo del tramo del canal.

También se investigaron similitud dinámica y efectos de escala en estudios de laboratorio escalonados. El análisis dimensional básico y los resultados experimentales destacaron la complejidad de la hidrodinámica escalonada del canal y las limitaciones de la similitud de Froude.

Se realizaron mediciones experimentales en dos etapas sobre una misma Instalación Experimental que consta de 6.39 m de longitud inclinada, 51.8 cm de ancho, 45° de inclinación y un diseño que se planteó para probar una geometría adicional a la original, es decir, la incorporación de tabiques triangulares. Ambos objetos de estudio funcionaron con flujo rasante.

5.2 CONCLUSIONES

5.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS CON DISEÑO ORIGINAL

- Existen diversas ecuaciones para determinar la concentración media de aire en la región uniforme, según la literatura técnica, sin embargo, éstas en su mayoría se basan en análisis experimentales realizados bajo diversas consideraciones en un laboratorio, debido a que muchas de esas consideraciones no están presentes en el diseño de la rápida escalonada de la presente investigación, se optó por plantear un análisis a las condiciones de diseño presentes y se determinó que para el diseño original de la rápida escalonada, la concentración media de aire es 0,532. Este resultado además es acorde con el valor que se obtuvo mediante la ecuación empírica de Matos (1999) cuyo valor es de 0,572.

- Conforme al análisis experimental realizado para condiciones de flujo rasante, la rápida escalonada con diseño original resulta ser una estructura de disipación de energía eficiente para caudales de operación pequeños, teniendo como resultado un porcentaje de disipación de energía del 93,2% para el caudal de mínima operación, a la vez es evidente que a medida que aumenta el caudal la disipación de energía disminuye llegando a ser del 65,4% para el caudal de máxima operación.
- Los factores de fricción determinados experimentalmente varían entre 0,09 y 0,18 para el rango de caudales de operación propuestos en el plan de pruebas correspondiente al diseño original. La variación de estos valores se da porque el factor de fricción depende del caudal de operación y de la profundidad del flujo aireado en la región uniforme, este último parámetro presenta inestabilidad de flujo en la superficie libre lo que dificulta medir con precisión esta variable.

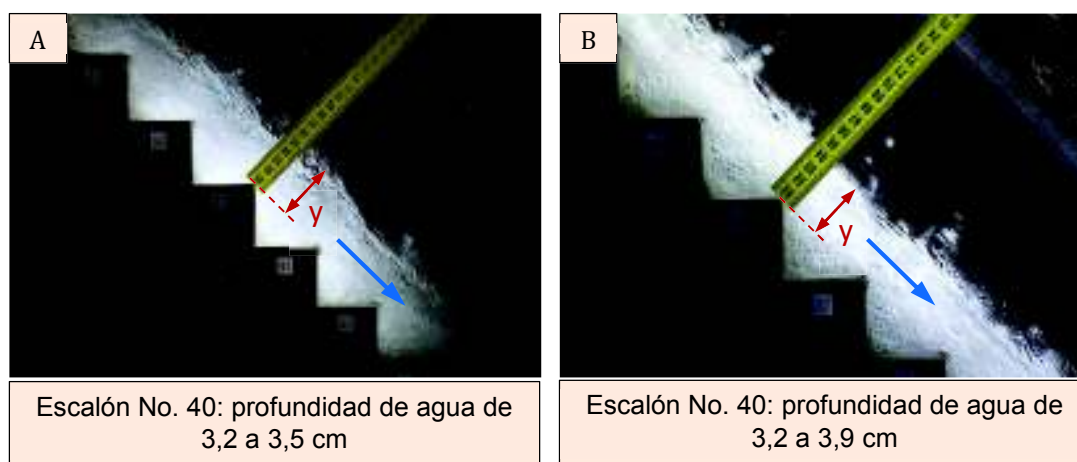
5.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS CON DISEÑO MODIFICADO

- Las ecuaciones propuestas en la literatura técnica para determinar la concentración media de aire se rigen solo para perfiles escalonados sin la incorporación de estructuras adicionales sobre los mismos, es por esto que se optó por plantear un análisis a las condiciones de diseño presentes y se determinó que para el diseño modificado de la rápida escalonada, la concentración media de aire es 0,641.
- En el diseño modificado para los caudales de operación, la disipación de energía se encuentra en un rango de valores que van desde el 54,5% hasta el 89,2% que, si los comparamos con el diseño original, resultan ser menores. Sigue siendo evidente de todos modos en este caso que a medida que aumenta el caudal la disipación de energía disminuye llegando a ser del 54,5% para el caudal de máxima operación.
- Los factores de fricción determinados experimentalmente varían entre 0,07 y 0,10 para el rango de caudales de operación propuestos en el plan de pruebas correspondiente al diseño modificado. La variación de estos valores es porque el factor de fricción depende del caudal de operación y de la profundidad del flujo aireado en la región uniforme, este último parámetro presenta mayor inestabilidad de flujo en la superficie libre por la presencia de los tabiques triangulares lo que dificulta medir con precisión esta variable.

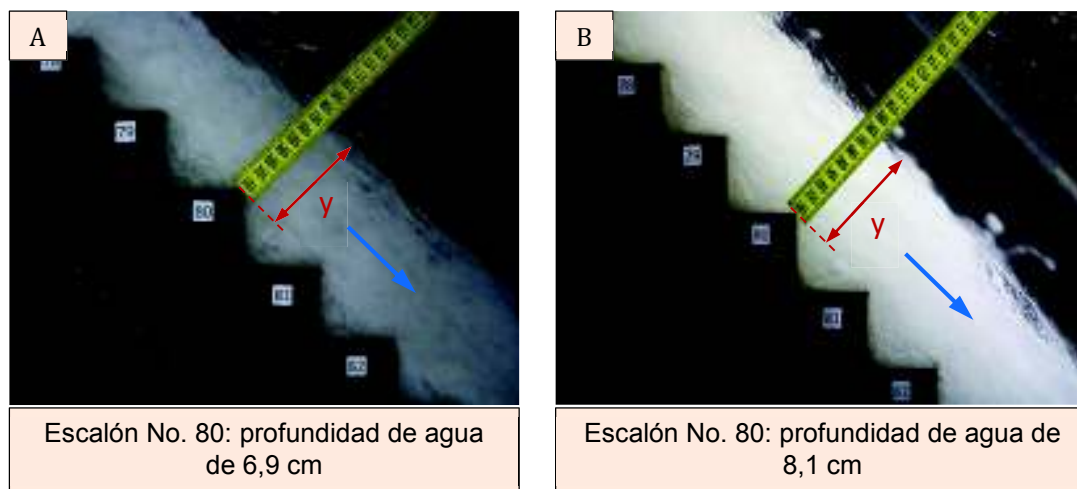
5.2.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

- En cuanto al comportamiento del flujo se puede observar que en el diseño modificado existe una mayor inestabilidad del flujo en la superficie libre debido a la incorporación de las estructuras adicionales. Por lo tanto, se llega a tener salpicadura de agua a lo largo de toda la rápida escalonada, además, es evidente que en este diseño se tiene una mayor concentración de aire al observar un ensanchamiento del flujo con respecto al diseño original, dicha afirmación se comprobó con las mediciones de profundidades del flujo bifásico correspondientes. A continuación, se describe gráficamente 2 ejemplos comparando lo antes mencionado:

Fotografía No. 5.1: Prueba 1. $Q = 23$ l/s. Vista lateral derecha de los escalones No. 38 a No. 42. (A) Diseño original. (B) Diseño Modificado

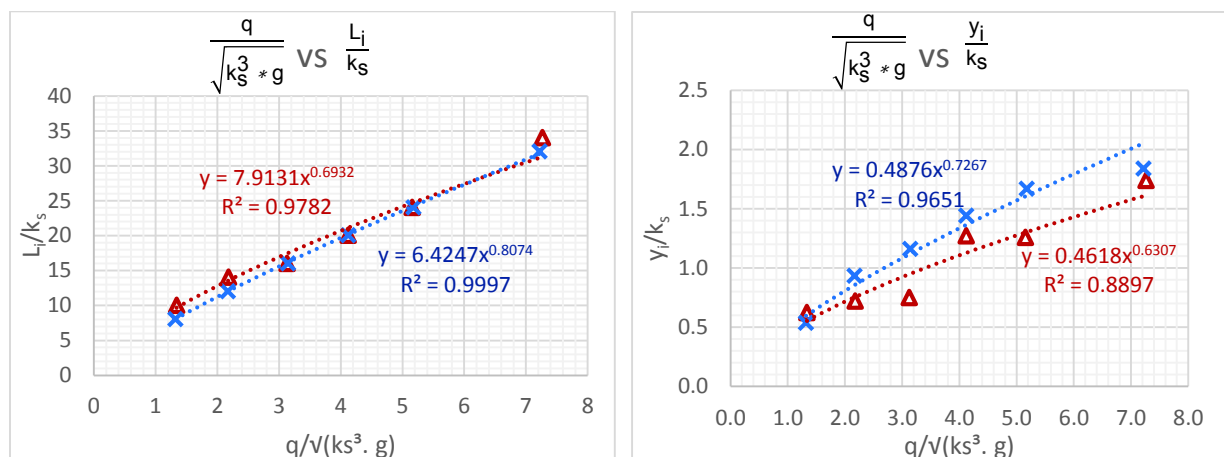


Fotografía No. 5.2: Prueba 5. $Q = 78$ l/s. Vista lateral derecha de los escalones No. 78 a No. 82. (A) Diseño original. (B) Diseño Modificado



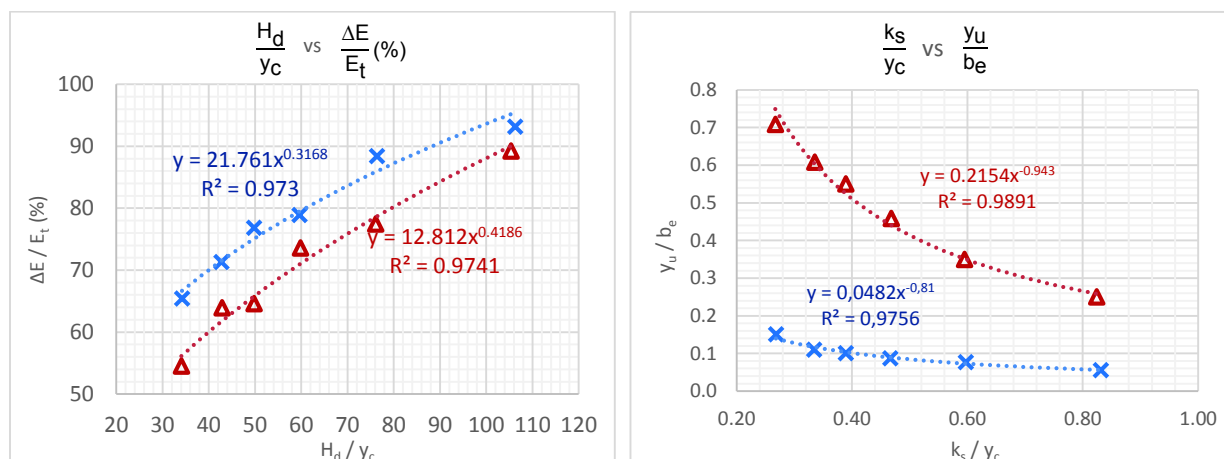
- Los porcentajes de disipación de energía obtenidos experimentalmente para el caudal de máxima operación son de alrededor del 65% para el diseño original y del 54% para el diseño modificado; para el caudal mínimo de operación, con el cual se obtienen la condición de flujo rasante son del 93% para diseño original y 89% para el diseño modificado. entonces como se puede observar tanto para caudales mínimos como máximos es mucho más eficiente disipando energía la rápida escalonada con diseño original.
- Conforme a los resultados obtenidos en este estudio sobre el factor de fricción, para diseño original se obtuvo valores de f_e en un rango de 0,09 a 0,18 con un valor promedio de 0,13 y para el diseño modificado valores de f_e en un rango de 0,07 a 0,10 con un valor promedio de 0,09. En general, se obtiene un menor valor del factor de fricción para el diseño modificado puesto que la presencia de los tabiques triangulares reduce la resistencia al movimiento del fluido (fondo virtual ligeramente menos rugoso), esto como resultado de la disminución de la longitud de desarrollo de los vórtices de eje horizontal ya que su normal desarrollo se ve interrumpido por los tabiques y en consecuencia su longitud de desarrollo es menor, formándose con una energía cinética turbulenta diferente y de menor magnitud en comparación con el diseño original.
- Con base en la comparación de las gráficas adimensionales correspondientes a la zona no aireada (con diseño original y modificado), se determina de acuerdo al coeficiente R^2 , que las que poseen un mejor ajuste de los datos experimentales registrados en cada prueba, son las correspondientes al diseño original (Ver **Gráfico No. 5.1**), debido a que, en el diseño modificado la presencia de los tabiques triangulares colocados a partir del escalón número 6, producen una mayor inestabilidad del flujo en la superficie libre, lo que dificulto medir con mayor precisión las variables hidrodinámicas L_i e y_i .

Gráfico No. 5.1: Curvas adimensionales de la zona no aireada (x: diseño original; Δ : diseño modificado)



- En cuanto a la zona aireada del flujo rasante en la rápida escalonada se observa que la presencia de tabiques triangulares en el diseño modificado genera una menor tasa de disipación de energía y un aumento en el volumen del flujo bifásico en la zona uniforme de la rápida escalonada, lo primero se debe a que la presencia de los tabiques triangulares reduce la resistencia al movimiento (factores de fricción menores en comparación con el diseño original) y por lo tanto se tiene menor disipación de energía; lo segundo de igual manera se origina con la presencia de los tabiques triangulares, los cuales ocasionan una mayor turbulencia en el descenso del flujo por la rápida escalonada generando de esta manera el aumento del volumen del flujo a lo largo de la rápida escalonada.

Gráfico No. 5.2: Curvas adimensionales de la zona aireada (x: diseño original; Δ : diseño modificado)



5.2.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES, INCLUYE LITERATURA TECNICA

- En los últimos años se han realizado varias investigaciones en cuanto a rápidas escalonadas y los mecanismos para mejorar la disipación de energía. Orlandi et al. (2006) realizó un estudio numérico sobre una geometría con presencia de cavidades cuadradas y triangulares, observando que las fluctuaciones en las velocidades normales a lo largo del fondo virtual son el mecanismo clave para dar origen al campo de vorticidad, denotando que existe cierta similitud entre el flujo rasante sobre rápidas escalonadas y el flujo rasante sobre grandes elementos rugosos. Mochizuki et al (1996), estudió algunos flujos de capa límite turbulenta, en cavidades cuadradas con nervaduras longitudinales, observando el comportamiento turbulento mediante la interferencia de vórtices en recirculación. (Gonzales & Chanson, 2005) presenta una investigación sistemática referente a los efectos de diferentes configuraciones de vanos sobre la recirculación en las cavidades, así como las propiedades de flujo rasante, varios han sido los estudios sobre rápidas escalonadas que se han realizado, abordando distintos enfoques, sin embargo, son pocos los estudios referidos a flujos altamente turbulentos y a altos niveles de aireación a superficie libre.

A fin de evaluar el comportamiento de los tabiques triangulares, previamente objeto de estudio de Gonzales (2005), se incorpora en la presente tesis una idea similar sin embargo las condiciones geométricas son diferentes, con lo cual se notó ciertas variaciones a dicho estudio donde se aprecia un comportamiento diferente, para el caso de flujo rasante se observa que la recirculación de la cavidad se ve afectada por la ubicación de los tabiques triangulares, si bien es cierto la resistencia al flujo mejora, incrementa la velocidad pero no obstante disminuye el factor de fricción, lo que resulta no ser recomendable si se desea incrementar la tasa de disipación de energía.

- La presente investigación aporta con los ábacos adimensionales de diseño para rápidas escalonadas con diseño convencional y flujo de aproximación subcrítico, a partir de los cuales es posible estimar la longitud del inicio de introducción de aire y

la profundidad del flujo en ese punto con los ábacos $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$ vs $\frac{L_i}{k_s}$ y $\frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$ vs $\frac{y_i}{k_s}$

(**Gráfico No. 4.2** y **Gráfico No. 4.3**), respectivamente y aún más importante el ábaco

$\frac{H_d}{y_c}$ vs $\frac{\Delta E}{E_t}$ (%) (**Gráfico No. 4.4**), mediante el cual se logra estimar la disipación de

energía y por ende la energía residual, siendo esta última de gran importancia pues permite el dimensionamiento y diseño de manera óptima de los cuencos de disipación de energía que se colocan al pie de las rápidas escalonadas.

- De igual manera la presente investigación aporta con ábacos adimensionales de diseño, para rápidas escalonadas con diseño modificado (tabiques triangulares colocados en zigzag a lo largo de todo el perfil escalonado) que permiten determinar los mismos parámetros descritos para el diseño original.

5.3 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Dado el gran interés por ampliar el conocimiento sobre rápidas escalonadas, así como su optimización a fin de mejorar la disipación de energía, se han plantado nuevas alternativas de diseño las mismas que sugieren algunas líneas de trabajo.

Los resultados actuales demuestran la complejidad en cuanto análisis y estudio del comportamiento del flujo rasante en presencia de tabiques triangulares, los cuales han sido incorporados en el fondo escalonado resaltando la necesidad de investigaciones adicionales. Se sugiere a continuación posibles objetos de investigaciones que complementen el estudio del comportamiento hidráulico para rápidas escalonadas y que merecen una atención preponderante en el futuro:

- Configuraciones adicionales sobre rápidas escalonadas con pendientes mayores a 45° y/o pendientes variables, que involucren regímenes de flujo diferentes como el régimen de flujo escalón a escalón o régimen de flujo transitorio.
- Análisis del campo de presiones en la región aireada y no aireada del flujo sobre una rápida escalonada con incorporación de estructuras adicionales en el perfil escalonado.

- Las mediciones realizadas en el presente estudio no involucran equipos de última tecnología por lo que sería importante realizar un análisis espectral que proporcione una imagen completa del flujo bifásico agua – aire.
- En el diseño modificado (Colocación de tabiques con disposición en zigzag 3 y 4 en cada escalón) resulta que la energía disipada fue menor en comparación con el diseño original. Por lo que resulta interesante analizar el efecto de la disipación continua de energía si se colocan alternadamente únicamente 1 y 2 tabiques en cada escalón a lo largo de la rápida escalonada.
- Analizar experimentalmente el flujo de aproximación supercrítico en una rápida escalonada, con el objetivo de establecer un perfil hidrodinámico que haga que el flujo de aproximación a la rápida no se desprege del mismo. Esta condición mejoraría el comportamiento hidráulico del flujo en el tramo inicial de la rápida escalonada. Esta investigación es importante porque existe limitada información sobre este tema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amador, A. (2005). Comportamiento Hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Barcelona.*
- Andrade, A., & Schulz, H. (2012). Stepped Spillways: Theoretical, Experimental and Numerical Studies. Sao Paulo.*
- Berrones, J., & Quilligana, O. (2017). Simulación Numérica de una rápida con fondo rugoso en el Paquete Computacional OpenFOAM. Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, Mención Hidráulica, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito.*
- Calderón, D. (2017). Modelación física de separadores de caudales hacia colectores pluvial y sanitario para alcantarillados combinados usados en ciudades andinas en Ecuador. Caso de la descontaminación y recuperación del Río Machángara en Quito. Proyecto de Tesis previo a la obtención del Título de Magíster en Ingeniería Sanitaria, Universidad de Buenos Aires, Instituto de Ingeniería Sanitaria, Buenos Aires.*
- Calvo, A. (2015). Campo de velocidades y calados en un aliviadero escalonado en presas de HCR, mediante técnicas de reconocimiento de imágenes. Trabajo previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Barcelona.*
- Casa, E. (2016). Modelación Numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Programa FLOW-3D. Proyecto previo a la obtención del Título de Master en Recursos Hídricos, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito.*
- Castro, M. (s.f.). Análisis Dimensional y Modelación Física en Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional, Quito.*
- Castro, M., Hidalgo, X., & Poveda, R. (2003). Sobre la Modelación Hidráulica en Obras de Saneamiento Básico. Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ciencias del Agua, Quito.*

- Chanson, H. (1993). *Stepped Spillway Flows and Air Entrainment (Vol. 20)*. *Can. JI of Civil Eng.*
- Chanson, H. (2015). *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. Dundee: United Kingdom.
- Chow, V. T. (1999). *Hidráulica de Canales Abiertos (Primera ed.)*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- CIERHI. (2018). *Estudio Experimental y Modelación Numérica del flujo supercrítico con disipación continua de energía e introducción natural de aire, sobre un fondo con rugosidad regular artificial uniformemente distribuida*. PIMI 16-06, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- CIERHI, EPN TECH. (2016). *Estudio experimental en modelo físico de las rápidas con perfil escalonado y liso de la quebrada el Batán, Fase I y Fase II*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Estrella, S. (2013). *Comportamiento hidráulico de aliviaderos escalonados sin cajeros laterales en presas de HCR*. Barcelona: Tesis Doctoral.
- Felder, S., & Chanson, H. (2013). *Air Entrainment and Energy Dissipation on Porous Pooled Stepped*. Aachen - Bung & Pagliara.
- Flores, W. (2015). *Comportamiento del flujo en vertederos escalonados con descarga convergente*. Tesis para optar por el Grado de Maestro en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil - Obras Hidráulica, Jiutepec, Morelos.
- Frizell, K. (2006). *Research State of the art and needs for Hydraulic Desing of Stepped Spillways*. Colorado.
- García, J. (2013). *Modelos reducidos*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- Gonzalez, C. (2005). *An Experimental Study of Free-surface Aeration on Embankment Stepped Chutes*. Brisbane.

- Gonzalez, C., & Chanson, H. (2006). *Air Entrainment and Energy Dissipation on Embankment Spillways. International Symposium on Hydraulic Structures, IAHR, Guayana.*
- Gonzalez, C., & Chanson, H. (2008). *Turbulence and cavity recirculation in air–water. Journal of Hydraulic Research. Taylor & Francis Group.*
- Hidalgo, M. (2007). *Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas. Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Hidráulica, Quito.*
- IAHR. (2015). *Energy Dissipation in Hydraulic Structures . (H. Chanson, Ed.) London , United Kingdom : Taylor & Francis Group.*
- Levenspiel, O. (1993). *Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor . Barcelona, España.*
- López, J., & Soto, K. (2016). *Estudio en Modelo Físico para la evaluación del desarrollo y de la disipación de energía en flujo rasante sobre una rápida de fondo escalonado - caso de la descarga del colector Iñaquito en la Quebrada El Batán. Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito.*
- Lucero, C., & Santamaría, J. (2018). *Estudio Experimental en Modelo Físico de una estructura separadora de caudales con umbral transversal, orificio lateral y régimen de aproximación supercrítico, caso de estudio "Quebrada Caupicho". Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, Mención Hidráulica, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito.*
- Pfister , M., & Chanson, H. (2013). *Scale Effects in Modelling Two-phase Air-water Flows. Proceedings of 2013 IAHR World Congress.*
- Rendón , G. (2011). *Diseño Hidráulico de Vertederos Escalonados. Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Hidráulica, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, México D.F.*
- Sanchez, M. (2001). *Comportamiento hidraulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigon compactado. Análisis del campo de presiones. Catalunya: Tesis Doctoral.*

Takahashi, M., Yamamoto, Y., & Ohtsu, I. (2017). Water surface profiles and energy head in nonaerated skimming flows on stepped spillways. Nihon University , College of Science and Technology, Tokyo, Japan.

White, F. (2003). Fluid Mechanics (Fifth ed.). (J. Holman, & J. Lloyd, Edits.) McGraw-Hill.

Woolbright, R. W. (2006). Hydraulic performance evaluation of RCC stepped spillways with sloped converging training walls. Oklahoma State University, Stillwater.

ANEXOS

ANEXO N° 1

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO CON DISEÑO
ORIGINAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA**

DESMONTAJE Y REUBICACIÓN DE LA INSTALACION DEL TANQUE DE ABASTECIMIENTO

Fotografía No. 1: Ubicación del tanque de abastecimiento previo a su reubicación



Fotografía No. 2: Desmontaje de la tubería de presión



Fotografía No. 3: Camión grúa necesario para reubicar el tanque de abastecimiento



Fotografía No. 4: Reubicación del tanque de abastecimiento



INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA A PRESIÓN

Fotografía No. 5: Colocación de la válvula de compuerta

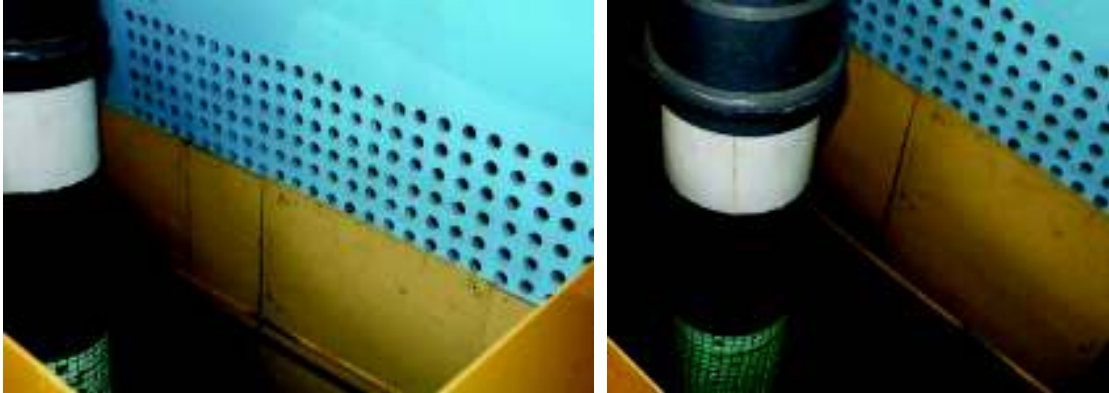


Fotografía No. 6: Colocación de la tubería a presión, junto con sus accesorios



PANTALLA DE IMPACTO PARA UNIFORMIZAR EL FLUJO

Fotografía No. 7: Pantalla uniformizadora de flujo dentro del tanque de abastecimiento



FABRICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN ACRÍLICO Y MOLDEOS

Fotografía No. 8: Molde de madera para la elaboración del perfil curvo ubicado al final de la rápida escalonada



Fotografía No. 9: Horno para colocar piezas de acrílico, permite que adquieran una temperatura adecuada para su moldeo



Fotografía No. 10: Moldeo de las piezas de acrílico



Fotografía No. 11: Perfil curvo moldeado



Fotografía No. 12: Elaboración de las piezas de acrílico que conforman cada una de las partes de la instalación experimental



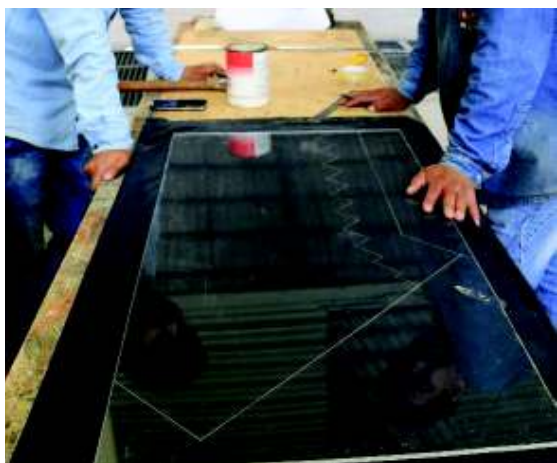
Fotografía No. 13: Construcción del canal de descarga



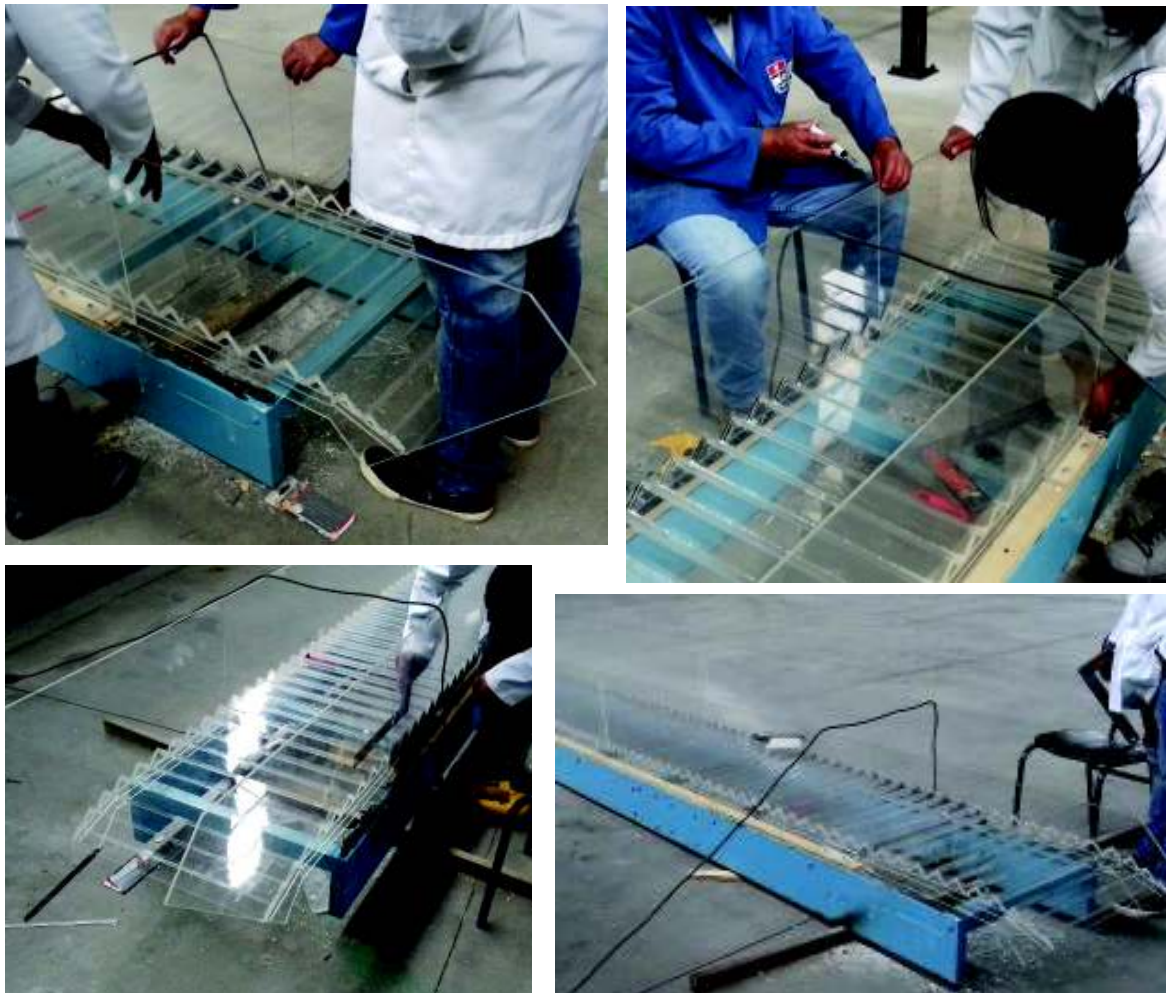
Fotografía No. 14: Limpieza de la rápida escalonada existente en el Laboratorio del CIERHI



Fotografía No. 15: Construcción de la parte inicial de la rápida escalonada (gradas y paredes)



Fotografía No. 16: Colocación de la parte inicial de la rápida escalonada



Fotografía No. 17: Pintura en la rápida escalonada



Fotografía No. 18: Rápida escalonada con el acabado de pintura



Fotografía No. 19: Colocación de rigidizadores en las paredes de la rápida escalonada



Fotografía No. 20: Colocación y sujeción de la rápida escalonada



INSTRUMENTACIÓN PARA LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Fotografía No. 21: Fabricación y pintura del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales



Fotografía No. 22: Instalación del vertedero con contracciones laterales en el canal de descarga



ANEXO N° 2

**REGISTRO DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA DE LA
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA**

Cuadro No. 1: Registro de datos obtenidos de la calibración en el fondo escalonado (longitud del escalón) con ayuda de un medidor láser (distanciómetro).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS
 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

NOMBRE:

No. Prueba:

1

FECHA/ HORA: 29/01/2018 6:00 PM

MEDIDOR LÁSER ANCHO RÁPIDA ESCALONADA			
No.	Ancho (cm)	Ubicación	Observaciones
1	51,77	Escalón N° 1	Rápida escalonada
2	51,90	Escalón N° 5	Rápida escalonada
3	51,93	Escalón N° 10	Rápida escalonada
4	51,83	Escalón N° 15	Rápida escalonada
5	51,70	Escalón N° 20	Rápida escalonada
6	51,73	Escalón N° 25	Rápida escalonada
7	51,80	Escalón N° 30	Rápida escalonada
8	51,70	Escalón N° 35	Rápida escalonada
9	51,83	Escalón N° 40	Rápida escalonada
10	51,73	Escalón N° 45	Rápida escalonada
11	51,73	Escalón N° 50	Rápida escalonada
12	51,83	Escalón N° 55	Rápida escalonada
13	51,70	Escalón N° 60	Rápida escalonada
14	51,83	Escalón N° 65	Rápida escalonada
15	51,73	Escalón N° 70	Rápida escalonada
16	51,87	Escalón N° 75	Rápida escalonada
17	51,87	Escalón N° 80	Rápida escalonada
18	51,77	Escalón N° 85	Rápida escalonada
19	51,80	Escalón N° 90	Rápida escalonada
20	51,80	Escalón N° 93	Rápida escalonada

Cuadro No. 2: Registro de datos obtenidos de la calibración en el fondo escalonado (huella y contrahuella) con ayuda de un calibrador (nonio).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS
 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

NOMBRE: _____

No. Prueba: 1

FECHA/ HORA: 30/01/2018 9:00 AM

MEDICIONES CALIBRADOR								
No.	HUELLA cm			CONTRAHUELLA cm			Ubicación	Observaciones
	Derecho	Centro	Izq	Derecho	Centro	Izq		
1	5,14	5,01	5,17	4,96	4,99	4,99	Escalón N° 7	Rápida escalonada
2	4,91	4,87	4,94	5,02	5,01	4,97	Escalón N° 10	Rápida escalonada
3	5,13	4,95	5,03	4,93	4,88	4,93	Escalón N° 20	Rápida escalonada
4	5,01	5,02	5,02	5,09	4,98	5,03	Escalón N° 30	Rápida escalonada
5	5,02	4,99	5,00	5,08	5,05	5,06	Escalón N° 40	Rápida escalonada
6	5,03	5,00	5,04	5,05	5,02	5,01	Escalón N° 50	Rápida escalonada
7	5,04	5,08	5,06	5,07	5,05	5,04	Escalón N° 60	Rápida escalonada
8	5,08	5,01	5,04	5,00	5,00	4,99	Escalón N° 70	Rápida escalonada
9	5,04	4,97	5,01	5,03	5,01	5,11	Escalón N° 80	Rápida escalonada
10	5,05	4,95	5,03	5,00	4,99	4,93	Escalón N° 90	Rápida escalonada

ANEXO N° 3

**REGISTRO DE DATOS Y CÁLCULOS RESPECTIVOS PARA LA
CALIBRACIÓN DEL VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED DELGADA
CON CONTRACCIONES LATERALES**

CALIBRACIÓN VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED DELGADA

Cuadro No. 1: Condiciones que deben cumplir los vertederos rectangulares de pared delgada, según la NORMA ISO 1438 – ASTM D5242-92.

Vertedero de Pared Delgada - Rectangular			
DIMENSIONAMIENTO			
DATOS			
H =	0,175 m		
P =	0,400 m		
L =	0,600 m		
B =	1,400 m		
Hmín =	0,070 m		
Hmáx =	0,200 m		
Condiciones para vertederos totalmente contraídos			
H/P	≤ 0,5	0,44	SI CUMPLE
H/L	≤ 0,5	0,29	SI CUMPLE
0,08	≤ H ≤ 0,6	0,17	SI CUMPLE
L	≥ 0,3	0,60	SI CUMPLE
P	≥ 0,3	0,40	SI CUMPLE
(B-L)/2	≥ 2H	0,40	SI CUMPLE
Ya que no cumple para la carga mínima sobre el vertedero (0,07m), entonces no es totalmente contraído			
Condiciones para vertederos parcialmente contraídos			
H/P	≤ 2	0,44	SI CUMPLE
H	≥ 0,03	0,17	SI CUMPLE
L	≥ 0,15	0,60	SI CUMPLE
P	≥ 0,1	0,40	SI CUMPLE
Cumple para todos los casos. Es Parcialmente contraído			
		Norma	Construido
Ubicación limnómetro: 4 a 5 veces Hmax (carga máxima sobre el vertedero)		Límites de Ubicación de Limnómetro (m) = 4 Hmax (m) = 0,80 5 Hmax (m) = 1,00	1,00
Longitud del canal de aproximación: 10 veces el ancho del canal cuando la longitud del vertedero es mayor que la mitad del ancho del canal		*Siempre y cuando L > B/2 L Canal (m) = 14	NO CUMPLE 11,80
Colocación de la pantalla uniformizadora de flujo: A 10 veces H (carga sobre el vertedero) aguas arriba del vertedero		Ubicación Pantalla Uniformizadora (m) = 2,00	4,90

CURVAS DE DESCARGA DEL VERTEDERO RECTANGULAR

Cuadro No. 2: Registro de datos experimentales para el aforo volumétrico del vertedero rectangular de pared delgada con contracciones laterales.



REGISTRO DE DATOS

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)



NOMBRE:

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: Aforo Volumétrico

FECHA/ HORA: 20/11/2017 11:00 AM

VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED DELGADA CON CONTRACCIONES LATERALES										
LIMNÍMETRO DERECHA						LIMNÍMETRO IZQUIERDA				
h _o (cm) =			37,60			h _o (cm) =		28,58		
No.	h _{medido} (cm)	Carga sobre el vertedero (cm) h _{medido} h _o	Volumen (l)	Tiempo (s)	Caudal (l/s)	h _{medido} (cm)	Carga sobre el vertedero (cm) h _{medido} h _o	Volumen (l)	Tiempo (s)	Caudal (l/s)
1	38,97	38,97	20,53	10,59	1,94	29,98	1,40	20,53	10,59	1,94
	38,97	38,97	20,58	10,40	1,98	29,98	1,40	20,58	10,40	1,98
	38,97	38,97	20,88	10,36	2,02	29,98	1,40	20,88	10,36	2,02
2	40,01	40,01	42,72	10,52	4,06	31,01	2,43	61,73	4,42	13,97
	40,01	40,01	42,00	10,30	4,08	31,01	2,43	61,67	4,45	13,86
	40,01	40,01	42,21	10,30	4,10	31,01	2,43	62,25	4,40	14,15
3	42,98	42,98	61,73	4,42	13,97	33,95	5,37	42,72	10,52	4,06
	42,98	42,98	61,67	4,45	13,86	33,95	5,37	42,00	10,30	4,08
	42,98	42,98	62,25	4,40	14,15	33,95	5,37	42,21	10,30	4,10
4	44,63	44,63	66,13	3,28	20,16	35,63	7,05	66,13	3,28	20,16
	44,63	44,63	63,39	3,12	20,32	35,63	7,05	63,39	3,12	20,32
	44,63	44,63	58,41	2,83	20,64	35,63	7,05	58,41	2,83	20,64
5	46,08	46,08	87,31	3,29	26,54	37,02	8,44	87,31	3,29	26,54
	46,08	46,08	81,19	3,03	26,80	37,02	8,44	81,19	3,03	26,80
	46,08	46,08	88,74	3,31	26,81	37,02	8,44	88,74	3,31	26,81

Cuadro No. 3: Datos para la elaboración de la curva de descarga experimental, obtenidos a partir del aforo volumétrico

Limnómetro Derecha			Limnómetro Izquierda		PROMEDIO	
No.	h (cm)	Q (l/s)	h (cm)	Q (l/s)	h prom (cm)	Qprom (l/s)
	Carga sobre el vertedero	Caudal Aforado Volumétricamente	Carga sobre el vertedero	Caudal Aforado Volumétricamente	Carga sobre el vertedero	Caudal Aforado Volumétricamente
1	1,37	1,98	1,40	1,98	1,39	1,98
2	2,41	4,08	2,43	4,08	2,42	4,08
3	5,38	13,99	5,37	13,99	5,38	13,99
4	7,03	20,37	7,05	20,37	7,04	20,37
5	8,48	26,71	8,44	26,71	8,46	26,71

Cuadro No. 4: Datos para la elaboración de la curva de descarga teórica, obtenidos a partir de la NORMA ISO 1438 – ASTM D5242-92

<i>Curva de Descarga Teórica</i>			
<i>H (m)</i>	<i>H (cm)</i>	<i>Q (m³ /s)</i>	<i>Q (l/s)</i>
0,01	1	0,00106	1,06
0,02	2	0,00300	3,00
0,03	3	0,00551	5,51
0,04	4	0,00848	8,48
0,05	5	0,01185	11,85
0,06	6	0,01557	15,57
0,07	7	0,01962	19,62
0,08	8	0,02397	23,97
0,09	9	0,02861	28,61
0,10	10	0,03350	33,50
0,11	11	0,03865	38,65
0,12	12	0,04404	44,04
0,13	13	0,04966	49,66
0,14	14	0,05550	55,50
0,15	15	0,06155	61,55
0,16	16	0,06781	67,81
0,17	17	0,07426	74,26
0,18	18	0,08091	80,91
0,19	19	0,08775	87,75
0,20	20	0,09476	94,76

Cuadro No. 5: Datos para la elaboración de la curva de descarga experimental, con datos extrapolados a partir de la ecuación obtenida en la curva de descarga del aforo volumétrico

<i>Ecuación Experimental (Tendencia Extrapolada)</i>		
<i>H (m)</i>	<i>H (cm)</i>	<i>Q (l/s)</i>
0,01	1	1,19
0,02	2	3,26
0,03	3	5,88
0,04	4	8,94
0,05	5	12,37
0,06	6	16,13
0,07	7	20,19
0,08	8	24,53
0,09	9	29,11
0,10	10	33,94
0,11	11	38,99
0,12	12	44,26
0,13	13	49,72
0,14	14	55,39
0,15	15	61,24
0,16	16	67,27
0,17	17	73,48
0,18	18	79,85
0,19	19	86,39
0,20	20	93,09

ANEXO N° 4

ANÁLISIS DIMENSIONAL INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA

ANÁLISIS DIMENSIONAL

En este anexo se detalla el proceso del análisis dimensional del este estudio experimental del flujo rasante sobre una rápida escalonada con inclinación a 45 grados y dimensiones de los escalones ($h = 5\text{cm}$, $l = 5\text{cm}$). En primer lugar, se realiza el análisis dimensional en la región no aireada, es decir, en la zona donde se desarrolla el crecimiento de la capa límite y luego se realiza el análisis en la región autoaireada, es decir, en la región del flujo uniforme.

1. ZONA NO AIREADA

A continuación, se indica el procedimiento para determinar los monomios adimensionales con base en el establecimiento de las variables geométricas, cinéticas y dinámicas que intervienen en el fenómeno físico.

a) Identificar todas las variables (n) que intervienen en el fenómeno hidráulico.

- Variables geométricas:
 - k_s : Macrorugosidad (m)
 - α : Ángulo de inclinación de la rápida escalonada ($^\circ$)

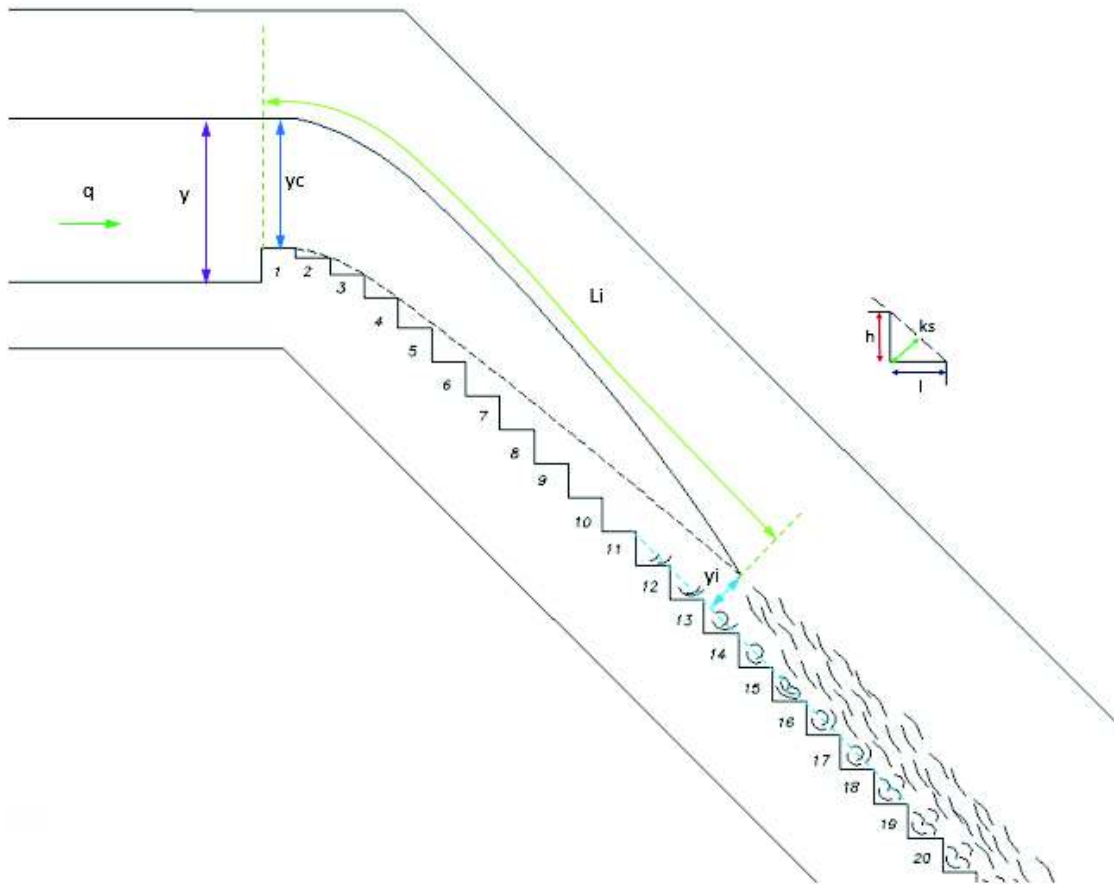
- Variables del flujo:
 - y_c : Calado crítico (m)
 - q : Caudal unitario ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)
 - L_i : Longitud al punto de inicio de autoaireación (m)
 - y_i : Profundidad en el punto de inicio de la autoaireación (m)
 - g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

- Variables del fluido:
 - ρ : Densidad del agua (kg/m^3)
 - ν : Viscosidad cinemática (m^2/s)
 - σ : Tensión superficial (N/m)

Número total de variables: 10

$$F = (k_s, \alpha, g, q, L_i, y_i, y_c, \rho, \nu, \sigma)$$

Figura No. 1: Esquema de identificación de variables que intervienen en el fenómeno hidráulico para la zona no aireada



- b) Las dimensiones fundamentales (r), son las siguientes: Longitud (L), Masa (M), Tiempo (T).

Número de magnitudes fundamentales: 3

- c) Teorema Pi Buckingham, parámetros adimensionales: $k = n - r$

Número de parámetros adimensionales: $k = 10 - 3$

Número de parámetros adimensionales: $k = 7$

Función homogénea:

$$\varphi(\alpha, q, L_i, y_i, y_c, v, \sigma) = 0$$

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) = 0$$

- d) Establecer las variables repetitivas para la determinación de las variables π en la matriz característica, su determinante no debe ser nulo.

Numero de variables repetitivas: $n - (n - r)$

Numero de variables repetitivas: $10 - (10 - 3)$

Numero de variables repetitivas: 3

Variables Repetitivas	L	M	T
ks	1	0	0
g	1	0	-2
ρ	-3	1	0

Deter = 2 ok

- e) Determinación de los parámetros adimensionales (π)

La ecuación adimensional para π_1 es:

$$\pi_1 = ks^a g^b \rho^c \times \alpha$$

$$\pi_1 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times 1$$

	a	b	c	h
M	0	0	1	0
L	1	1	-3	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = 0$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_1 = \alpha$$

La ecuación adimensional para π_2 es:

$$\pi_2 = k_s^a g^b \rho^c \times q$$

$$\pi_2 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L^2 T^{-1})$$

	a	b	c	h
M	0	0	1	0
L	1	1	-3	-2
T	0	-2	0	1

Resultados

$$\rightarrow a = -3/2$$

$$\rightarrow b = -1/2$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_2 = \frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}$$

La ecuación adimensional para π_3 es:

$$\pi_3 = k_s^a g^b \rho^c \times L_i$$

$$\pi_3 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
M	0	0	1	0
L	1	1	-3	-1
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_3 = \frac{L_i}{k_s}$$

La ecuación adimensional para π_4 es:

$$\pi_4 = k_s^a g^b \rho^c \times y_i$$

$$\pi_4 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
M	0	0	1	0
L	1	1	-3	-1
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_4 = \frac{y_i}{k_s}$$

La ecuación adimensional para π_5 es:

$$\pi_5 = k_s^a g^b \rho^c \times y_c$$

$$\pi_5 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
M	0	0	1	0
L	1	1	-3	-1
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_5 = \frac{y_c}{k_s}$$

La ecuación adimensional para π_6 es:

$$\pi_6 = k_s^a g^b \rho^c \times v$$

$$\pi_6 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L^2 T^{-1})$$

	a	b	c	h
M	0	0	1	0
L	1	1	-3	-2
T	0	-2	0	1

Resultados

$$\rightarrow a = -3/2$$

$$\rightarrow b = -1/2$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_6 = \frac{v}{\sqrt{k_s^3 * g}}$$

La ecuación dimensional para π_7 es:

$$\pi_7 = k_s^a g^b \rho^c \times \sigma$$

$$\pi_7 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (MT^{-2})$$

	a	b	c	h
M	0	0	1	-1
L	1	1	-3	0
T	0	-2	0	2

Resultados

$$\rightarrow a = -2$$

$$\rightarrow b = -1$$

$$\rightarrow c = -1$$

$$\pi_7 = \frac{\sigma}{k_s^2 * g * \rho}$$

- f) Verificar que todos los parámetros π sean adimensionales y finalmente escribir la función final:

$$\Phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) = 0$$

$$\Phi\left(\alpha, \frac{q}{\sqrt{k_s^3 * g}}, \frac{L_i}{k_s}, \frac{y_i}{k_s}, \frac{y_c}{k_s}, \frac{v}{\sqrt{k_s^3 * g}}, \frac{\sigma}{k_s^2 * g * \rho}\right) = 0$$

2. ZONA AIREADA

a) Identificar todas las variables (n) que intervienen en el fenómeno hidráulico.

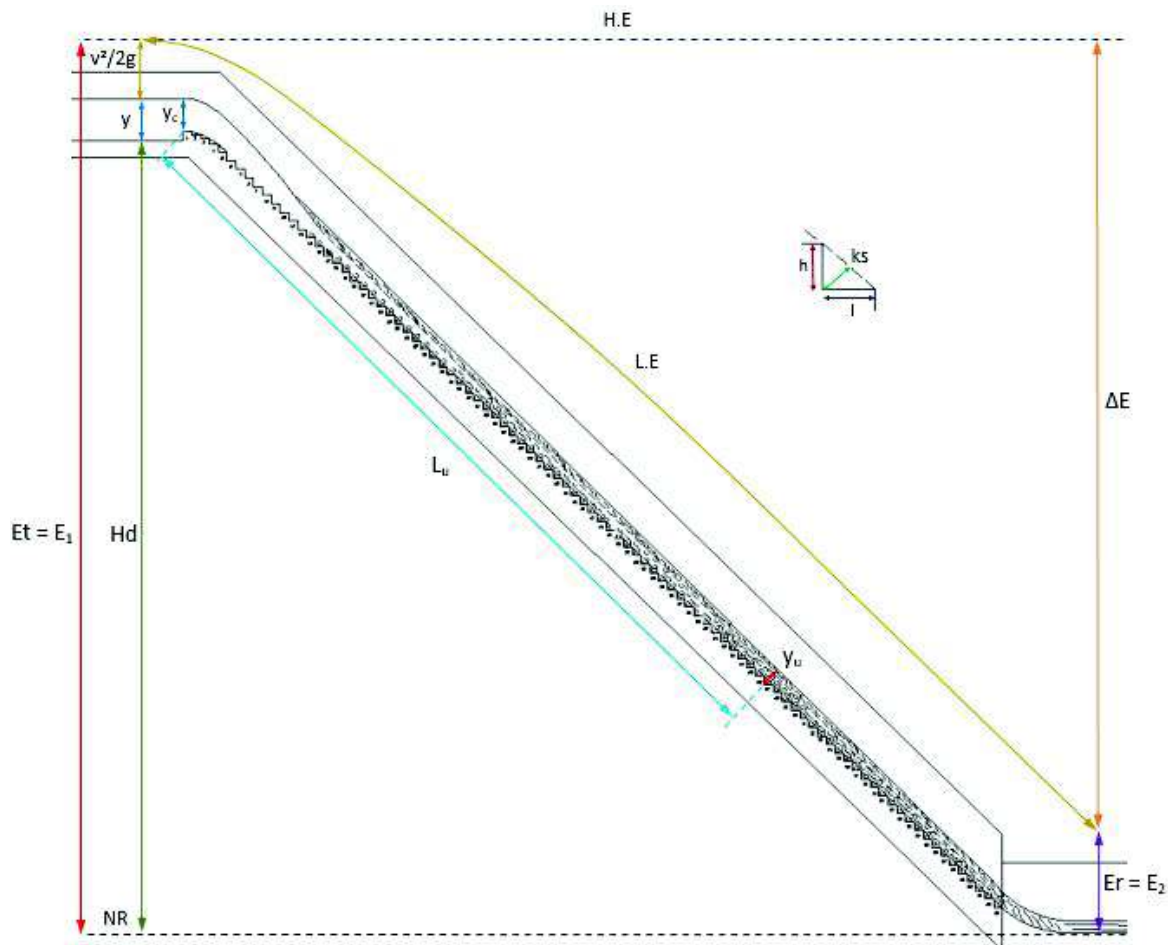
- Variables geométricas:
 - ks: Macrorugosidad (m)
 - be: Longitud efectiva en la cual se desarrolla el vórtice de eje horizontal (m)
 - Hd: Altura de la rápida escalonada (m)
 - α: Ángulo de inclinación de la rápida escalonada (°)
- Variables del flujo:
 - q: Caudal unitario (m³/s/m)
 - yc: Profundidad crítica (m)
 - yu: Profundidad del flujo bifásico (agua – aire) en la región uniforme (m)
 - Cm: Concentración media de aire
 - ΔE: Pérdida de energía (m)
 - Et = E1: Energía total, sección 1 (m)
 - Er = E2: Energía residual, sección 2 (m)
 - fe: Factor de fricción, región uniforme
 - g: Aceleración de la gravedad (m/s²)
- Variables del fluido:
 - ρ: Densidad del agua (kg/m³)
 - ν: Viscosidad cinemática (m²/s)

σ : Tensión superficial (N/m)

Número total de variables: 16

$$F = (k_s, H_d, b_e, \alpha, q, y_c, y_u, C_m, \Delta E, E_t, E_r, f_e, g, \rho, \nu, \sigma)$$

Figura No. 2: Esquema de identificación de variables que intervienen en el fenómeno hidráulico en la zona aireada



- b) Las dimensiones primarias (r), son las siguientes: Longitud (L), Masa (M), Tiempo (T).

Número de magnitudes fundamentales: 3

- c) Teorema Pi Buckingham, parámetros adimensionales: $k = n - r$

Número de parámetros adimensionales: $k = 16 - 3$

Número de parámetros adimensionales: $k = 13$

Función homogénea:

$$\varphi (k_s, H_d, b_e, \alpha, q, y_u, C_m, \Delta E, E_t, E_r, f_e, \nu, \sigma) = 0$$

$$\varphi (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}, \pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{13}) = 0$$

- d) Establecer las variables repetitivas para la determinación de las variables π en la matriz característica, su determinante no debe ser nulo.

Numero de variables repetitivas: $n - (n - r)$

Numero de variables repetitivas: $16 - (16 - 3)$

Numero de variables repetitivas: 3

Variables Repetitivas	L	M	T
y_c	1	0	0
g	1	0	-2
ρ	-3	1	0

Deter = 2 ok

- e) Determinación de los parámetros π adimensionales.

La ecuación adimensional para π_1 es:

$$\pi_1 = y_c^a g^b \rho^c \times k_s$$

$$\pi_1 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_1 = \frac{k_s}{y_c}$$

La ecuación adimensional para π_2 es:

$$\pi_2 = y_c^a g^b \rho^c \times Hd$$

$$\pi_2 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_2 = \frac{Hd}{y_c}$$

La ecuación adimensional para π_3 es:

$$\pi_3 = y_c^a g^b \rho^c \times b_e$$

$$\pi_3 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_3 = \frac{b_e}{y_c}$$

La ecuación adimensional para π_4 es:

$$\pi_4 = y_c^a g^b \rho^c \times \alpha$$

$$\pi_4 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (1)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	0
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = 0$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_4 = \alpha$$

La ecuación adimensional para π_5 es:

$$\pi_5 = y_c^a g^b \rho^c \times q$$

$$\pi_5 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L^2 T^{-1})$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-2
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	1

Resultados

$$\rightarrow a = -3/2$$

$$\rightarrow b = -1/2$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_5 = \frac{q}{\sqrt{y_c^3 * g}}$$

La ecuación adimensional para π_6 es:

$$\pi_6 = y_c^a g^b \rho^c \times y_u$$

$$\pi_6 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_6 = \frac{y_u}{y_c}$$

La ecuación adimensional para π_7 es:

$$\pi_7 = y_c^a g^b \rho^c \times C_m$$

$$\pi_7 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (1)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	0
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = 0$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_7 = C_m$$

La ecuación adimensional para π_8 es:

$$\pi_8 = y_c^a g^b \rho^c \times \Delta E$$

$$\pi_8 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_8 = \frac{\Delta E}{y_c}$$

La ecuación adimensional para π_9 es:

$$\pi_9 = y_c^a g^b \rho^c \times E_t$$

$$\pi_9 = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_9 = \frac{E_t}{y_c}$$

La ecuación adimensional para π_{10} es:

$$\pi_{10} = y_c^a g^b \rho^c \times f_e$$

$$\pi_{10} = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (1)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	0
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = 0$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_{10} = f_e$$

La ecuación adimensional para π_{11} es:

$$\pi_{11} = y_c^a g^b \rho^c \times E_r$$

$$\pi_{11} = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L)$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-1
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	0

Resultados

$$\rightarrow a = -1$$

$$\rightarrow b = 0$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_{11} = \frac{E_r}{y_c}$$

La ecuación adimensional para π_{12} es:

$$\pi_{12} = y_c^a g^b \rho^c \times v$$

$$\pi_{12} = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (L^2T^{-1})$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	-2
M	0	0	1	0
T	0	-2	0	1

Resultados

$$\rightarrow a = -3/2$$

$$\rightarrow b = -1/2$$

$$\rightarrow c = 0$$

$$\pi_{12} = \frac{v}{\sqrt{y_c^3 * g}}$$

La ecuación adimensional para π_{13} es:

$$\pi_{13} = y_c^a g^b \rho^c \times \sigma$$

$$\pi_{13} = L^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c \times (MT^{-2})$$

	a	b	c	h
L	1	1	-3	0
M	0	0	1	-1
T	0	-2	0	2

Resultados

$$\rightarrow a = -2$$

$$\rightarrow b = -1$$

$$\rightarrow c = -1$$

$$\pi_{13} = \frac{\sigma}{y_c^2 * g * \rho}$$

f) Verificar que todos los parámetros π sean adimensionales y finalmente escribir la función final:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}, \pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{13}) = 0$$

$$\varphi\left(\frac{k_s}{y_c}, \frac{H_d}{y_c}, \frac{b_e}{y_c}, \alpha, \frac{q}{\sqrt{y_c^3 * g}}, \frac{y_u}{y_c}, C_m, \frac{\Delta E}{y_c}, \frac{E_t}{y_c}, \frac{E_r}{y_c}, f_e, \frac{v}{\sqrt{y_c^3 * g}}, \frac{\sigma}{y_c^2 * g * \rho}\right) = 0$$

ANEXO N° 5

REGISTRO DE DATOS: PRUEBAS CON DISEÑO ORIGINAL

Cuadro No. 1: Registro de datos para la prueba P0-DO (Q = 14,23 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: PO (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 14/02/2018 12:00 PM

Q = 14,23 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	4,3	4,3	4,3	4,6	4,6	4,6	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	-	2,0	2,0	1,9	2,0	1,9	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	2,6	3,5	3,1	1,3	2,4	1,9	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	2,6	3,4	3,0	2,1	2,8	2,5	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	2,1	3,0	2,6	1,9	2,5	2,2	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	2,3	2,8	2,6	2,4	3,1	2,8	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	2,2	2,8	2,5	2,2	2,9	2,6	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	2,5	3,5	3,0	2,3	2,9	2,6	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	2,6	3,6	3,1	2,3	3,0	2,7	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	1,3	2,4	1,9	1,4	2,0	1,7	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	1,6	2,1	1,9	1,4	1,8	1,6	64 cm	
Regla	1,3	2,0	1,7	1,5	1,9	1,7	128 cm	

Cuadro No. 2: Registro de datos para la prueba P0-DO (Q = 14,23 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)
 No. Prueba: PO (Diseño Original) FECHA/ HORA: 14/02/2018 12:00 PM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 \cdot h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:	Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)		
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	37,60	28,58	14,23		
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	43,10	34,09			
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=	14,21	14,25			
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil					
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)		
23,50	34,47	10,97	70,0		
23,61	34,64	11,03	145,0		
23,69	34,82	11,13	220,0		
23,83	34,86	11,03	254,3		
23,77	34,78	11,01	270,0		
27,47	34,32	6,85	286,5		
RÁPIDA ESCALONADA					
	Izquierda		Derecha		
	Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)	
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:					
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)					
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media					
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta					
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)					
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA					
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)	Carga Piezométrica (cm)	Observaciones	Ubicación
A1-C	63,8	74,8	11,0		Canal de Aprox. 70cm
A2-C	63,6	74,9	11,3		Canal de Aprox. 145cm
A3-D	63,8	74,7	10,9		Canal de Aprox. 220cm
A3-C	63,7	74,7	11,0		
A3-I	63,5	74,7	11,2		Escalón 1 (296,5 cm)
E1-D	69,3	72,6	3,3		
E1-C	69,4	72,7	3,3		
E1-I	69,3	72,2	2,9		

Cuadro No. 3: Registro de datos para la prueba P1-DO (Q = 23,37 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P1 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 02/02/2018 8:00 AM

Q = 23,37 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	-	6,1	6,1	-	5,8	5,8	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	-	5,4	5,4	-	5,7	5,7	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	-	2,8	2,8	-	2,8	2,8	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	6,4	6,6	6,5	5,2	5,7	5,5	Escalón N° 7 (h _{vertical})	
Regla	6,5	7,0	6,8	7,4	8,2	7,8	Escalón N° 9 (h _{vertical})	
Regla	3,0	3,5	3,3	3,6	4,0	3,8	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	6,5	7,0	6,8	6,8	7,5	7,2	Escalón N° 11 (h _{vertical})	
Regla	6,0	6,5	6,3	6,2	6,6	6,4	Escalón N° 13 (h _{vertical})	
Regla	6,2	6,7	6,5	6,3	6,6	6,5	Escalón N° 15 (h _{vertical})	
Regla	2,5	3,0	2,8	3,0	3,3	3,2	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	2,7	3,2	3,0	3,0	3,4	3,2	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	2,2	2,7	2,5	3,2	3,5	3,4	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	2,7	3,3	3,0	3,3	3,8	3,6	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	2,5	3,0	2,8	3,2	4,1	3,7	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	3,5	4,0	3,8	2,7	3,2	3,0	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	1,7	2,6	2,2	2,6	3,0	2,8	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	1,8	2,4	2,1	1,9	2,4	2,2	64 cm	
Regla	2,0	2,5	2,3	2,0	2,4	2,2	128 cm	

Cuadro No. 4: Registro de datos para la prueba P1-DO (Q = 23,37 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P1 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 02/02/2018 8:00 AM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 23,37			
Lectura cero limnómetro: h ₀ (cm)=		37,60	28,58				
Lectura medida limnómetro: h _{lim} (cm)=		45,31	36,35				
Caudal instalación experimental: Q _m (l/s)=		23,24	23,51				
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h ₀ (cm)	h _{medido} (cm)	h _{medido} - h ₀ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	36,71	13,21	70,0				
23,61	36,84	13,23	145,0				
23,69	37,03	13,34	220,0				
23,83	37,04	13,21	254,3				
23,77	36,85	13,08	270,0				
27,47	36,18	8,71	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
		Izquierda		Derecha			
		Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)		
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:		6		7			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)		8		7			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media		8		8			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta		9		9			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)		10	3,0 - 3,5	10	3,6 - 4,0		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Observaciones	Ubicación
A1-C	63,8	76,9		13,1			Canal de Aprox. 70cm
A2-C	63,6	76,9		13,3			Canal de Aprox. 145cm
A3-D	63,8	76,8		13,0			Canal de Aprox. 220cm
A3-C	63,7	76,8		13,1			
A3-I	63,5	76,8		13,3			
E1-D	69,3	73,6		4,3			Escalón 1 (296,5 cm)
E1-C	69,4	73,8		4,4			
E1-I	69,3	73,6		4,3			
E2-C	68,1	71,3		3,2			Escalón 2 (301,5 cm)
E3-D	65,6	67,2	67,4	1,6	1,8	Oscilación muy lenta	Escalón 3 (306,5 cm)
E3-C	65,6	67,4	67,7	1,8	2,1	Oscilación muy lenta	
E3-I	65,6	67,1	67,2	1,5	1,6	Oscilación muy lenta	
E4-C	180,0	181,8	182,1	1,8	2,1	Oscilación muy lenta	Escalón 4 (311,5 cm)
E5-C	175,1	176,7	177,0	1,6	1,9	Oscilación muy lenta	Escalón 5 (316,5 cm)
E7-D	165,4	170,4	171,0	5,0	5,6	Oscilación lenta	Escalón 7 (326,5 cm)
E7-C	165,2	167,8	168,2	2,6	3,0	Oscilación lenta	
E7-I	165,1	168,2	168,9	3,1	3,8	Oscilación lenta	
E9-D	155,3	158,8	159,4	3,5	4,1	Oscilación media	Escalón 9 (336,5 cm)
E9-C	155,2	156,6	157,1	1,4	1,9	Oscilación media	
E9-I	155,1	157,2	157,6	2,1	2,5	Oscilación media	
E11-D	145,2	149,2	148,5	4,0	3,3	Oscilación media	Escalón 11 (346,5 cm)
E11-I	145,2	147,1	147,5	1,9	2,3	Oscilación media	
E13-D	135,1	138,0	138,4	2,9	3,3	Oscilación media	Escalón 13 (356,5 cm)
E13-I	135,2	136,6	136,9	1,4	1,7	Oscilación media	
E15-D	124,7	127,6	128,4	2,9	3,7	Oscilación muy lenta	Escalón 15 (366,5 cm)
E15-I	124,8	126,3	126,8	1,5	2,0	Oscilación muy lenta	

Cuadro No. 5: Registro de datos para la prueba P2-DO (Q = 33,89 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P2 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 01/02/2018 4:00 PM

Q = 33,89 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	-	7,3	7,3	-	7,2	7,2	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	-	6,8	6,8	-	6,8	6,8	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	-	3,7	3,7	-	3,6	3,6	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	-	7,1	7,1	-	6,7	6,7	Escalón N° 7 (h _{vertical})	
Regla	7,0	7,5	7,3	6,9	7,5	7,2	Escalón N° 9 (h _{vertical})	
Regla	3,5	4,2	3,9	4,3	4,8	4,6	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	7,3	7,8	7,6	7,3	7,8	7,6	Escalón N° 11 (h _{vertical})	
Regla	7,5	8,0	7,8	7,8	8,2	8,0	Escalón N° 13 (h _{vertical})	
Regla	7,7	8,3	8,0	8,2	8,5	8,4	Escalón N° 15 (h _{vertical})	
Regla	3,7	4,1	3,9	4,1	4,5	4,3	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	3,5	4,0	3,8	3,3	3,8	3,6	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	3,7	4,3	4,0	3,6	3,9	3,8	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	3,7	4,3	4,0	3,7	4,2	4,0	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	3,8	4,6	4,2	3,8	4,1	4,0	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	4,0	4,5	4,3	-	4,2	4,2	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	2,4	3,1	2,8	2,9	3,2	3,1	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	2,0	2,6	2,3	2,5	2,9	2,7	64 cm	
Regla	2,1	3,0	2,6	2,8	3,2	3,0	128 cm	

Cuadro No. 6: Registro de datos para la prueba P2-DO (Q = 33,89 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P2 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 01/02/2018 4:00 PM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 \cdot h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 33,89			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37,60	28,58				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		47,60	38,56				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		33,94	33,84				
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	38,07	14,57	70,0				
23,61	38,70	15,09	145,0				
23,69	38,89	15,20	220,0				
23,83	38,97	15,14	254,3				
23,77	38,75	14,98	270,0				
27,47	37,83	10,36	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
		Izquierda		Derecha			
		Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)		
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:		8		7			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)		9		8			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media		9		9			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta		10		11			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)		11	3,7 - 4,4	12	4,5 - 4,9		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)	Observaciones	Ubicación	
A1-C	63,8	78,6		14,8		Canal de Aprox. 70cm	
A2-C	63,6	78,6		15,0		Canal de Aprox. 145cm	
A3-D	63,8	78,5		14,7		Canal de Aprox. 220cm	
A3-C	63,7	78,5		14,8			
A3-I	63,5	78,6		15,1			
E1-D	69,3	74,4		5,1		Escalón 1 (296,5 cm)	
E1-C	69,4	74,7		5,3			
E1-I	69,3	74,5		5,2			
E2-C	68,1	71,6		3,5		Escalón 2 (301,5 cm)	
E3-D	65,6	66,9	67,0	1,3	1,4	Oscilación muy lenta	Escalón 3 (306,5 cm)
E3-C	65,6	67,2	67,4	1,6	1,8	Oscilación muy lenta	
E3-I	65,6	67,1	67,2	1,5	1,6	Oscilación muy lenta	
E4-C	180,0	181,9	182,1	1,9	2,1	Oscilación muy lenta	Escalón 4 (311,5 cm)
E5-C	175,1	176,9	177,0	1,8	1,9	Oscilación muy lenta	Escalón 5 (316,5 cm)
E7-D	165,4	171,1	171,6	5,7	6,2	Oscilación lenta	Escalón 7 (326,5 cm)
E7-C	165,2	168,4	169,0	3,2	3,8	Oscilación lenta	
E7-I	165,1	169,1	169,8	4,0	4,7	Oscilación lenta	
E9-D	155,3	160,6	161,7	5,3	6,4	Oscilación media	Escalón 9 (336,5 cm)
E9-C	155,2	156,3	157,4	1,1	2,2	Oscilación media	
E9-I	155,1	158,8	159,6	3,7	4,5	Oscilación media	
E11-D	145,2	151,4	152,2	6,2	7,0	Oscilación media	Escalón 11 (346,5 cm)
E11-I	145,2	149,2	150,1	4,0	4,9	Oscilación media	
E13-D	135,1	138,4	139,4	3,3	4,3	Oscilación media	Escalón 13 (356,5 cm)
E13-I	135,2	137,1	137,6	1,9	2,4	Oscilación media	
E15-D	124,7	126,3	127,4	1,6	2,7	Oscilación media	Escalón 15 (366,5 cm)
E15-I	124,8	127,1	127,4	2,3	2,6	Oscilación media	

Cuadro No. 7: Registro de datos para la prueba P3-DO (Q = 44,44 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P3 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 01/02/2018 2:15 PM

Q = 44,44 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	-	8,6	8,6	-	8,6	8,6	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	-	7,9	7,9	-	7,9	7,9	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	-	4,6	4,6	-	4,5	4,5	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	-	8,4	8,4	7,5	7,8	7,7	Escalón N° 7 (h _{vertical})	
Regla	8,4	8,8	8,6	7,4	7,5	7,5	Escalón N° 9 (h _{vertical})	
Regla	3,8	4,5	4,2	4,4	5,1	4,8	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	8,0	9,0	8,5	7,9	8,4	8,2	Escalón N° 11 (h _{vertical})	
Regla	8,2	8,7	8,5	8,6	9,0	8,8	Escalón N° 13 (h _{vertical})	
Regla	8,5	9,8	9,2	9,4	9,9	9,7	Escalón N° 15 (h _{vertical})	
Regla	4,5	5,0	4,8	4,7	5,2	5,0	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	4,0	4,5	4,3	4,6	5,2	4,9	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	3,5	4,0	3,8	4,5	5,1	4,8	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	3,5	4,0	3,8	4,5	5,0	4,8	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	3,7	4,3	4,0	4,6	5,8	5,2	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	4,5	5,0	4,8	4,6	5,2	4,9	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	3,5	4,0	3,8	3,5	3,9	3,7	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	3,5	4,0	3,8	2,9	3,5	3,2	64 cm	
Regla	3,1	3,6	3,4	3,4	3,9	3,7	128 cm	

Cuadro No. 8: Registro de datos para la prueba P3-DO (Q = 44,44 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P3 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 01/02/2018 2:15 PM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:	Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 44,44				
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	37,60	28,58					
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	49,63	40,62					
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=	44,42	44,47					
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	40,09	16,59	70,0				
23,61	40,26	16,65	145,0				
23,69	40,49	16,80	220,0				
23,83	40,44	16,61	254,3				
23,77	40,18	16,41	270,0				
27,47	39,26	11,79	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
		Izquierda		Derecha			
		Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)		
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:		9		8			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)		11		10			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media		12		11			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta		13		13			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)		14	4,5 - 5,0	14	4,8 - 5,4		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Observaciones	Ubicación
A1-C	63,8	80,0		16,2			Canal de Aprox. 70cm
A2-C	63,6	80,0		16,4			Canal de Aprox. 145cm
A3-D	63,8	79,9		16,1			Canal de Aprox. 220cm
A3-C	63,7	79,9		16,2			
A3-I	63,5	80,0		16,5			
E1-D	69,3	74,8		5,5			Escalón 1 (296,5 cm)
E1-C	69,4	75,4		6,0			
E1-I	69,3	75,3		6,0			
E2-C	68,1	71,1	71,3	3,0	3,2	Oscilación lenta	Escalón 2 (301,5 cm)
E3-D	65,6	66,7	66,8	1,1	1,2	Oscilación lenta	Escalón 3 (306,5 cm)
E3-C	65,6	66,6	66,9	1,0	1,3	Oscilación lenta	
E3-I	65,6	66,8	66,9	1,2	1,3	Oscilación lenta	
E4-C	180,0	181,8	182,1	1,8	2,1	Oscilación lenta	Escalón 4 (311,5 cm)
E5-C	175,1	176,7	177,0	1,6	1,9	Oscilación lenta	Escalón 5 (316,5 cm)
E7-D	165,4	171,2	171,9	5,8	6,5	Oscilación media	Escalón 7 (326,5 cm)
E7-C	165,2	169,3	170,1	4,1	4,9	Oscilación media	
E7-I	165,1	170,0	170,8	4,9	5,7	Oscilación media	
E9-D	155,3	160,6	161,4	5,3	6,1	Oscilación rápida	Escalón 9 (336,5 cm)
E9-C	155,2	157,4	158,3	2,2	3,1	Oscilación rápida	
E9-I	155,1	159,0	159,8	3,9	4,7	Oscilación rápida	
E11-D	145,2	153,8	154,2	8,6	9,0	Oscilación rápida	Escalón 11 (346,5 cm)
E11-I	145,2	151,0	152,1	5,8	6,9	Oscilación rápida	
E13-D	135,1	140,4	141,9	5,3	6,8	Oscilación rápida	Escalón 13 (356,5 cm)
E13-I	135,2	140,0	141,6	4,8	6,4	Oscilación rápida	
E15-D	124,7	127,6	128,1	2,9	3,4	Oscilación rápida	Escalón 15 (366,5 cm)
E15-I	124,8	129,1	130,0	4,3	5,2	Oscilación rápida	

Cuadro No. 9: Registro de datos para la prueba P4-DO (Q = 55,82 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P4 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 01/02/2018 9:30 AM

Q = 55,82 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	-	9,8	9,8	9,5	9,6	9,6	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	-	9,2	9,2	8,8	8,9	8,9	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	5,6	5,7	5,7	5,1	5,3	5,2	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	9,3	9,5	9,4	8,3	8,5	8,4	Escalón N° 7 (h _{vertical})	
Regla	9,3	9,5	9,4	8,4	8,5	8,5	Escalón N° 9 (h _{vertical})	
Regla	5,0	5,5	5,3	4,7	4,9	4,8	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	9,5	10,0	9,8	9,2	9,5	9,4	Escalón N° 11 (h _{vertical})	
Regla	9,5	10,0	9,8	9,5	9,6	9,6	Escalón N° 13 (h _{vertical})	
Regla	-	9,5	9,5	9,6	9,7	9,7	Escalón N° 15 (h _{vertical})	
Regla	5,0	5,6	5,3	5,2	5,5	5,4	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	6,0	6,5	6,3	5,3	5,6	5,5	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	4,5	5,5	5,0	5,3	5,6	5,5	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	5,0	5,5	5,3	5,9	6,2	6,1	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	5,0	6,0	5,5	5,6	6,7	6,2	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	5,0	5,5	5,3	5,3	5,7	5,5	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	3,5	4,0	3,8	3,8	4,5	4,2	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	3,5	4,1	3,8	3,6	4,1	3,9	64 cm	
Regla	3,7	4,3	4,0	3,8	4,3	4,1	128 cm	

Cuadro No. 10: Registro de datos para la prueba P4-DO (Q = 55,82 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P4 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 01/02/2018 9:30 AM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 55,82			
Lectura cero limnómetro: h ₀ (cm)=		37,60	28,58				
Lectura medida limnómetro: h _{lim} (cm)=		51,61	42,72				
Caudal instalación experimental: Q _m (l/s)=		55,45	56,20				
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h ₀ (cm)	h _{medido} (cm)	h _{medido} - h ₀ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	41,73	18,23	70,0				
23,61	41,90	18,29	145,0				
23,69	41,93	18,24	220,0				
23,83	41,97	18,14	254,3				
23,77	41,75	17,98	270,0				
27,47	40,54	13,07	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
		Izquierda		Derecha			
		Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)		
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:		9		9			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)		13		12			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media		14		13			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta		15		16			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)		16	5,5 - 5,6	17	5,5 - 6,0		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Observaciones	Ubicación
A1-C	63,8	81,6		17,8			Canal de Aprox. 70cm
A2-C	63,6	81,6		18,0			Canal de Aprox. 145cm
A3-D	63,8	81,4		17,6			Canal de Aprox. 220cm
A3-C	63,7	81,4		17,7			
A3-I	63,5	81,3		17,8			
E1-D	69,3	75,3		6,0			Escalón 1 (296,5 cm)
E1-C	69,4	75,7		6,3			
E1-I	69,3	75,4		6,1			
E2-C	68,1	70,8	71,0	2,7	2,9	Oscilación muy lenta	Escalón 2 (301,5 cm)
E3-D	65,6	65,8	66,0	0,2	0,4	Oscilación lenta	Escalón 3 (306,5 cm)
E3-C	65,6	66,2	66,5	0,6	0,9	Oscilación lenta	
E3-I	65,6	65,9	66,0	0,3	0,4	Oscilación lenta	
E4-C	180,0	181,6	181,8	1,6	1,8	Oscilación media	Escalón 4 (311,5 cm)
E5-C	175,1	176,7	177,0	1,6	1,9	Oscilación media	Escalón 5 (316,5 cm)
E7-D	165,4	171,4	171,8	6,0	6,4	Oscilación media	Escalón 7 (326,5 cm)
E7-C	165,2	170,2	170,5	5,0	5,3	Oscilación media	
E7-I	165,1	171,0	171,9	5,9	6,8	Oscilación media	
E9-D	155,3	160,8	161,6	5,5	6,3	Oscilación media	Escalón 9 (336,5 cm)
E9-C	155,2	158,1	158,6	2,9	3,4	Oscilación media	
E9-I	155,1	159,1	160,2	4,0	5,1	Oscilación media	
E11-D	145,2	152,2	153,8	7,0	8,6	Oscilación rápida	Escalón 11 (346,5 cm)
E11-I	145,2	150,4	151,8	5,2	6,6	Oscilación rápida	
E13-D	135,1	140,8	142,6	5,7	7,5	Oscilación rápida	Escalón 13 (356,5 cm)
E13-I	135,2	139,9	141,4	4,7	6,2	Oscilación rápida	
E15-D	124,7	128,2	130,4	3,5	5,7	Oscilación rápida	Escalón 15 (366,5 cm)
E15-I	124,8	128,1	130,8	3,3	6,0	Oscilación rápida	

Cuadro No. 11: Registro de datos para la prueba P5-DO ($Q = 77,86$ l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P5 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 31/01/2018 10:00 AM

$Q = 77,86$ l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	12,4	12,5	12,5	12,4	12,5	12,5	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	-	11,6	11,6	11,2	11,3	11,3	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	7,7	7,9	7,8	6,9	7,2	7,1	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	12,2	12,6	12,4	11,3	11,5	11,4	Escalón N° 7 (h _{vertical})	
Regla	11,2	11,5	11,4	10,4	10,9	10,7	Escalón N° 9 (h _{vertical})	
Regla	6,2	6,4	6,3	5,5	5,6	5,5	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	10,5	11,0	10,8	9,6	10,4	10,0	Escalón N° 11 (h _{vertical})	
Regla	9,8	10,3	10,1	9,9	10,6	10,3	Escalón N° 13 (h _{vertical})	
Regla	10,2	10,7	10,5	10,0	11,0	10,5	Escalón N° 15 (h _{vertical})	
Regla	5,9	6,1	6,0	6,0	6,2	6,1	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	6,7	6,9	6,8	6,6	6,9	6,8	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	6,5	6,6	6,6	6,8	6,9	6,9	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	6,8	6,9	6,9	6,7	7,0	6,9	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	6,9	8,9	7,9	6,7	6,9	6,8	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	7,3	7,8	7,6	7,6	7,8	7,7	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	5,4	5,7	5,5	5,10	5,50	5,30	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	5,0	5,2	5,1	5,20	5,50	5,35	64 cm	
Regla	4,3	4,7	4,5	4,60	4,95	4,78	128 cm	

Cuadro No. 12: Registro de datos para la prueba P5-DO (Q = 77,86 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P5 (Diseño Original)

FECHA/ HORA: 31/01/2018 10:00 AM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 \cdot h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 77,86			
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=		37,60	28,58				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=		55,27	46,29				
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=		77,73	77,99				
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	44,58	21,08	70,0				
23,61	44,70	21,09	145,0				
23,69	44,84	21,15	220,0				
23,83	44,65	20,82	254,3				
23,77	44,46	20,69	270,0				
27,47	43,09	15,62	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
		Izquierda		Derecha			
		Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)		
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:		11		10			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)		19		16			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media		21		18			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta		22		22			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)		23	5,7 - 6,3	23	6,0 - 7,0		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Observaciones	Ubicación
A1-C	63,8	84,6		20,8			Canal de Aprox. 70cm
A2-C	63,6	84,5		20,9			Canal de Aprox. 145cm
A3-D	63,8	84,4		20,6			Canal de Aprox. 220cm
A3-C	63,7	84,5		20,8			
A3-I	63,5	84,4		20,9			
E1-D	69,3	75,8		6,5			Escalón 1 (296,5 cm)
E1-C	69,4	76,4		7,0			
E1-I	69,3	76,1		6,8			
E2-C	68,1	70,0	70,2	1,9	2,1		Escalón 2 (301,5 cm)
E3-D	65,6	64,7	64,9	-0,9	-0,8		Escalón 3 (306,5 cm)
E3-C	65,6	64,7	65,0	-0,9	-0,6	Oscilación lenta	
E3-I	65,6	64,7	64,9	-0,9	-0,7	Oscilación lenta	
E4-C	180,0	180,9	181,4	0,9	1,4	Oscilación muy lenta	Escalón 4 (311,5 cm)
E5-C	175,1	176,8	177,1	1,7	2,0	Oscilación muy lenta	Escalón 5 (316,5 cm)
E7-D	165,4	173,1	174,1	7,7	8,7	Oscilación lenta	Escalón 7 (326,5 cm)
E7-C	165,2	171,0	171,3	5,8	6,1	Oscilación lenta	
E7-I	165,1	172,1	174,0	7,0	8,9	Oscilación lenta	
E9-D	155,3	162,0	163,3	6,7	8,0	Oscilación media	Escalón 9 (336,5 cm)
E9-C	155,2	159,2	160,4	4,0	5,2	Oscilación media	
E9-I	155,1	159,0	161,1	3,9	6,0	Oscilación media	
E11-D	145,2	156,4	157,2	11,2	12,0	Oscilación media	Escalón 11 (346,5 cm)
E11-I	145,2	149,6	150,8	4,4	5,6	Oscilación media	
E13-D	135,1	144,4	145,2	9,3	10,1	Oscilación rápida	
E13-I	135,2	137,1	139,8	1,9	4,6	Oscilación rápida	Escalón 13 (356,5 cm)
E15-D	124,7	130,9	133,3	6,2	8,6	Oscilación rápida	Escalón 15 (366,5 cm)
E15-I	124,8	126,8	130,4	2,0	5,6	Oscilación rápida	

ANEXO N° 6

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA
MODIFICACION AL DISEÑO ORIGINAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA**

TRAZADO Y CORTE DE TABIQUES TRIANGULARES

Fotografía No. 1: Trazado de tabiques triangulares en acrílico



Fotografía No. 2: Corte de placas de acrílico, previamente realizado el trazado de los tabiques triangulares



TRAZADO DE EJES EN LA RÁPIDA ESCALONADA PARA COLOCACIÓN DE TABIQUES TRIANGULARES

Fotografía No. 3: Trazado de ejes con piola para colocación de tabiques triangulares



INSTALACIÓN DE TABIQUES TRIANGULARES A LO LARGO DE LA RÁPIDA ESCALONADA

Fotografía No. 4: Colocación de tabiques triangulares



RÁPIDA ESCALONADA CON TABIQUES TRIANGULARES

Fotografía No. 5: Rápida escalonada con tabiques triangulares colocados



ANEXO N° 7

REGISTRO DE DATOS: PRUEBAS CON DISEÑO MODIFICADO

Cuadro No. 1: Registro de datos para la prueba P0-DM (Q = 14,42 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: PO (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 14/03/2018 11:30 AM

Q = 14,42 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	4,2	4,4	4,3	4,3	4,5	4,4	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	4,1	4,2	4,2	3,9	4,1	4,0	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	2,1	2,3	2,2	2,0	2,2	2,1	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	3,5	4,0	3,8	2,9	4,3	3,6	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	2,5	3,0	2,8	2,2	3,2	2,7	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	2,5	3,0	2,8	2,1	2,7	2,4	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	2,4	2,9	2,7	2,6	3,0	2,8	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	2,4	2,9	2,7	2,1	2,7	2,4	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	2,5	3,1	2,8	2,2	2,8	2,5	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	2,4	3,0	2,7	2,5	3,0	2,8	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	1,8	2,5	2,2	1,5	2,2	1,9	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	1,7	2,4	2,1	1,9	2,5	2,2	64 cm	
Regla	1,9	2,6	2,3	2,0	2,5	2,3	128 cm	

Cuadro No. 2: Registro de datos para la prueba P0-DM (Q = 14,42 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P0 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 14/03/2018 11:30 AM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:	Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)		
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	37,60	28,58	14,42		
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	43,15	34,14			
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=	14,40	14,44			
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil					
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)		
23,50	34,47	10,97	70,0		
23,61	34,60	10,99	145,0		
23,69	34,78	11,09	220,0		
23,83	34,84	11,01	254,3		
23,77	34,76	10,99	270,0		
27,47	34,29	6,82	286,5		
RÁPIDA ESCALONADA					
	Izquierda		Derecha		
	Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)	
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:	5	2,1 - 2,3	5	2,0 - 2,2	
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)	6	2,5 - 2,9	6	2,0 - 2,4	
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media					
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta	7		7		
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)	9	3,5 - 4,5	9	4,5 - 5,5	
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA					
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)	Carga Piezométrica (cm)	Observaciones	Ubicación
A1-C	63,8	74,7	10,9		Can. Aprox. 70cm
A2-C	63,6	74,6	11,0		Can. Aprox. 145cm
A3-D	63,8	74,7	10,9		Can. Aprox. 220cm
A3-C	63,7	74,6	10,9		
A3-I	63,5	74,6	11,1		
E1-D	69,3	72,5	3,2		Escalón 1 (296,5 cm)
E1-C	69,4	72,8	3,4		
E1-I	69,3	72,7	3,4		
E2-C	68,1	71,1	3,0		Escalón 2 (301,5 cm)
E3-D	65,6	67,3	1,7		Escalón 3 (306,5 cm)
E3-C	65,6	67,5	1,9	Oscilación lenta	
E3-I	65,6	67,4	1,8	Oscilación lenta	

Cuadro No. 3: Registro de datos para la prueba P1-DM (Q = 23,51 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P1 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 08/03/2018 12:30 PM

Q = 23,51 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	5,9	6,1	6,0	5,7	5,9	5,8	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	5,4	5,6	5,5	5,6	5,8	5,7	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	2,9	3,1	3,0	2,9	3,0	3,0	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	3,1	4,4	3,8	3,2	4,0	3,6	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	3,3	4,0	3,7	3,0	3,4	3,2	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	3,8	4,3	4,1	3,0	3,8	3,4	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	3,2	4,0	3,6	3,2	3,9	3,6	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	3,5	4,1	3,8	3,6	4,3	4,0	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	3,5	4,0	3,8	3,6	4,5	4,1	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	3,5	4,2	3,9	3,5	4,0	3,8	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	2,0	2,8	2,4	2,2	2,8	2,5	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	2,6	3,1	2,9	2,6	3,1	2,9	64 cm	
Regla	2,5	3,0	2,8	2,5	3,3	2,9	128 cm	

Cuadro No. 4: Registro de datos para la prueba P1-DM (Q = 23,51 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P1 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 08/03/2018 12:30 PM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:	Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 23,51				
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	37,60	28,58					
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	45,39	36,33					
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)=	23,59	23,42					
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	36,55	13,05	70,0				
23,61	36,73	13,12	145,0				
23,69	36,91	13,22	220,0				
23,83	36,93	13,10	254,3				
23,77	36,82	13,05	270,0				
27,47	36,12	8,65	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
		Izquierda		Derecha			
		Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)		
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:		7	2,9 - 3,0	7	2,3 - 2,8		
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)		8	2,8 - 3,9	8	3,2 - 4,2		
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media							
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta		9		9			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)		10	3,1 - 4,4	10	3,2 - 4,0		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)	Observaciones	Ubicación	
A1-C	63,8	76,8		13,0		Can. Aprox. 70cm	
A2-C	63,6	76,7		13,1		Can. Aprox. 145cm	
A3-D	63,8	76,7		12,9		Can. Aprox. 220cm	
A3-C	63,7	76,7		13,0			
A3-I	63,5	76,7		13,2			
E1-D	69,3	73,5		4,2		Escalón 1 (296,5 cm)	
E1-C	69,4	73,8		4,4			
E1-I	69,3	73,7		4,4			
E2-C	68,1	71,3	71,4	3,2	3,3	Escalón 2 (301,5 cm)	
E3-D	65,6	67,2	67,3	1,6	1,7	Escalón 3 (306,5 cm)	
E3-C	65,6	67,3	67,5	1,7	1,9		Oscilación lenta
E3-I	65,6	67,3	67,3	1,7	1,7		Oscilación lenta

Cuadro No. 5: Registro de datos para la prueba P2-DM (Q = 33,72 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P2 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: ##### 10:00 AM

Q = 33,72 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	7,3	7,4	7,4	7,1	7,3	7,2	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	6,5	6,7	6,6	6,4	6,6	6,5	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	-	4,0	4,0	3,4	3,6	3,5	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	3,8	4,5	4,2	3,8	4,5	4,2	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	3,8	4,6	4,2	3,6	4,4	4,0	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	3,7	4,2	4,0	3,5	4,2	3,9	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	3,8	4,6	4,2	3,7	4,7	4,2	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	3,6	4,5	4,1	4,0	4,8	4,4	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	4,0	4,9	4,5	3,8	4,6	4,2	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	4,4	5,5	5,0	4,5	5,5	5,0	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	2,7	3,7	3,2	2,9	3,7	3,3	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	2,7	3,7	3,2	2,9	3,8	3,4	64 cm	
Regla	3,0	4,0	3,5	3,0	4,0	3,5	128 cm	

Cuadro No. 6: Registro de datos para la prueba P2-DM (Q = 33,72 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P2 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 08/03/2018 10:00 AM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 \cdot h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:	Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)				
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	37,60	28,58	33,72				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	47,57	38,52					
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)	33,79	33,64					
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	38,46	14,96	70,0				
23,61	38,56	14,95	145,0				
23,69	38,73	15,04	220,0				
23,83	38,78	14,95	254,3				
23,77	38,61	14,84	270,0				
27,47	37,72	10,25	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
	Izquierda		Derecha				
	Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)			
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:	8	3,4 - 3,9	8	2,5 - 3,3			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)	9	3,4 - 4,1	9	2,3 - 3,0			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media	10						
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta	11		10				
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)	13	3,9 - 4,9	12	2,4 - 3,5			
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)	Observaciones	Ubicación	
A1-C	63,8	78,5		14,7		Can. Aprox. 70cm	
A2-C	63,6	78,4		14,8		Can. Aprox. 145cm	
A3-D	63,8	78,4		14,6		Can. Aprox. 220cm	
A3-C	63,7	78,4		14,7			
A3-I	63,5	78,4		14,9			
E1-D	69,3	74,2		4,9		Escalón 1 (296,5 cm)	
E1-C	69,4	74,6		5,2			
E1-I	69,3	74,5		5,2			
E2-C	68,1	71,5	71,6	3,4	3,5	Escalón 2 (301,5 cm)	
E3-D	65,6	67,0	67,1	1,4	1,5	Escalón 3 (306,5 cm)	
E3-C	65,6	67,1	67,2	1,5	1,6		Oscilación lenta
E3-I	65,6	67,0	67,0	1,4	1,4		Oscilación lenta

Cuadro No. 7: Registro de datos para la prueba P3-DM (Q = 44,42 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P3 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: ##### 3:00 PM

Q = 44,42 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	8,4	8,6	8,5	8,3	8,4	8,4	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	7,5	7,6	7,6	7,6	7,7	7,7	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	4,8	4,9	4,9	4,2	4,4	4,3	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	4,3	4,8	4,6	4,0	4,3	4,2	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	5,2	5,8	5,5	4,8	5,5	5,2	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	4,7	5,5	5,1	4,3	5,3	4,8	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	4,7	5,5	5,1	4,2	5,2	4,7	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	4,8	5,3	5,1	4,4	5,1	4,8	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	4,8	5,3	5,1	4,0	5,0	4,5	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	6,2	6,6	6,4	5,5	6,5	6,0	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	3,2	4,2	3,7	3,4	4,0	3,7	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	3,2	4,0	3,6	3,4	4,2	3,8	64 cm	
Regla	3,5	4,3	3,9	3,3	4,3	3,8	128 cm	

Cuadro No. 8: Registro de datos para la prueba P3-DM (Q = 44,42 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P3 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 07/03/2018 3:00 PM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:		Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s) 44,42			
Lectura cero limnómetro: h ₀ (cm)=		37,60	28,58				
Lectura medida limnómetro: h _{lim} (cm)=		49,62	40,62				
Caudal instalación experimental: Q _m (l/s)=		44,36	44,47				
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h ₀ (cm)	h _{medido} (cm)	h _{medido} - h ₀ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	40,10	16,60	70,0				
23,61	40,25	16,64	145,0				
23,69	40,40	16,71	220,0				
23,83	40,41	16,58	254,3				
23,77	40,16	16,39	270,0				
27,47	39,15	11,68	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
		Izquierda		Derecha			
		Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)		
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:		8	4,3 - 4,6	8	4,0 - 4,2		
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)		12	4,5 - 5,3	11	4,4 - 4,6		
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media		13		13			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta		14		14			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)		15	5,2 - 5,8	16	4,5 - 5,2		
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)		Observaciones	Ubicación
A1-C	63,8	80,2		16,4			Can. Aprox. 70cm
A2-C	63,6	80,1		16,5			Can. Aprox. 145cm
A3-D	63,8	80,0		16,2			Can. Aprox. 220cm
A3-C	63,7	80,0		16,3			
A3-I	63,5	80,0		16,5			
E1-D	69,3	74,8		5,5			Escalón 1 (296,5 cm)
E1-C	69,4	75,2		5,8			
E1-I	69,3	75,0		5,7			
E2-C	68,1	71,3	71,5	3,2	3,4		Escalón 2 (301,5 cm)
E3-D	65,6	66,6	66,7	1,0	1,1		Escalón 3 (306,5 cm)
E3-C	65,6	66,8	66,9	1,2	1,3	Oscilación lenta	
E3-I	65,6	66,7	66,8	1,1	1,2	Oscilación lenta	

Cuadro No. 9: Registro de datos para la prueba P4-DM (Q = 55,59 l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P4 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: ##### 9:30 AM

Q = 55,59 l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	9,9	10,0	10,0	9,6	9,7	9,7	Escalón N° 1 (h _{vertical})	Rápida escalonada
Regla	8,8	9,0	8,9	9,0	9,1	9,1	Escalón N° 3 (h _{vertical})	
Regla	5,5	5,6	5,6	5,2	5,5	5,4	Escalón N° 5 (h _{inclinada})	
Regla	4,8	5,0	4,9	4,4	4,9	4,7	Escalón N° 10 (h _{inclinada})	
Regla	5,5	6,0	5,8	5,0	5,5	5,3	Escalón N° 15 (h _{inclinada})	
Cinta 1	5,5	6,5	6,0	5,2	6,2	5,7	Escalón N° 20 (h _{inclinada})	
Cinta 2	5,7	6,6	6,2	5,5	6,6	6,1	Escalón N° 40 (h _{inclinada})	
Cinta 3	5,7	6,7	6,2	5,4	6,5	6,0	Escalón N° 60 (h _{inclinada})	
Cinta 4	6,0	6,7	6,4	5,8	6,5	6,2	Escalón N° 80 (h _{inclinada})	
Regla	6,6	7,3	7,0	6,3	7,2	6,8	Escalón N° 93 (h _{inclinada})	
Cinta 5	4,0	4,8	4,4	4,1	5,2	4,7	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	3,5	4,5	4,0	3,8	4,8	4,3	64 cm	
Regla	3,9	4,9	4,4	3,9	4,9	4,4	128 cm	

Cuadro No. 10: Registro de datos para la prueba P4-DM (Q = 55,59 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P4 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 07/03/2018 9:30 AM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:	Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)				
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	37,60	28,58	55,59				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	51,62	42,63					
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)	55,50	55,68					
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	41,85	18,35	70,0				
23,61	41,94	18,33	145,0				
23,69	42,10	18,41	220,0				
23,83	42,04	18,21	254,3				
23,77	41,97	18,20	270,0				
27,47	40,68	13,21	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
	Izquierda		Derecha				
	Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)			
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:	11	4,2 - 4,7	11	4,3 - 4,5			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)	14	4,6 - 5,2	13	4,4 - 4,5			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media	16		15				
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta	18		17				
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)	19	4,7 - 5,5	19	4,8 - 5,4			
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)	Observaciones	Ubicación	
A1-C	63,8	81,9		18,1		Can. Aprox. 70cm	
A2-C	63,6	81,8		18,2		Can. Aprox. 145cm	
A3-D	63,8	81,7		17,9		Can. Aprox. 220cm	
A3-C	63,7	81,7		18,0			
A3-I	63,5	81,6		18,1			
E1-D	69,3	75,3		6,0		Escalón 1 (296,5 cm)	
E1-C	69,4	75,7		6,3			
E1-I	69,3	75,5		6,2			
E2-C	68,1	71,0	71,2	2,9	3,1	Escalón 2 (301,5 cm)	
E3-D	65,6	66,1	66,1	0,5	0,5	Escalón 3 (306,5 cm)	
E3-C	65,6	66,0	66,2	0,4	0,6		Oscilación lenta
E3-I	65,6	66,0	66,1	0,4	0,5		Oscilación lenta

Cuadro No. 11: Registro de datos para la prueba P5-DM ($Q = 78,34$ l/s). Lecturas de cintas y reglas.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)
REGISTRO DE DATOS: MEDICIONES CON CINTA Y REGLA



NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P5 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 06/03/2018 10:30 AM

$Q = 78,34$ l/s

MEDICIONES DE ALTURAS DE FLUJO CON CINTA Y REGLA								
No.	Flujo a la Izquierda			Flujo a la Derecha			Ubicación	Zona
	Altura de agua (cm)			Altura de agua (cm)				
	Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)			Hasta Perfil Líquido (Flujo Bifásico)				
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio		
Regla	12,0	12,2	12,1	11,9	12,1	12,0	Escalón N° 1 ($h_{vertical}$)	Rápida escalonada
Regla	11,4	11,5	11,5	10,9	11,2	11,1	Escalón N° 3 ($h_{vertical}$)	
Regla	7,5	7,8	7,7	7,0	7,2	7,1	Escalón N° 5 ($h_{inclinada}$)	
Regla	5,9	6,5	6,2	5,5	5,8	5,7	Escalón N° 10 ($h_{inclinada}$)	
Regla	5,7	6,2	6,0	5,6	6,0	5,8	Escalón N° 15 ($h_{inclinada}$)	
Cinta 1	6,1	7,0	6,6	5,8	6,8	6,3	Escalón N° 20 ($h_{inclinada}$)	
Cinta 2	6,1	7,2	6,7	6,0	7,0	6,5	Escalón N° 40 ($h_{inclinada}$)	
Cinta 3	6,6	8,0	7,3	6,6	8,1	7,4	Escalón N° 60 ($h_{inclinada}$)	
Cinta 4	6,5	8,0	7,3	6,6	8,1	7,4	Escalón N° 80 ($h_{inclinada}$)	
Regla	7,5	8,5	8,0	7,5	8,5	8,0	Escalón N° 93 ($h_{inclinada}$)	
Cinta 5	4,8	5,8	5,3	5,50	6,5	6,0	0 cm	Canal de salida al pie de la rápida escalonada
Cinta 6	5,0	6,0	5,5	5,50	6,8	6,2	64 cm	
Regla	5,2	6,6	5,9	5,00	5,7	5,4	128 cm	

Cuadro No. 12: Registro de datos para la prueba P5-DM (Q = 78,34 l/s). Lecturas de limnímetros y piezómetros.



REGISTRO DE DATOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)

NOMBRE: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL - RÁPIDA ESCALONADA (FLUJO SUBCRÍTICO)

No. Prueba: P5 (Diseño Modificado)

FECHA/ HORA: 06/03/2018 10:30 AM

Ecuación experimental - Curva de descarga vertedero rectangular:

$$Q = 1,1885 * h^{1.4557}$$

Posición de Limnímetros:	Oriental	Occidental	Q Promedio (l/s)				
Lectura cero limnómetro: h_0 (cm)=	37,60	28,58	78,34				
Lectura medida limnómetro: h_{lim} (cm)=	55,35	46,36					
Caudal instalación experimental: Q_m (l/s)	78,25	78,44					
CANAL DE APROXIMACIÓN (INGRESO) - Lectura de Limnómetro Móvil							
Lectura cero h_0 (cm)	h_{medido} (cm)	$h_{medido} - h_0$ (cm)	Ubicación: Medido desde el inicio del canal de aproximación (cm)				
23,50	44,58	21,08	70,0				
23,61	44,64	21,03	145,0				
23,69	44,78	21,09	220,0				
23,83	44,65	20,82	254,3				
23,77	44,5	20,73	270,0				
27,47	43,05	15,58	286,5				
RÁPIDA ESCALONADA							
	Izquierda		Derecha				
	Escalón	Calado (cm)	Escalón	Calado (cm)			
Número de Escalón en el que empieza a variar la lámina de la superficie libre del flujo:	12	5,8 - 6,2	12	5,5 - 6,0			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia baja (inicio de formación de vórtices)	18	5,8 - 6,5	18	5,8 - 6,5			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia media	20	6,1 - 7,0	20	5,8 - 6,8			
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia alta	21		21				
Número de escalón en el cual los vórtices tienen intermitencia muy alta (aireación completa)	24	6,5 - 7,5	24	6,2 - 7,0			
PIEZÓMETROS EN EL CANAL DE APROXIMACIÓN Y LA RÁPIDA ESCALONADA							
# Piezómetro	Lectura Cero Piezómetro (cm)	Lectura Piezómetro (cm)		Carga Piezométrica (cm)	Observaciones	Ubicación	
A1-C	63,8	84,4		20,6		Can. Aprox. 70cm	
A2-C	63,6	84,4		20,8		Can. Aprox. 145cm	
A3-D	63,8	84,3		20,5		Can. Aprox. 220cm	
A3-C	63,7	84,4		20,7			
A3-I	63,5	84,2		20,7			
E1-D	69,3	75,3		6,0		Escalón 1 (296,5 cm)	
E1-C	69,4	76,5		7,1			
E1-I	69,3	76,1		6,8			
E2-C	68,1	70,8	71,2	2,7	3,1	Escalón 2 (301,5 cm)	
E3-D	65,6	64,8	64,9	-0,8	-0,7	Escalón 3 (306,5 cm)	
E3-C	65,6	64,7	64,9	-0,9	-0,7		Oscilación lenta
E3-I	65,6	64,6	64,8	-1,0	-0,8		Oscilación lenta

ANEXO N° 8

PLANOS: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RÁPIDA ESCALONADA